



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

**Tertiäre Sedimente  
als Barriere für die  
U-/Th-Migration  
im Fernfeld von  
Endlagern**



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## Tertiäre Sedimente als Barriere für die U-/Th-Migration im Fernfeld von Endlagern

Ulrich Noseck  
Thomas Brassler  
Walter Pohl

März 2002

### **Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02 E 9128 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

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

**GRS - 176**  
**ISBN 3-931995-44-5**

## Danksagung

Art und Umfang der in vorliegendem Bericht zusammengestellten Ergebnisse von Untersuchungen an den Standorten Ruprechtov und Heselbach sind erst durch eine enge Kooperation mit folgenden Projektpartnern (alphabetisch nach Institutsnamen) ermöglicht worden. Darüber hinaus danken wir Herrn FD Wulf-Dieter Wilke vom Bayerischen Forstamt Pfreimd sowie Herrn Franz Lohbauer aus Heselbach für die unkomplizierte vor-Ort-Unterstützung.

### *Kazimierz Rozanski*

AGH - University of Technology  
Faculty of Physics and Nuclear Techniques  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków, Polen  
eMail: [rozanski@novell.ftj.agh.edu.pl](mailto:rozanski@novell.ftj.agh.edu.pl)

### *Klaus Standtke*

Institut für Umwelttechnologien GmbH  
Volmerstraße 9B  
12489 Berlin-Adlershof  
eMail: [standtke@iut-berlin.com](mailto:standtke@iut-berlin.com)

### *Shaun Reeder*

British Geological Survey  
Keyworth, Nottingham  
NG12 5GG, Vereinigtes Königreich  
eMail: [s.reeder@bgs.ac.uk](mailto:s.reeder@bgs.ac.uk)

### *Martin Stute*

Lamont-Doherty Earth Observatory  
61 Route 9W  
Palisades, NY 10964  
eMail: [martins@ldeo.columbia.edu](mailto:martins@ldeo.columbia.edu)

### *Bernd Grambow, Abdelouas Abdesselam, Yves Andres*

Ecole des Mines de Nantes  
Laboratoire SUBATECH  
4, rue Alfred Kastler  
44307 Nantes Cedex 3, Frankreich  
eMail: [grambow@subatech.in2p3.fr](mailto:grambow@subatech.in2p3.fr)/  
[abdeloua@subatech.in2p3.fr](mailto:abdeloua@subatech.in2p3.fr)

### *Ales Laciok, Mirek Hercik*

Nuclear Research Institute (NRI) Rez plz  
25068 Rez, Tschechische Republik  
eMail: [lac@nri.cz](mailto:lac@nri.cz) / [her@nri.cz](mailto:her@nri.cz)

### *Johannes Fachinger*

Forschungszentrum Jülich - ISR  
52425 Jülich  
eMail: [j.fachinger@fz.juelich.de](mailto:j.fachinger@fz.juelich.de)

### *Walter Pohl, Dieter Zachmann, Dagmar Schönwiese, Oliver Böhnke*

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Geowissenschaften  
Pockelsstraße 3  
38106 Braunschweig  
eMail: [walter.pohl@tu-bs.de](mailto:walter.pohl@tu-bs.de) /  
[d.zachmann@tu-bs.de](mailto:d.zachmann@tu-bs.de)

### *Deniz Oezen*

Institut für Geowissenschaftliche  
Gemeinschaftsaufgaben GGA  
Stilleweg 2  
30655 Hannover  
eMail: [d.oezen@gga-hannover.de](mailto:d.oezen@gga-hannover.de)

### *Winfried Malorny, Peter Hardi*

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Baustoffe, Massivbau und  
Brandschutz  
Hopfengarten 20  
38102 Braunschweig  
eMail: [p.hardi@tu-bs.de](mailto:p.hardi@tu-bs.de)

### *Horst Geckeis*

Forschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Nukleare Entsorgung (INE)  
76021 Karlsruhe  
eMail: [geckeis@ine.fzk.de](mailto:geckeis@ine.fzk.de)

### *Janusz Janeczek*

Uniwersytet Śląskii  
Bankowa 12  
40-007 Katowice, Polen  
eMail: [janeczek@us.edu.pl](mailto:janeczek@us.edu.pl)

## Deskriptoren:

Endlager, Geochemie, Geosphäre, Hochaktiver Abfall, Langzeitsicherheit, Nuklidtransport, Porosität, Uran, Thorium

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ruprechtov</b> .....	<b>5</b>
2.1	Standortcharakterisierung .....	5
2.1.1	Einleitung .....	5
2.1.2	Bohrkampagnen.....	7
2.1.3	Geophysikalisches Logging .....	9
2.1.4	Probenbehandlung und $\gamma$ -Charakterisierung.....	13
2.2	Geologie .....	16
2.2.1	Regionalgeologischer Überblick.....	16
2.2.2	Uranvorkommen.....	22
2.2.3	Standortverhältnisse .....	22
2.3	Granit- / Basaltuntersuchungen .....	26
2.3.1	Einleitung .....	26
2.3.2	Klassifikation der Granite .....	27
2.3.3	Neovulkanite .....	28
2.3.4	Geochemische Gesteinsanalysen.....	28
2.3.5	Voraussichtliche Quelle der U -Mineralisation bei Ruprechtov .....	31
2.4	Sedimente .....	36
2.4.1	Bohrkernbeschreibung .....	36
2.4.2	Lithostratigraphische Beschreibung .....	39
2.4.3	Mineralogie.....	44
2.4.4	Sedimentologische Untersuchungen .....	64
2.4.5	Chemische Analysen .....	70
2.4.6	Sequentielle Extraktion .....	78
2.4.7	Radiometrische Charakterisierung.....	81
2.5	Grundwasser-Untersuchungen .....	88
2.5.1	Chemische Analysen .....	88
2.5.2	Kolloide .....	97
2.5.3	Radiometrische Untersuchungen.....	100



2.5.4	Porenwasser-Untersuchungen.....	101
2.6	Geochemische Modellierung.....	108
2.6.1	Einleitung .....	108
2.6.2	Datenbasis für Uran .....	108
2.6.3	Wechselwirkung Grundwasser Sediment .....	110
2.6.4	Speziation von Uran.....	112
2.6.5	Vergleich mit Uran-Konzentrationen anderer Arbeiten.....	114
2.7	Sorption / Desorption .....	116
2.7.1	Experimentelle Vorgehensweise .....	116
2.7.2	Charakterisierung der Sedimente .....	116
2.7.3	Ergebnisse .....	118
2.7.4	Modellierung und Interpretation .....	121
2.7.5	Schlußfolgerungen zur Sorption.....	125
2.8	Hydrogeologisches Modell .....	126
2.8.1	Literaturauswertung .....	126
2.8.2	Grundwassergeschwindigkeiten .....	128
2.8.3	Grundwasseralter .....	129
2.8.4	Zusammenfassung.....	137
2.9	Integration und Interpretation aller Ergebnisse .....	139
2.9.1	Einleitung .....	139
2.9.2	Das „Roll-Front Modell“ .....	142
2.9.3	Konzeptuelles Modell für den Urantransport.....	149
<b>3</b>	<b>Standort Heselbach .....</b>	<b>155</b>
3.1	Standortcharakterisierung .....	155
3.1.1	Einleitung .....	155
3.1.2	Bohrkampagnen.....	156
3.1.3	Probenbehandlung und $\gamma$ -Charakterisierung.....	159
3.2	Geologie.....	162
3.2.1	Einleitung .....	162
3.2.2	Standortverhältnisse .....	165
3.3	Sediment-Untersuchungen .....	167

3.3.1	Bohrkernbeschreibung .....	167
3.3.2	Chemische Analyse .....	169
3.3.3	Radiometrische Charakterisierung .....	174
3.4	Grundwasser-Untersuchungen .....	178
3.4.1	Einleitung .....	178
3.4.2	Chemische Analysen .....	178
3.4.3	Radiometrische Charakterisierung .....	182
3.5	Geochemische Modellrechnungen.....	185
3.6	Interpretation .....	187
3.6.1	Einleitung .....	187
3.6.2	Integration und Interpretation aller Ergebnisse .....	187
3.6.3	Konzeptionelles Modell für den Urantransport .....	189
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>191</b>
4.1	Ruprechtov .....	191
4.2	Heselbach .....	198
<b>5</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>201</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>227</b>
6.1	Gesamt-Probenübersicht; Stand: 31.08.2001 .....	228
6.2	Profile und Tabellen .....	248



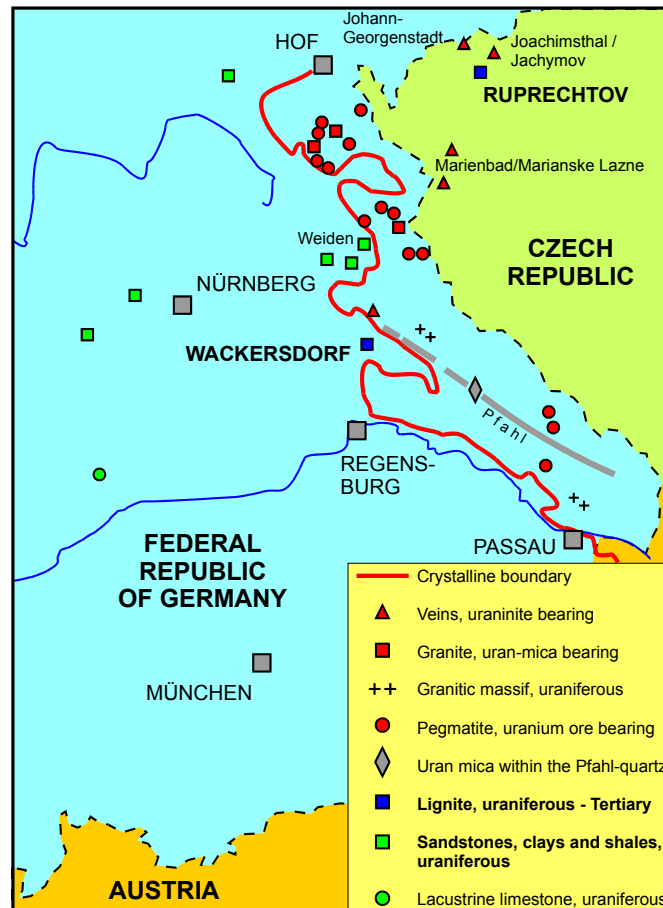
# 1 Einleitung

Weltweit geht man als Endlagerkonzept für hochradioaktive Abfälle von einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen aus. In vielen Fällen ist die Wirtsgesteinsformation von sandigen und tonigen Sedimenten überlagert bzw. ist Ton selbst als Wirtsgestein vorgesehen. Um zu überprüfen, ob ein Endlagerstandort geeignet ist, die Abfälle sicher über Zeiträume von bis zu Millionen Jahren von der Biosphäre abzuschließen, ist es notwendig, die Migrationseigenschaften der relevanten Radionuklide über entsprechend lange Zeiträume unter repräsentativen Bedingungen zu kennen. Die Modellansätze und Parameter, welche die Migration der Radionuklide beschreiben und Eingang in Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen finden, werden hauptsächlich aus Laborexperimenten gewonnen und in einigen Fällen an Feldexperimenten überprüft. Diese Experimente sind allerdings naturgemäß auf kurze Zeiträume und kurze Transportwege begrenzt.

Studien an natürlichen Analoga bieten demgegenüber die Möglichkeit, Informationen über das in geologischen Zeiträumen stattgefundene Migrationsverhalten von Radionukliden in einer natürlichen Umgebung zu erhalten und damit die verwendeten Rechenmodelle und Eingangsparameter zu überprüfen.

Aus diesem Grund wurden als Analogon für die Radionuklidmigration im Fernfeld eines Endlagers die beiden Standorte Ruprechtov in der tschechischen Republik und Heselbach in der Oberpfalz (Abb. 1.1) ausgewählt. Diese Standorte haben sich während eines vorlaufenden Auswahlverfahrens /BRA 98/ als „eignungshöflich“ erwiesen.

Im Rahmen des hier bearbeiteten Vorhabens soll das Migrationsverhalten der dort natürlich vorkommenden Radionuklide  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$  untersucht werden. Diese Radionuklide spielen in Langzeitsicherheitsstudien bezüglich der potentiellen jährlichen Strahlenexposition eine wichtige Rolle. An beiden Standorten besteht die Möglichkeit, den Radionuklidtransport in sandigen/tonigen Sedimenten unter ähnlichen Bedingungen, wie sie im Fernfeld eines Endlagers erwartet werden, zu untersuchen. Dabei können sich die Standorte insofern gut ergänzen, als sich die bereits beobachteten geochemischen Bedingungen deutlich voneinander unterscheiden.



**Abb. 1.1:** Übersichtskarte der Uranvorkommen in Südost-Deutschland und dem westlichen Teil der Tschechischen Republik /BRA 98/

### Standort Ruprechtov

Der Standort Ruprechtov befindet sich im Nordwest-Teil der Tschechischen Republik, etwa 8 km nördlich von Karlovy Vary, geologisch in einem tertiären Becken innerhalb eines Grabensystems, das sich im Vorland des Erzgebirges entwickelt hat.

Im Zuge früherer Untersuchungen während der Uranexploration in dieser Region sind insgesamt drei uranhaltige Schichten identifiziert worden: die basale Schicht setzt sich in erster Linie aus Kohle und kohligem Ton zusammen, die beiden überlagernden Schichten werden aus Tuff und Tuffit mit einem deutlichen Anteil an organischem Material aufgebaut. Der Ursprung für die Urananreicherungen wird im umliegenden und unterlagernden kaolinisierten Granit karbonischen Alters (280-345 Mio Jahre) mit hohen U-Gehalten gesehen. Nach bislang vorliegenden Erkenntnissen zur Genese herrschten günstige klimatische Bedingungen für die Auslaugung und die Migration von Uran während des Miozäns vor 5 bis 10 Mio Jahren, als die sogenannte vulkano-

detritische Formation mit Einschaltungen von Kohle und kohligem Ton abgelagert wurde.

In Rahmen von Standort-Voruntersuchungen wurden 1996 und 1997 zur Untersuchung der Eignung dieses Standorts drei erste Aufschlussbohrungen durchgeführt. Die für die Auswahl des Standortes getroffenen Annahmen konnten dabei im wesentlichen bestätigt und Uran-Anreicherungsprofile identifiziert werden. Aus radiometrischen Messungen an den Isotopen der Uran Zerfallsreihe wurden Gleichgewichts- bzw. Nicht-Gleichgewichtszustände identifiziert. Aus den Nichtgleichgewichtszuständen von  $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$  und  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  an Punkten höchster Urankonzentration wurde als erste Prognose ein Uran-Ablagerungsprozess postuliert, der innerhalb der letzten 100 000 Jahre stattgefunden haben muss, bzw. noch andauert. Weiterhin zeigte sich, dass vorhandene Uran-Peaks deutlich mit Kohlenstoffanreicherungen korrelieren.

Auf den bisherigen Befunden, wie den radioaktiven Nichtgleichgewichtszuständen setzt das in dem vorliegenden Bericht dargestellte Vorhaben auf. Es soll insbesondere untersucht werden, welche chemischen und physikalischen Prozesse am Standort Ruprechtov stattgefunden haben. Hierzu sind die Bohrkerne insbesondere in der Umgebung der Urananreicherungen im Detail mineralogisch, chemisch und radiometrisch zu untersuchen. Ebenso sollen grundwasserführende Horizonte identifiziert und ungestörte Grundwasserbedingungen untersucht werden. Unter Berücksichtigung aller Daten soll dann modellhaft die Barrierewirkung der tonhaltigen Tertiär-Schichten nachvollzogen werden. Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf deutsche Endlagerverhältnisse ist von Bedeutung, dass das am Standort Ruprechtov vorherrschende Tonmineral Kaolinit auch ein dominierendes Tonmineral in den tertiären Schichten Norddeutschlands darstellt. Die Ergebnisse zum Standort Ruprechtov werden in Kapitel 2 beschrieben

### **Standort Heselbach**

Die Braunkohlenlagerstätten bei Heselbach in der Region Wackersdorf liegen ca. 40 km nördlich von Regensburg, geologisch in der Bodenwöhrer Senke mit einer Füllung von Trias und Kreidesedimenten, in die braunkohleführende Tertiär-Rinnen eingeschnitten sind. Diese Rinnen, in denen sich je nach hydrographisch-morphologischer Situation Sande, Tone oder Torfe mit einer maximalen Mächtigkeit von 160 m abgelagert haben, bilden heute, nach Abschluss der Braunkohlegewinnung, eine große Seenplatte.

Uran ist in den Braunkohlen, Sanden und Tonen des Nordteils des Wackersdorfer Feldes enthalten. An den Beckenrändern, an denen keine Braunkohलगewinnung stattgefunden hat, streichen die Uranhorizonte zu Tage aus, sind aber heute als Folge von Rekultivierungsmaßnahmen überdeckt und schwer zu lokalisieren. Das Uran kann grundsätzlich postsedimentär aus älteren Gesteinsformationen wie Uran-führenden Flußspatgängen von Wölsendorf oder dem Keuper-Sandstein zugeführt worden und in tonigen Kohlen und Tonen vermutlich adsorptiv gebunden worden sein. Nach dem bisherigen Kenntnisstand wird seit dem Pliozän aufgrund einer Umbildung des hydrographischen Netzes nur noch vorhandenes Uran umgelagert.

Ziel der Arbeiten am Standort Heselbach ist es - bevor Explorationsbohrungen wie in Ruprechtov möglich sind - die durch die Rekultivierungsmaßnahmen überdeckten U-Anreicherungen zunächst neu zu lokalisieren. Es sollen Anreicherungs-horizonte und dort auftretende Anomalien identifiziert werden und die grundlegenden relevanten geochemischen Parameter an diesem Standort ermittelt werden. Bedingt durch den intensiven und bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts praktizierten Braunkohle-tagebau sowie ein ausgeprägtes hydraulisches Gefälle bietet dieser Standort möglicherweise auch Gelegenheit, jüngste geochemische Umlagerungs- bzw. Mobilisierungsprozesse zu untersuchen. Die Ergebnisse zum Standort Heselbach werden in Kapitel 3 beschrieben.

## 2 Ruprechtov

### 2.1 Standortcharakterisierung

#### 2.1.1 Einleitung

Das Projektgebiet Ruprechtov befindet sich im Nordwest-Teil der Tschechischen Republik, etwa 8 km nördlich Karlovy Vary (Karlsbad) und ca. 20 km südlich der Grenze zur Bundesrepublik Deutschland bei Oberwiesenthal (Abb. 2.1.1). Das Projektgebiet i. e. S. ist gekennzeichnet durch eine relativ ebene Fläche, deren Höhengniveau bei etwa 470 m NN liegt. Zur Ortschaft Ruprechtov (SSW) hin steigt das Gelände auf 520 m NN an, in Richtung N (Hroznetin) sinkt es leicht auf 450 m NN ab (Abb. 2.1.2).



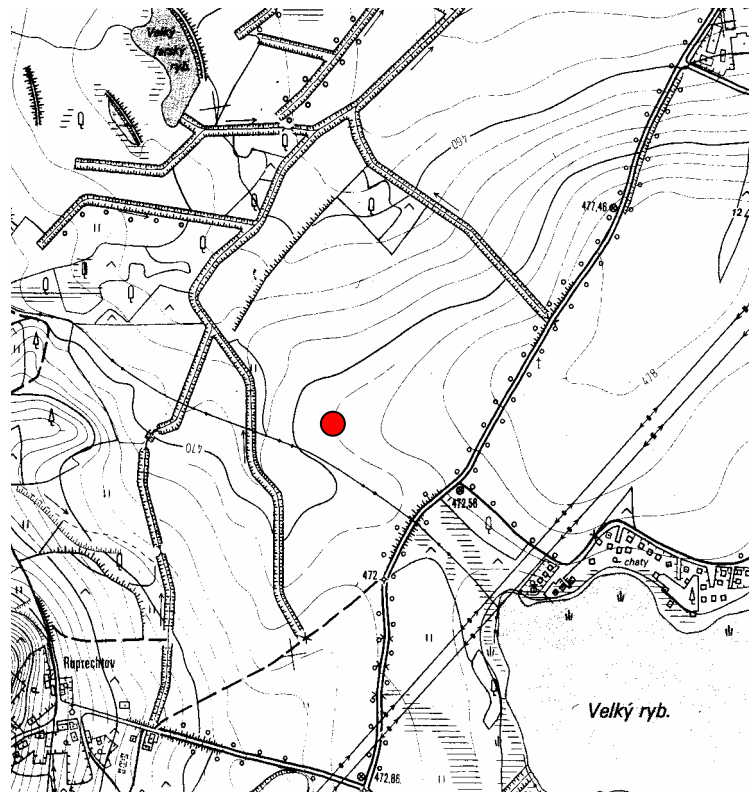
**Abb. 2.1.1:** Lage des Untersuchungsgebietes Ruprechtov



**Abb. 2.1.2:** Blick von N → S auf das Projektgebiet mit den beiden Bohrungen NA4 (rechts) und NA5 (links). Auf dem Hang der Basaltkuppe (hinten links) ist der Ort Ruprechtov gelegen



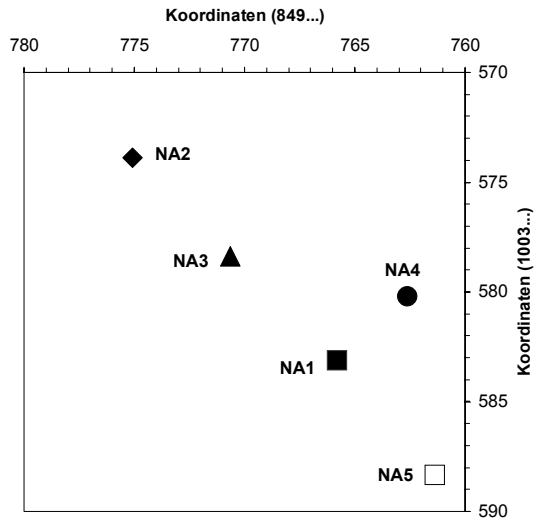
Nach Norden hin bildet das Erzgebirge eine Höhendifferenz von bis zu 1.000 m. Die genaue Lage sämtlicher bisheriger Bohrungen sind der Tab. 2.1.1 bzw. Abb. 2.1.4 zu entnehmen.



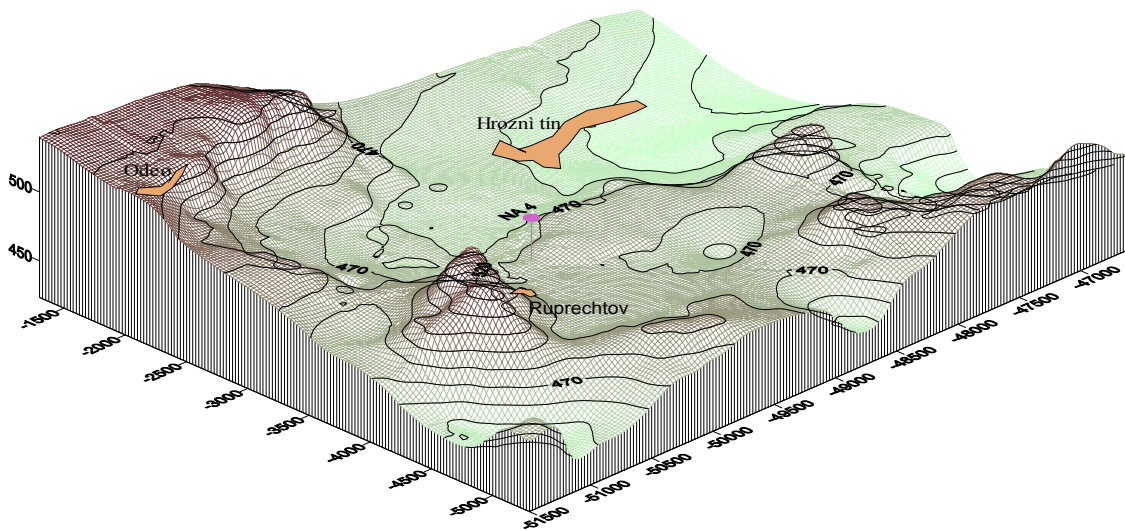
**Abb. 2.1.3:** Topographische Übersichtskarte des Projektgebietes mit Lage der Bohrungen NA1 - NA5 (Punkt); die Ortschaft Ruprechtov befindet sich am linken unteren Bildrand (Maßstab ca. 1:25.000)

**Tab. 2.1.1:** Koordinaten der Aufschlussbohrungen am Standort Ruprechtov

Bohrung	X	Y	Z	Z (ROK)
NA1	1.003.583,10	849.765,80	471,81	
NA2	1.003.573,90	849.775,10	471,65	
NA3	1.003.578,40	849.770,65	471,70	
NA4	1.003.580,22	849.762,64	471,70	472,41
NA5	1.003.588,36	849.761,38	471,72	472,72



**Abb. 2.1.4:** Lage der Aufschlussbohrungen NA1 - NA5 im Koordinatensystem der amtlichen topographischen Karte



**Abb. 2.1.5:** 3D-Visualisierung der Morphologie am Standort Ruprechtov (Blick SW→NE): das Projektgebiet selbst zeichnet sich durch flache Morphologie aus; im Bild unten tritt der Basaltschlot von Ruprechtov deutlich in Erscheinung; bei dem Anstieg am linken Bildrand handelt es sich um einen Ausläufer des Erzgebirges

## 2.1.2 Bohrkampagnen

Im Rahmen des diesem Bericht zugrunde liegenden Projektes wurde die Bohrung NA4 im Zeitraum 29.06.99 - 01.07.99 bis zu einer Endteufe von 38,40 m im

Trockenbohrverfahren abgeteuft, in der Zeit vom 12.07.99 - 15.07.99 auf einen Enddurchmesser von 195 mm aufgebohrt und zu einer Grundwassermessstelle ausgebaut. Mit Feststellung von zwei deutlichen Peaks in einer Teufenlage zwischen 34,00 und 36,50 m (34,50 - 35,00 m sowie 36,00 - 36,50) mittels natürlichem Gamma-Log und Identifizierung des basalen braunkohleführenden Horizontes in dieser Teufenlage mit Hilfe einer lithologischen Ansprache des Sediments ist der Zielhorizont der Bohrung NA4 erreicht gewesen. Um ein vollständiges Durchteufen des Braunkohle-Horizontes sicherzustellen, ist die Bohrung bis zum vermuteten Übergang von sekundärem zu primärem Kaolin auf 38,40 m weitergeteuft worden.

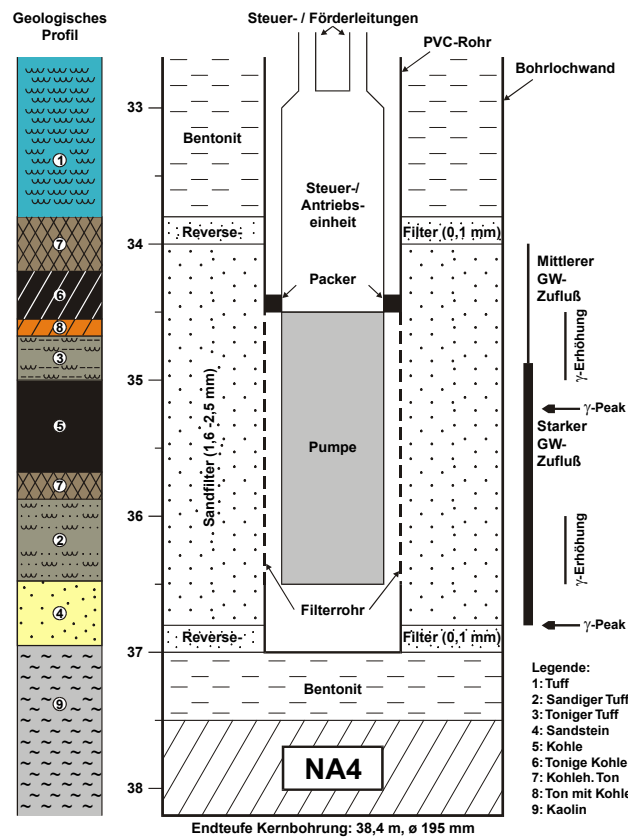


**Abb. 2.1.6:** Bohrarbeiten zur Bohrung NA4

Die oberen 33 Meter des Bohrkerns wurden mit Hilfe eines Einfachkernrohres gewonnen, an der Erdoberfläche sofort in Plastikfolie verpackt und in konventionellen Holzkernkisten transportiert und gelagert (Abb. 2.1.6). Von 33,00 m bis zur Endteufe erfolgte die Kerngewinnung mittels eines Doppelkernrohres (innerer PVC-Liner), so dass das entsprechende Sediment bereits in seiner ursprünglichen Teufe unter weitestgehendem Sauerstoffabschluss versiegelt worden ist. Die Stirnflächen der PVC-Liner wurden unmittelbar nach deren Gewinnung an der Erdoberfläche mit flüssigem Wachs abgedichtet. Der Ausbau zu einer Grundwassermessstelle erfolgte auf der Grundlage eines mittels Temperatur- / Resistivity-Logs festgestellten Wasserzuflusses

zwischen 34,50 und 36,00 m. Einzelheiten des Ausbaus mit Angaben zu technischen Details sind in Abb. 2.1.7 zusammengefasst.

Die nur wenige Meter entfernte Bohrung NA5 ist in der zweiten Julihälfte 1999 bis zu einer Endteufe von 37,50 m abgeteuft worden, wobei die Kerngewinnung analog der Vorgehensweise bei NA4 erfolgte. Im Gegensatz zur Bohrung NA4 ist die Bohrung NA5 nach Kerngewinnung bis zu einer Teufe von 21,50 m mit Bentonit verfüllt worden, um einen auch in der Bohrung NA4 festgestellten - allerdings deutlich geringeren - Zufluss in einer Teufe von etwa 19,50 m zu erfassen.



**Abb. 2.1.7:** Ausbau der Bohrung NA4 zu einer Grundwassermessstelle mit geologischem Profil sowie Angaben zum Wasserzufluss und zu Gamma-Anomalien auf der Basis geophysikalischer Bohrlochvermessung

### 2.1.3 Geophysikalisches Logging

Während und nach Abschluss der Bohrarbeiten sind geophysikalische Vermessungen der Bohrungen vorgenommen worden, um

- die genaue Lage von Wasserzuflüssen festzustellen,
- alle Bereiche mit erhöhter natürlicher Gammastrahlung zu ermitteln,
- ein vollständiges geologisches Übersichtsprofil zu erstellen und
- die Lage der Filterkiesschüttungen sowie die Wirksamkeit der Bentonit-Abdichtung zu überprüfen.

Dabei kamen die in Tab. 2.1.2 zusammengestellten Verfahren zum Einsatz.

**Tab. 2.1.2:** Übersicht der in NA4 und NA5 eingesetzten geophysikalischen Bohrloch-Verfahren bzw. daraus abgeleitete Größen (Angaben zur „Spalte“ beziehen sich auf die graphischen Log-Darstellungen in Abb. 2.1.8 und Abb. 2.1.9)

Bezeichnung	Kürzel	Einheit	Spalte	Verfahren
Electrical Resistivity	RAP010	Ohmm	8	Spezifischer elektrischer Widerstand der Schichten (Gesteine einschl. Wassergehalt)
Spontaneous Potential	SP	mV	8	Eigenpotentialmessung
Magnetic Log	MS	V	6, 8	Magnetische Suszeptibilität
Gamma Ray Log	GR	$\mu\text{R/h}$	5	Natürliche Gammastrahlung
Gamma-Gamma Log	XGGDL	Imp/s	6	Sedimentdichte (Mineralsubstanz + Poren)
Neutron-Neutron Log	XNN	Imp/s	5	Wassergehalt, Gesamtporosität
Caliper Log	DIA	mm	7	Bohrlochdurchmesser
Temperature Log	TM	$^{\circ}\text{C}$	4	Temperatur des Bohrloch-Fluids
Fluid Resistivity Log	RM	Ohmm	4	Elektrischer Widerstand des Bohrloch-Fluids
Photometry Log	FM	mV	4	Optische Transparenz des Bohrloch-Fluids
Bulk Density	DENA	$\text{g/cm}^3$	7	Sedimentdichte (Mineralsubstanz + Poren)
Lithological Profile	LITOL	-	3	Bohrkernbeschreibung
Lithological Profile	LITOLG	-	2	Bohrkernbeschreibung auf Log-Basis

Die Ergebnisse der nach Aufbohren auf den Enddurchmesser erhaltenen abschließenden Logs sind in Abb. 2.1.8 und Abb. 2.1.9 dargestellt. Bereits anhand dieser Darstellungen wird die besondere Situation der Bohrung NA4 deutlich, die nun einerseits eine zunächst nicht identifizierte und unerwartete (s. o.) Aktivitätszunahme unterhalb des Braunkohlenhorizontes sowie eine im Vergleich zu Bohrung NA5 deutlich niedrigere Aktivität im Braunkohlenhorizont selbst aufweist.



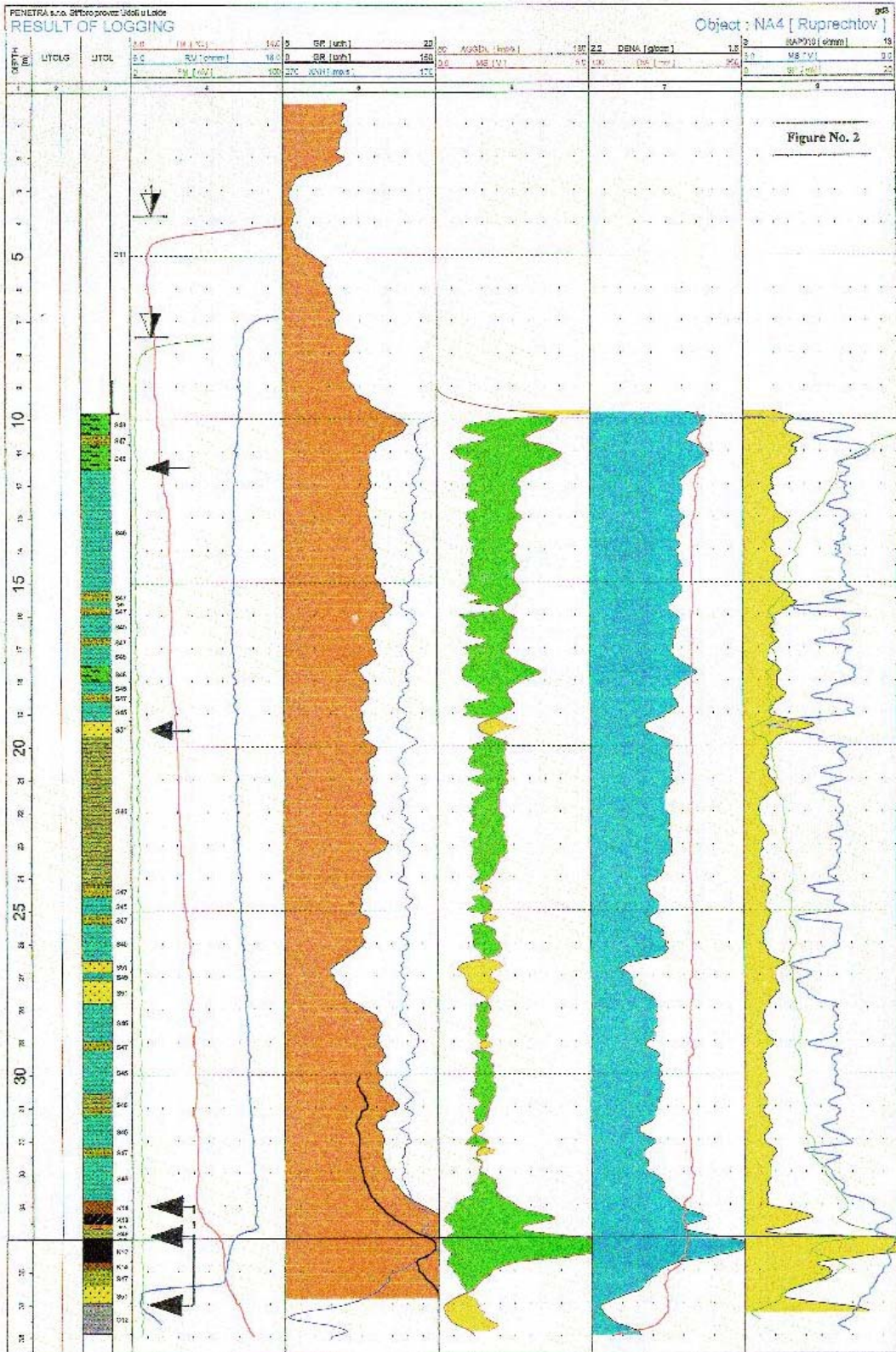
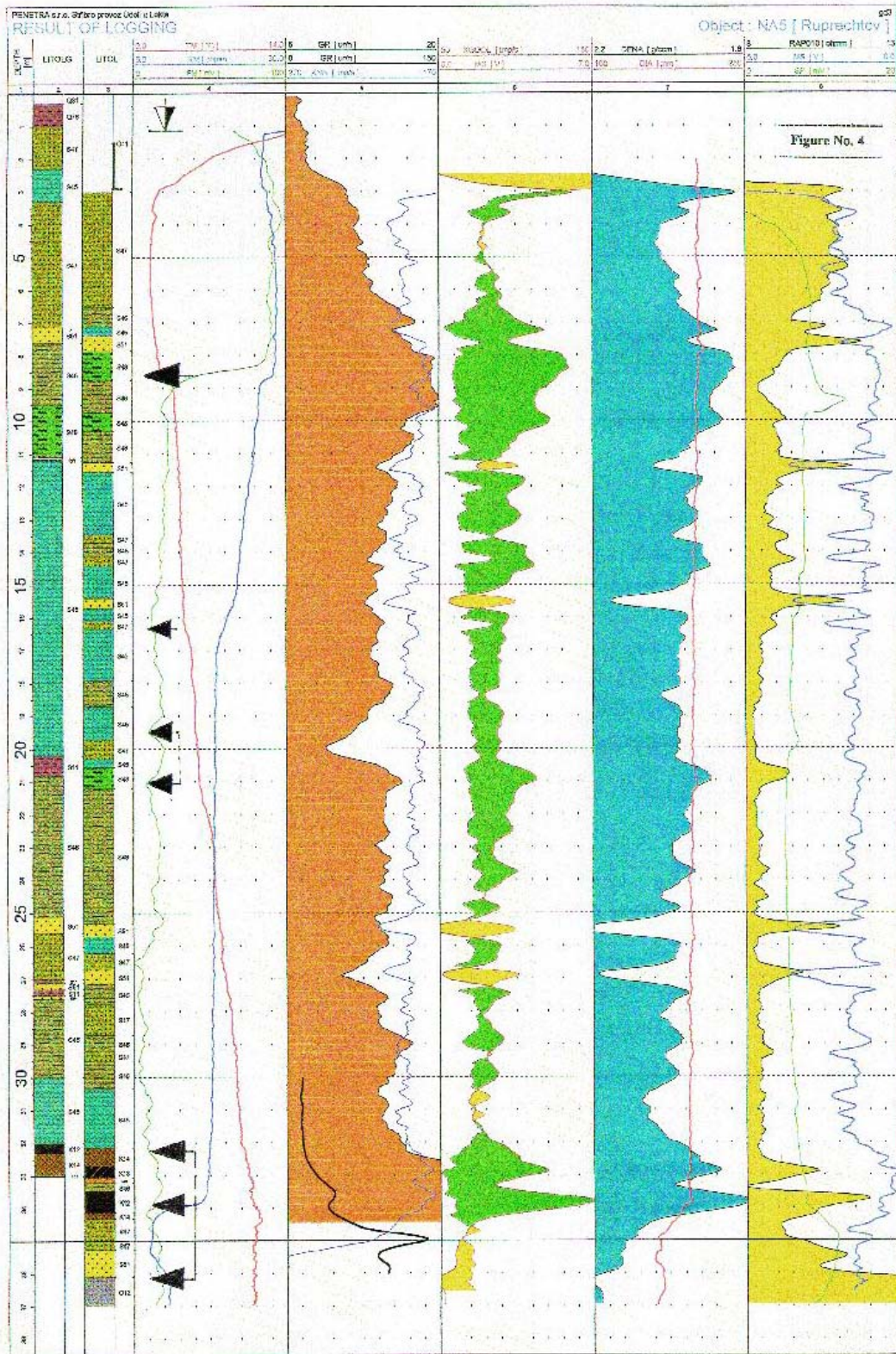


Abb. 2.1.8: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung in Bohrung NA4





**Abb. 2.1.9:** Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung in Bohrung NA5

In NA5 zeichnet sich dagegen der aus den vorlaufenden Bohrungen NA1 - NA3 bekannte Aktivitätspeak in ca. 35 m Teufe /BRA 98/ deutlich ab. Die maximal

ermittelten Radioaktivitätswerte in Bohrung NA4 liegen bei 35,2 m (29,5  $\mu\text{R/h}$ ) bzw. 36,8 m (30,5  $\mu\text{R/h}$ ), der tiefere Bereich konnte mit diesem Log nicht mehr erreicht werden.

#### 2.1.4 Probenbehandlung und $\gamma$ -Charakterisierung

Das Hauptziel einer detaillierten Gamma-Charakterisierung ist es gewesen, die genaue Lage von Horizonten mit deutlichen Urananreicherungen im Bohrkern NA4 zu identifizieren, nicht aber, absolute Konzentrationen zu ermitteln. Aufgrund der Redoxempfindlichkeit der Sedimente sollte die für die weitere Probenauswahl entscheidende Methode zerstörungsfrei sein und einen weitgehenden Sauerstoffabschluss gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen, in PVC-Rohren eingeschlossenen und mit Paraffin abgedichteten Kernabschnitte mit Hilfe eines empfindlichen  $\gamma$ -Detektors (Germanium, Fa. Canberra) radiometrisch vermessen.

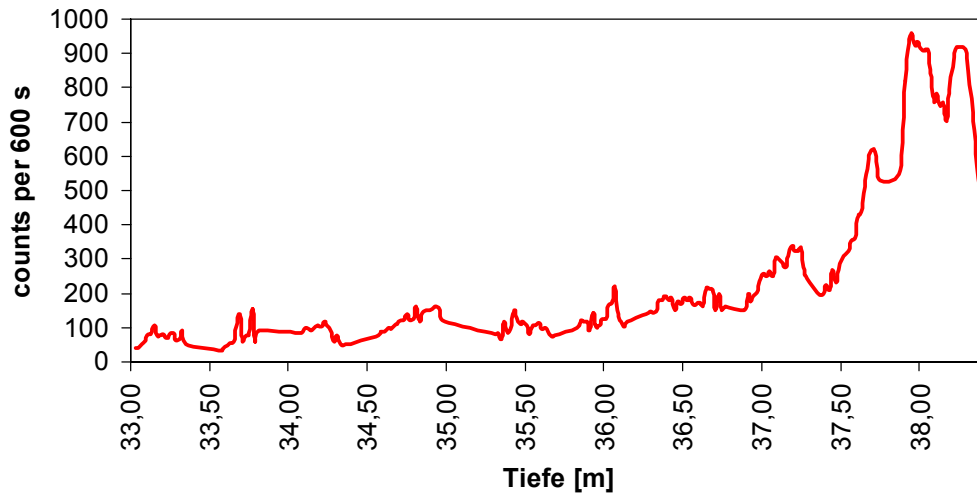
Vor dem Detektor wurde ein Kollimator mit 5 cm Durchmesser eingesetzt. Untersucht wurde das gesamte Teilstück des Bohrkerns zwischen 33,0 und 38,4 m. Die Messung der  $\gamma$ -Emission erfolgte senkrecht zur Bohrkernachse. Die Messpunkte wurden jeweils im Abstand von 2 cm gewählt. Die Messzeit pro Messpunkt betrug 10 Minuten. Der Nachweis erfolgte anhand der  $\gamma$ -Emissionslinie des  $^{214}\text{Bi}$  bei 609-keV, die mit hoher Empfindlichkeit nachweisbar war. Das  $^{214}\text{Bi}$  wurde gewählt, da es ein Nuklid der Uranzerfallsreihe ist und keine geeigneten, entsprechend intensiven  $\gamma$ -Linien der Isotope  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$  existieren.

Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abb. 2.1.10 dargestellt. Aus dem gewonnenen Spektrum ist bereits an dieser Stelle als neues und zusätzliches Ergebnis abzuleiten, dass sich die in der Bohrung NA4 bedeutendsten Urananreicherungen *unterhalb* des Braunkohle-Zielhorizontes in 37,0 - 38,4 m Tiefe befinden, also schon in einem stark kaolinisiertem Bereich, der aufgrund der Sondenlänge und daraus resultierender Tiefenbegrenzung im Zuge der geophysikalischen Bohrlochvermessung zunächst nicht und nur ansatzweise detektiert worden ist (s. o).

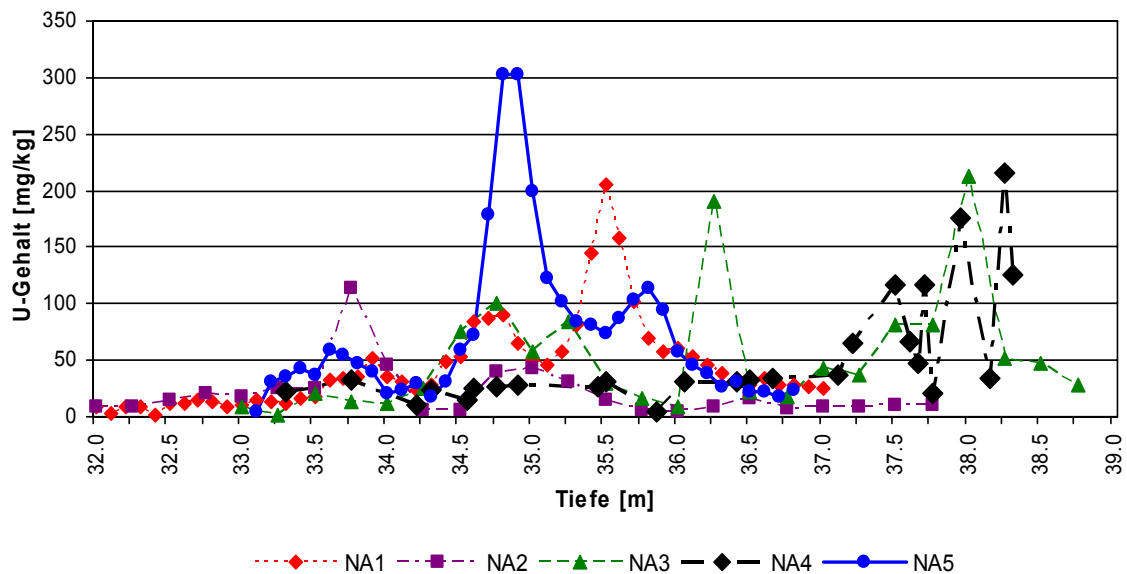
Abb. 2.1.11 zeigt eine Zusammenstellung der in allen bisherigen Bohrungen (NA1 - NA5) gewonnenen Informationen zum Urangehalt der Sedimente. Auch dieses Bild verdeutlicht die unerwartete Situation in Bohrung NA4, die im Bereich des



Braunkohlehorizontes nur eine vergleichsweise geringe Aktivitätserhöhung aufweist und im Liegenden (Übergang zum Kaolin) eine starke Differenzierung zeigt.



**Abb. 2.1.10:** Gamma-Scan des Bohrkernabschnitts von 33,00 - 38,40 m der Bohrung NA4 zur Identifizierung und Festlegung geeigneter Einzelproben für weiterführende Detailuntersuchungen



**Abb. 2.1.11:** Bedeutende Uran-Akkumulationen in den Bohrungen NA1 - NA5

Die aus einer Teufe zwischen 33,0 und 38,4 m stammenden Sedimente der Bohrung NA4 wurden im Rahmen des Gesamtvorhabens mit einem - gegenüber den hangenden Schichten - höheren Detaillierungsgrad untersucht. In das gesamte Untersuchungsprogramm sind neben GRS folgende Institutionen eingebunden gewesen: TU-Braunschweig (TU-BS); Forschungszentrum Jülich (FZJ); British Geological Survey

(BGS), Ecole de Mines, Nantes - F (EMN); Nuclear Research Institute, Rez - CZ (NRI); University of Silesia, Katowice - PL (US), University of Technology, Krakow - PL (AGH) sowie Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO). Eine detaillierte Aufgabenverteilung ist Tab. 2.1.3 zu entnehmen.

Auf der Basis des in Abb. 2.1.10 dargestellten  $\gamma$ -Spektrums des Bohrkerns wurden Proben für weitergehende Detailuntersuchungen ausgewählt. Daran anschließend wurden die Teilproben für die einzelnen Institutionen aus den jeweils ca. 0,5 m langen Kernabschnitten durch Zersägen unter Stickstoffatmosphäre erhalten. Bei den für mikrobielle Untersuchungen vorgesehenen Proben wurden die Geräte vorher mit Alkohol desinfiziert. Die Kernsegmente mit etwa 3 - 7 cm Länge, bzw. etwas größeren Proben für die bakteriologische Untersuchungen bei EMN, wurden sofort nach dem Zersägen wieder mit Paraffin versiegelt.

**Tab. 2.1.3:** Programm für Detailuntersuchungen an Kernmaterial der Bohrung NA 4; Einzelproben aus der sequentiellen Extraktion wurden auch hinsichtlich ihrer Aktivitäten untersucht

Untersuchung	Institution	Untersuchung	Institution
Röntgendiffraktometrie	GRS	Porenwasserextraktion	BGS
Mikroskopie	US	Radiometrie (Porenwasser)	FZJ
Mikrosonde	US	Chemie (Porenwasser)	BGS
ASME	US	Chemie (Grundwasser)	GRS, NRI
Sequentielle Extraktion	GRS	Natürliche Isotope (Grundwasser)	AGH
Autoradiographie	FZJ	Chemie (Sediment)	GRS, TU-BS
BET-Oberfläche	FZJ	Radiometrie (Sediment)	FZJ
Hydraulische Kennwerte	TU-BS	Sorptionsexperimente	EMN
Edelgase (Grundwasser)	LDEO		

Zur Qualitätssicherung bei den experimentellen Methoden wurden an ausgewählten Proben chemische, radiometrische und mineralogische Messungen sowohl von GRS als auch von NRI bzw. beauftragten Institutionen als „Ringversuch“ durchgeführt. Eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen und Analysen ist im Anhang erfolgt.

## 2.2 Geologie

### 2.2.1 Regionalgeologischer Überblick

Geologisch gesehen liegt die Lokation Ruprechtov im NE-Teil des Sokolov-Beckens. Dieses Becken stellt ein Teilbecken des Ohre-Grabens dar (Abb. 2.2.1), der sich unterhalb des Erzgebirges entwickelt hat, als Senkungsgraben (Rift Valley) interpretiert werden kann und eine vergleichsweise junge geologische Struktureinheit darstellt (Abb. 2.2.2).

Die stratigraphische Abfolge der unterschiedlichen Sedimentations- und Vulkanismus-Phasen ist ausführlich in /SVO 66/ beschrieben und in Tab. 2.2.1 zusammengefasst. Den Untergrund des Sokolov-Beckens bilden oberkarbonische Plutonite; die Platznahme der Granite vom Karlovy Vary- und Horsky-Typ fand im Zusammenhang mit der variszischen Orogenese (ca. Devon - Perm) statt.

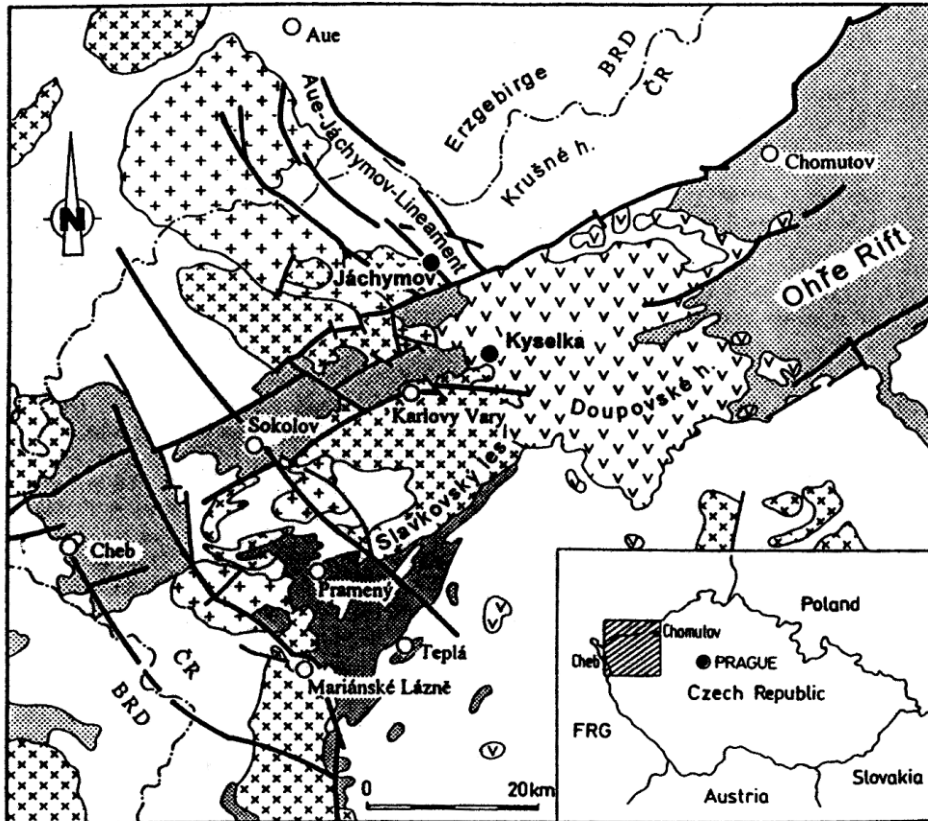
Eine Übersicht über die lithologische Ausbildung der Sedimente im Sokolov-Becken ist in Tab. 2.2.2 zusammengefasst. Eine detaillierte Darstellung der geologischen Entwicklung des Ohre-Grabens und des Sokolov-Beckens findet sich in /SCH 00/ und /BÖH 00/.

Die moderne Stratigraphie unterscheidet im Sokolov-Becken zwischen folgenden sedimentären Einheiten (vom Hangenden zum Liegenden):

- Cypris-Formation
- Vulkano-deditische Formation mit Kohleflözen
- Staré-Sedlo-Formation

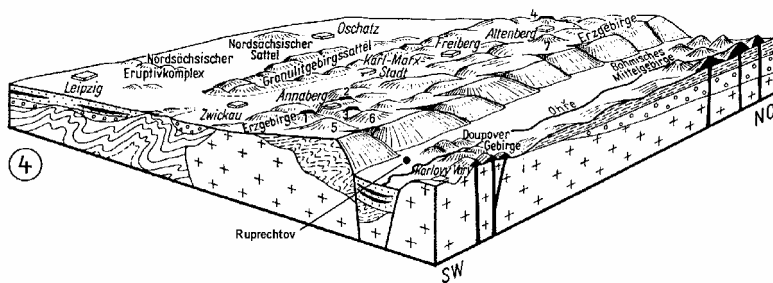
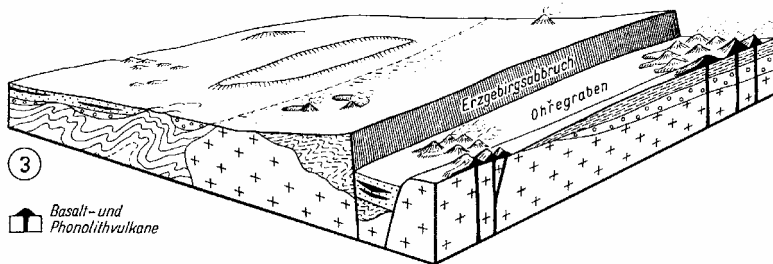
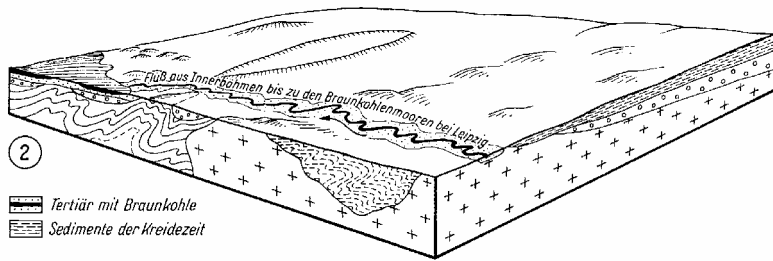
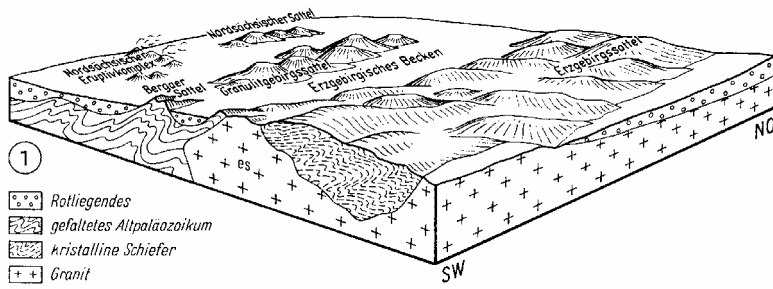
Eine standortspezifische Beschreibung dieser Formationen sowie der in der Literatur beschriebenen Uranogenese in der Standortumgebung ist in /BRA 98/ erfolgt.

Eine Übersicht über die spezifische geologische Abfolge im Projektgebiet Ruprechtov (Abb. 2.2.3) ist in Tab. 2.2.3 wiedergegeben.



**Abb. 2.2.1:** Geologische Übersichtskarte des Ohre-Grabens und benachbarter Regionen (nach /MÖL 98/)

Die geologische Struktur des Ohre-Grabens und speziell des Sokolov-Beckens wird auch durch ein Satellitenphoto der Region (Abb. 2.2.4) verdeutlicht: Neben der scharfen Begrenzung des Grabens ist insbesondere südlich des Projektgebietes das Ausstreichen granitischer Gesteine anhand dunkler Farben zu erkennen. Die Aktivität des den gesamten rechten Bildrand einnehmenden Doupovské hory Stratovulkans hat zu einer großflächigen Füllung des Sokolov-Beckens mit vulkanogenen Ablagerungen geführt.



- ① Das Varistische Gebirge im Oberkarbon-Rotliegenden
  - ② Einebnung in Kreidezeit und Tertiär
  - ③ Hebung des Erzgebirges und Einsenkung des Ohregrabens im Jungtertiär mit Basaltvulkanismus
  - ④ die Zertalung der gehobenen Erzgebirgsscholle vom Jungtertiär bis zur Gegenwart
- 1 Scheibenberg
  - 2 Pöhlberg
  - 3 Bärenstein
  - 4 Geisingberg
  - 5 Fichtelberg
  - 6 Keilberg (Klinovec)
  - 7 Kahleberg

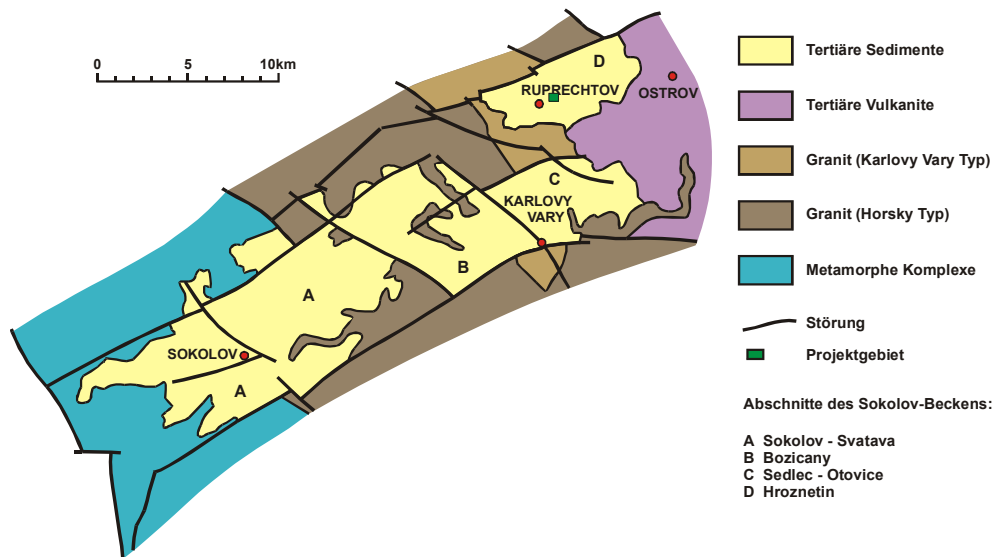
**Abb. 2.2.2:** Die Entstehung des Erzgebirges und seines in der Tschechischen Republik gelegenen südlichen Vorlandes mit dem Ohre-Graben

**Tab. 2.2.1:** Stratigraphische Abfolge der Sedimentations- und Vulkanismus-Phasen  
(nach /SVO 66/)

SYSTEM		SERIE	STUFE	SEDIMENTATION	VULKANISMUS	TEKTONIK	SONST.	
Quartär		Holo-zän						
		Pleisto-zän			3. Vulk. Phase	Alp.-karp. Orogenese	Nur Raum Cheb	
Tertiär	Neogen	Pliozän		3. Sedimentations-phase	(3. Vulk. Phase)  Zw. Miozän und Pliozän:	Pliozän: Beginn Hauptbewegung Erzgebirgsrand- und Ohre-Störungen Alp.-karp. Auffaltung	Nur Raum Cheb / Südböhmen	
		Miozän	Samartium			2. Vulk. Phase		
			Tortonium	Unt. Tortonium: Ende 2. Sed.-Phase			Unt. Tortonium bis Pliozän: Böhm. Massiv → Peneplain	
			Helvetium	Jüngere miozäne Sedimentation → Cypris-Tonstein Basis: Konglomerate, Sandsteine				Eindringen von Meerwasser
			Burdigalium	Kohlebildung (Hauptflöz) s/t Süßwasser-sedimente				Ende Vulkanismus (Burdigalium) → Beckenabsinken
	Aquitanium	1. Vulk. Phase = Basis 2. Sedimentations-phase	U. Aquitanium Beginn alkal. Vulkanismus, 1. Vulk. Phase	Oligozän / Miozän: Böhm. Massiv → Peneplain	Becken-entstehung im Vorland des Erzgebirges			
	Paläogen	Oligozän	Oberes Oligozän.: Sedimentations- unterbrechung → HIATUS 1. Sedimentations-phase Basale Klastika der Stare-Sedlo- Formation					
		Eozän	Älteste Sedimente der 1. Sedimentationsphase ?					
		Paläozän						
	Kreide	Obere Kreide	Maastrichtium					Mesozoikum bis Paläogen: Kaol. Verwitterung des krist. Basement
Campanium								
Santonium						Unt. Santonium: Böhm. Massiv → Festland		
Coniacium								
Turonium								
Cenomanium								
Untere Kreide								

**Tab. 2.2.2: Lithologische Übersicht der Sedimenttausbildung im Sokolov-Becken (nach /SVO 66/)**

Phasen		Formation	Lithologie
2. Sedimentations - Phase (~ Miozän)	1. Vulkanische Phase	Cypris Tonstein	Pelite Lokale Fazies: grobkörniger quarzoser Sand, Kies, Kies-Sand mit tonigen Zwischenlagen Bläulich-graue kaolinitische Tone (z. T. glimmer- / gipsführend) Dunkelbrauner kohligter Ton (unterer Teil)
		Hauptflöz-Formation - Oberer Teil -	- Keine Ton-Zwischenlagen - dünne Tuffitlagen bzw. tuffiger Ton - (korreliert mit Flöz Antonin)
		Vulkanogene Serie - Oberer Teil -	↑ Terrstrische - ↓ Subaquatische Sedimente - Biotitisch-augitische Pyroklastika (Tuffe) mit Beimengungen organischer und grobklastischer Sedimente
		Hauptflöz-Formation - Unterer Teil -	- (korreliert mit Flöz Anezka)
		Vulkanogene Serie - Unterer Teil -	- Tone, Sande, Sandsteine - geringmächtige Kohleflöze, kohlige Tone
			Fluviatile und lacustrine klastische Sedimente
			← → Vulkanogene Ablagerungen - Tuffite, Tuffit-Agglomerate - Tone mit Beimengungen von Pyroklastika, tuffige Tone - Tuffe, tuffige Agglomerate
	Flöz-Josef-Formation	- Oberer Flözhorizont - Tonlage - Unterer Flözhorizont (schwärzl.-bräunl. mit Asche und Fe-Sulfiden)	
<b>H I A T U S</b>			
1. Sed.-Phase (~ Oligozän)		Stare-Sedlo-Formation	- Schwach sortierte kaolinitische Sande und Tone - fein- bis grobkörnige Sandsteine (mit kaol. Zement, sekundär silifiziert) - Kies, Sand, Konglomerate
		Eluviales Basement-Material	
<b>Liegendes (Granit, kaolinisierter Granit)</b>			

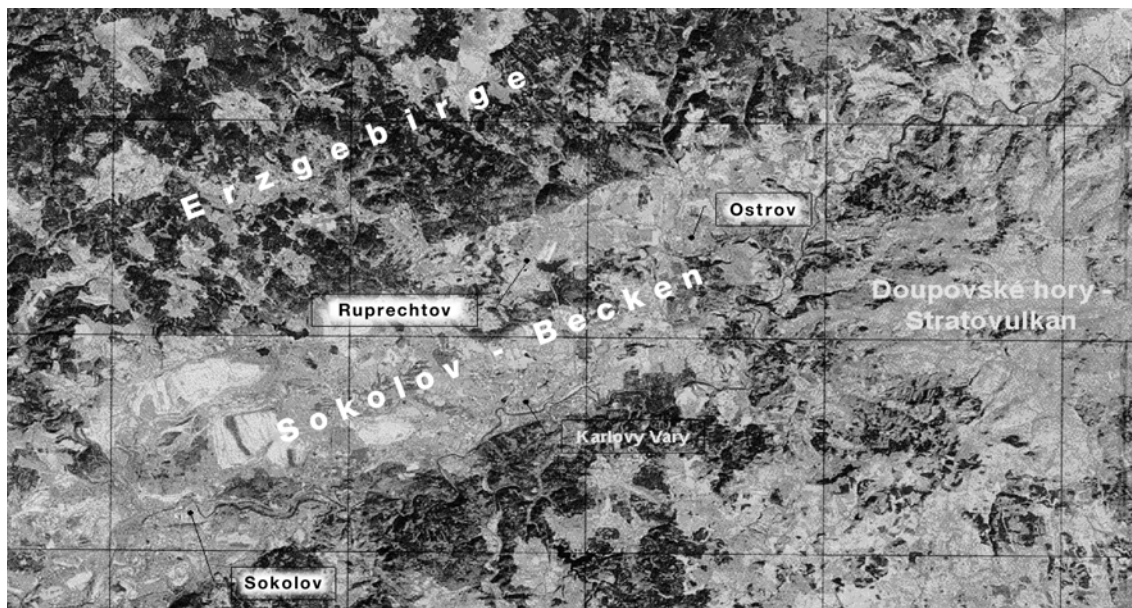


**Abb. 2.2.3:** Vereinfachte geologische Übersichtskarte des Sokolov-Beckens und seiner Teilbecken (nach Unterlagen des NRI)

**Tab. 2.2.3:** Übersicht über die geologische Abfolge im Hroznetin-Teil des Sokolov-Beckens (nach /BRA 98/)

Geologische Formation	Generelle Gesteinsausbildung	Besonderheiten im Raum Ruprechtov	Alter (Ma)
Quartär	Humoser Ackerboden, Lehm		Quartär (ca. 0 - 2)
Cypris-Formation	kaolinitischer Ton mit sandigen Zwischenlagen	<i>nicht sedimentiert</i>	
Vulkano-deditische Formation	Pyroklastika (Tuffe, vulkanische Agglomerate) subaquatische vulkanische Sedimente Braunkohlenflöze	tonige Lignite, keine ausgeprägten Kohleflöze	Miozän (ca. 7 - 26)
Staré-Sedlo-Formation	fein- bis grobkörniger Sandstein mit kaolinitischem Bindemittel kaolinitischer Ton	<i>nicht vollständig entwickelt</i> sekundärer Kaolin	Oberes Eozän bis Unteres Oligozän (ca. 45 - 30)
Liegendes (undifferenziert)	Granit (am Übergang kaolinisiert) Typ „Horský“ Typ „Karlovy Vary“		Karbon (ca. 280 - 345)





**Abb. 2.2.4:** Satellitenbildkarte des Sokolov-Beckens mit Lage des Projektgebietes

### 2.2.2 Uranvorkommen

Ausgangspunkt für die mit dem tschechischen NRI gemeinsam durchgeführten Untersuchungen zur Uranmigration sind aus der Literatur bekannte Urananreicherungen im Raum Hájek und Ruprechtov gewesen, deren Ursprung im umgebenden und unterlagernden Granit gesehen wird. Bisherige Arbeiten gehen davon aus, dass während des Miozäns (Ablagerung der vulkanodeditischen Formation mit Einschaltungen von Kohle und kohligem Ton) günstige klimatische Bedingungen für die Auslaugung und Migration von Uran herrschten. Danach könnte der Zerfall von organischem Material das Wasser mit Huminsäuren angereichert haben, die das Uran aus dem verwitterten Granit herauslösen konnten. In der Folge hätte Uran dann in Form von Sulphaten, Huminkomplexen und Kolloiden migrieren und vorzugsweise in Lagen mit höherem Gehalt an organischen Bestandteilen abgelagert werden können /BRA 98/.

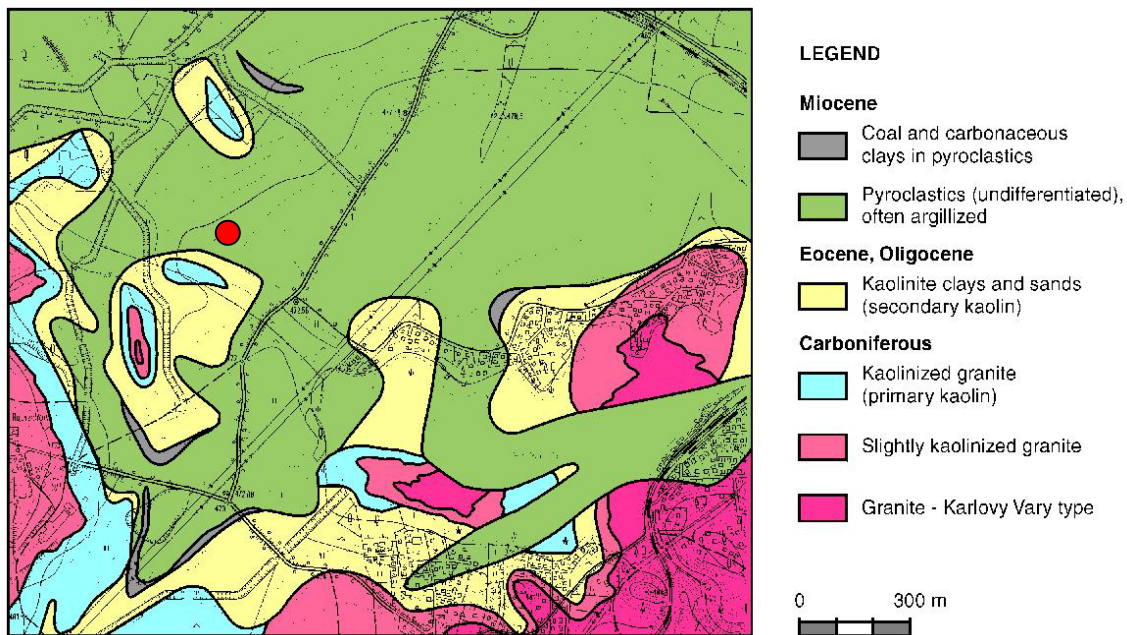
### 2.2.3 Standortverhältnisse

In der Zeit intensiver Uranexploration (ca. 1955-1965) sind im Raum Ruprechtov insgesamt drei uranhaltige Schichten identifiziert worden, als deren bedeutendste die

„basale Schicht“ beschrieben worden ist, die sich in erster Linie aus Kohle und kohligem Ton zusammensetzt.

Die Erkundung und der Nachweis dieses basalen Kohlehorizontes sowie seiner Urananreicherungen sind deshalb auch Gegenstand der ersten drei im Rahmen des Vorhabens 02 E 8926 6 /BRA 98/ abgeteufte Explorationsbohrungen (NA1 - NA3) und primäres Untersuchungsobjekt des in vorliegendem Bericht dargestellten FuE-Vorhabens gewesen (Bohrungen NA4, GRS und NA5, NRI).

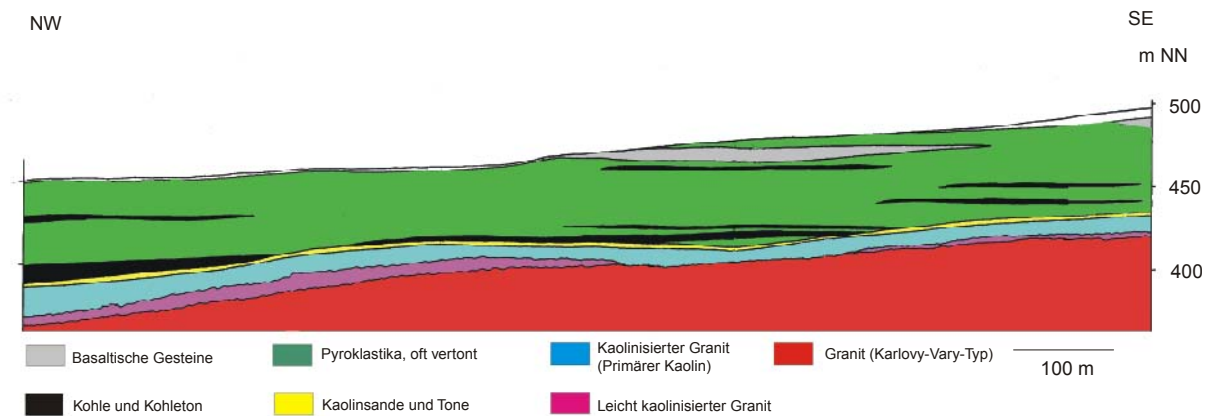
Eine geologische Detaildarstellung des unmittelbaren Projektgebietes (Abb. 2.2.5) bestätigt, dass in nur wenigen 100 m Entfernung südlich der bisherigen Bohransatzpunkte Granit des Karlovy Vary - Typs ausstreicht, der als Uranquelle in Frage kommt.



**Abb. 2.2.5:** Geologische Detailkarte des Projektgebietes mit Lage der Bohrungen (Punkt)

Die generellen Lagerungsverhältnisse, wie sie am Standort Hajek (ehemaliger Uran- und Kaolinabbau), ca. 2,5 km östlich des Projektgebietes beschrieben worden und prinzipiell auch für das Projektgebiet Ruprechtov anzunehmen sind, vermittelt das Querprofil der Abb. 2.2.6. Der basale Granit vom Karlovy Vary - Typ (rot) ist an seiner Oberfläche bis zu mehreren 10er m Mächtigkeit kaolinisiert („Primärer Kaolin“ - hellblau) und wird von tertiären Sedimenten überlagert: zuunterst finden sich

stellenweise die basalen Sedimente (Kaolinsande und Tone) der Stare-Sedlo-Formation („Sekundärer Kaolin“ - gelb); darüber folgt die „Vulkanodedritische Formation“ mit meist vertonten Pyroklastika (grün) und Kohle- bzw. Kohleton-Horizonten (schwarz). Lokal werden auch einzelne basaltische Ergüsse (grau) angetroffen. Eine quartäre Überdeckung (weiß) ist nur geringmächtig. Ob und inwieweit im Projektgebiet durchgehende Horizonte verbreitet sind, die eine Grundwasserführung aufweisen und einen Urantransport ermöglichen, ist z. Z. noch nicht bekannt.



**Abb. 2.2.6:** Schematisches geologisches Querprofil durch den ehemaligen Uran- und Kaolinabbau Hajek, ca. 2,5 km östlich des Projektgebietes

Für die Frage der Uranquelle und möglicher Transportwege ist neben den oben beschriebenen generellen Lagerungsverhältnissen außerdem von Interesse, ob hydraulisch wirksame Kluft-/Störungszonen existieren, die ggf. lokal auch einen vertikalen Urantransport bewirken können. Eine auf Unterlagen aus der Kaolinprospektion basierende tektonische Karte des engeren Projektgebietes (Abb. 2.2.7) zeigt in unmittelbarer Nähe der Bohrungen WNW - ESE bis NW - SE verlaufende Strukturen und eine angenommene Zone erhöhter Permeabilität. Ob und inwieweit diese für den Bereich des unterlagernden Granits getroffene Aussage auch für die überlagernden tertiären Sedimente Gültigkeit besitzt, ist noch nicht geklärt.

Eine photogeologische Linearanalyse des Gebietes, mit deren Hilfe die auf Luftbildern erkennbaren, oft tiefreichenden Strukturen (z. B. Störungen, Kluftzonen) darstellt werden, ist am Standort Ruprechtov (Abb. 2.2.8) nicht sehr aussagekräftig, spiegelt die Elemente der tektonischen Karte nur ansatzweise wider und vermag insbesondere nicht die Zone erhöhter Permeabilität zu bestätigen. Von daher gibt es bzgl. der Entwicklung von Modellvorstellungen zum Wassertransport innerhalb der tertiären

Sedimente kein Indiz, das beispielsweise auf die vertikale Wirksamkeit einer Kluft- bzw. Störungszone hinweist. Die entsprechenden Zonen in der tektonischen Karte (Abb. 2.2.7) sind vermutlich auf prä-tertiäre Schichten bzw. das granitoide Basement beschränkt.

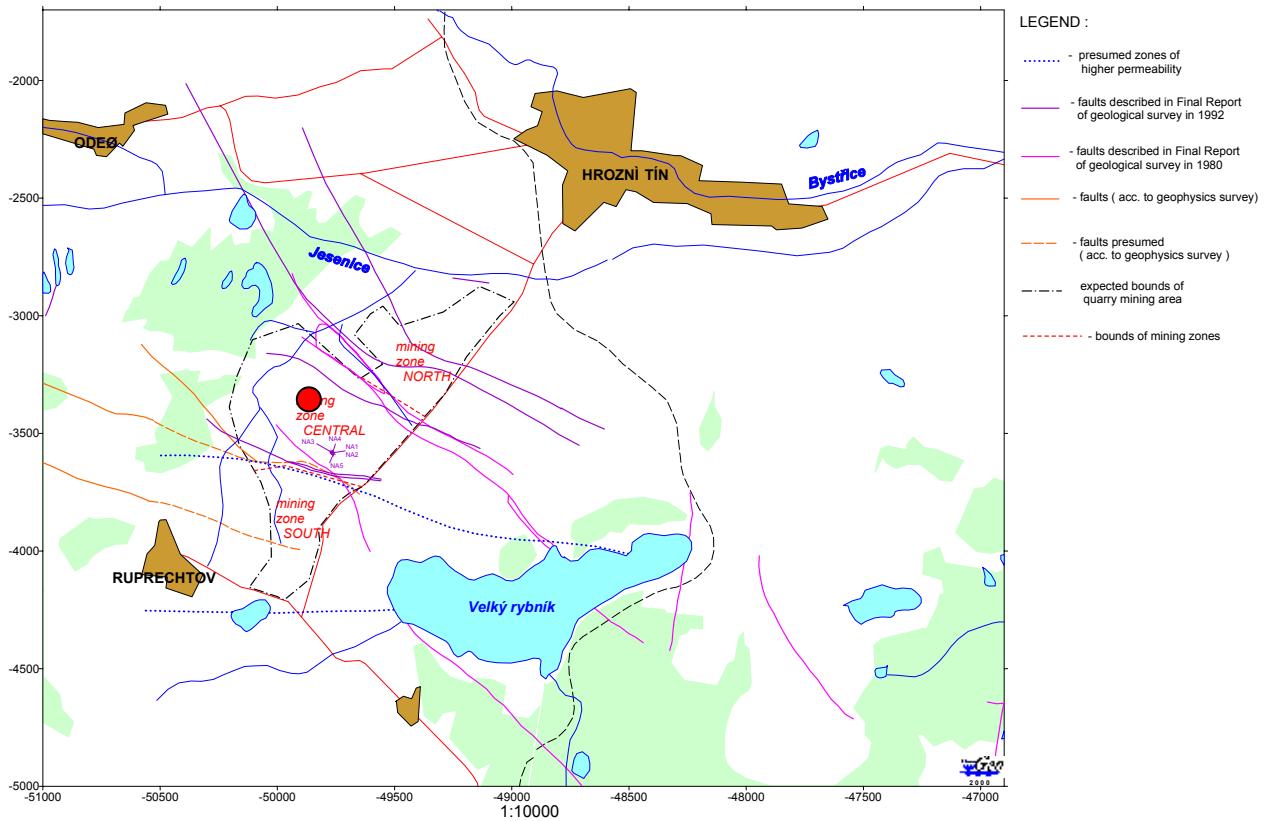


Abb. 2.2.7: Tektonische Karte des Projektgebietes Ruprechtov

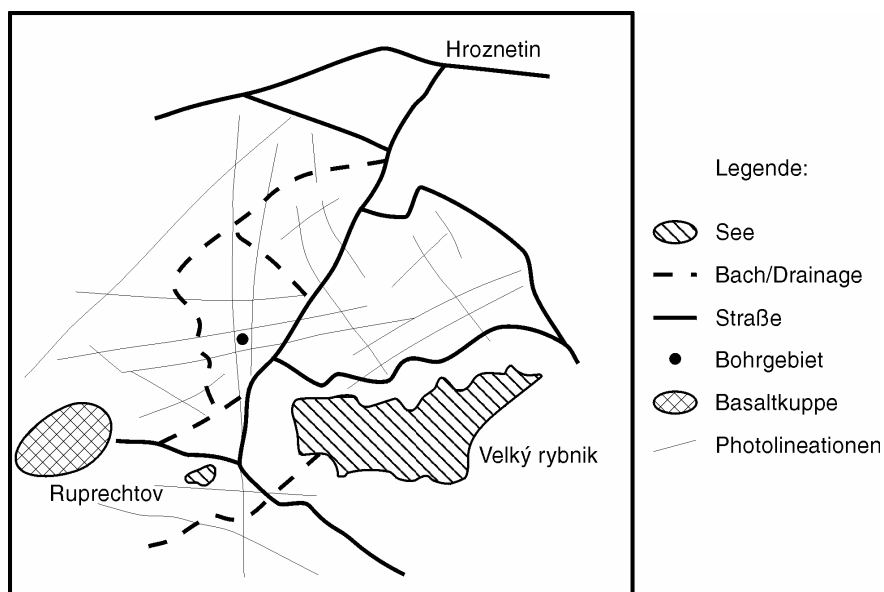


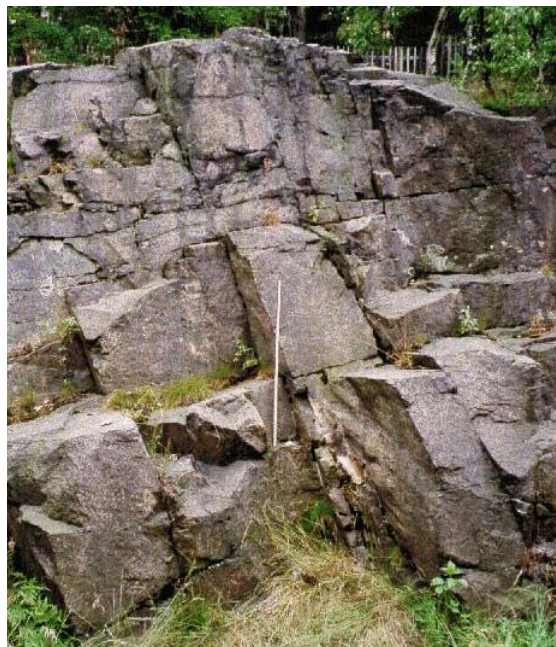
Abb. 2.2.8: Photogeologische Linearanalyse des Projektgebietes Ruprechtov

## 2.3 Granit- / Basaltuntersuchungen

### 2.3.1 Einleitung

Im Untersuchungsgebiet treten - neben den tertiären Sedimenten des Sokolov Beckens - auch magmatische Gesteine auf. Es handelt sich dabei um variskische Granite und känozoische, überwiegend basische Neovulkanite, die teils in wenigen 100 m Entfernung zum bisherigen Untersuchungsgebiet austreichen (Abb. 2.3.1).

Um den geochemischen Charakter dieser beiden Gesteinsgruppen unterscheiden und um insbesondere die voraussichtliche Quelle der U-Th Mineralisation in den untersuchten Sedimenten bestimmen zu können, wurden beim Tschechischen Geologischen Dienst vorliegende geochemische Daten entsprechender Analysen überarbeitet. Geographisch betrachtet erstrecken sich diese Analysedaten über ein weites Gebiet um das Projektgebiet Ruprechtov herum. Die Datensammlung umfasst insgesamt 238 verwendbare Analysen von magmatischen Gesteinen /CAD 84/, /SHR 95/, 26 Gebirgsgranit-, 13 Erzgebirgsgranit- sowie 99 Neovulkanit-Analysen, deren Daten ausgewertet, erneut berechnet und dargestellt worden sind /JAN 00/.



**Abb. 2.3.1:** Aufschluss von dickbankigem Granit des Karlovy Vary - Typs entlang der Eisenbahnlinie am Südufer des Velký rybník

### **2.3.2 Klassifikation der Granite**

Die Granite im Untersuchungsgebiet gehören zu den Karlovy Vary- und Nejdek-Eibenstock - Plutonen. Diese erstrecken sich in NW-SE-Richtung, nahezu senkrecht zu den Hauptstörungen des Erzgebirges. Davon ausgehend kann die Platznahme der Granite überwiegend mit der in NW-Richtung streichenden, tiefgreifenden Jáchymov-Störung in Zusammenhang gebracht werden /BRE 95/. Im Südosten sind die Granite des Nejdek-Eibenstock Plutons von tertiären Sedimenten des Sokolov Beckens bedeckt /STE 86/.

Bereits /LAU 76/ teilte die Granite des Erzgebirges in zwei unterschiedliche Gruppen ein. Es sind dies die älteren, erzarmen ‚Gebirgsgranite‘ und die jüngeren Sn-führenden ‚Erzgebirgsgranite‘. Auch die heutige Klassifikation /SEL 95/ unterscheidet zwischen zwei Intrusiv-Komplexen: (1) der ältere Intrusiv Komplex (Alter ca. 325 - 310 Ma) und (2) der jüngere Intrusiv Komplex (Alter <ca. 305 Ma). Die hauptsächlich vorkommenden Granite der Karlovy Vary - und Nejdek-Eibenstock -Plutone sind:

#### **Gebirgsgranit**

Die Gebirgsgranite sind mittelkörnige, vereinzelt auch porphyrisch ausgebildete Biotit-2-Glimmer Monzogranite - Granodiorite. Sie besitzen in der Regel ein stark planares Gefüge /BRE 91/. Der Locket-Granit entspricht der typischen porphyrischen Variante /FIA 68/. Er begrenzt den NW Rand des Karlovy Vary Plutons und enthält K-Feldspat-Phenokristalle von bis zu 10 cm Durchmesser. Die typischen akzessorischen Minerale der Gebirgsgranite sind: Allanit, Anatas, Andalusit, Apatit, Ilmenit, Magnetit, Rutil, Titanit, Turmalin und Zirkon.

#### **Erzgebirgsgranit**

Die Struktur dieser Granite ist extrem variabel. In der Regel handelt es sich um Topas-führende, porphyrische Biotit-Granite mit untergeordnet mittelkörnigen Muskovit-Biotiten und feinkörnigen Biotit-Graniten /BRE 91/. Neben Topas kommen als Akzessorien Apatit, Fluorit, opake Minerale, Monazit, Rutil, Turmalin, Uraninit und Zirkon vor. /STE 86/

Im engeren Projektgebiet treten überwiegend Erzgebirgsgranite auf.



### **2.3.3 Neovulkanite**

Im Doupovské hory Stratovulkan überwiegen basische Neovulkanite, wie alkalische Basalte, Basanite und Olivin-Nephelinite, bei weitem. Saure Vulkanite, meistens Phonolite und Trachyte, kommen nur untergeordnet vor. Das Entstehungsalter aller Vulkanite ist recht ähnlich und liegt zwischen 22 - 28 Ma /ULR 99/.

Der alkalische Vulkanismus der Doupovské hory Region liegt am Kreuzungspunkt des Ohre-Grabens mit der Jáchymov Störung. Tektonisch gesehen handelt es sich dabei, wie Spurenelementanalysen zeigen, um einen Intra-Platten - Vulkanismus, der an ein erneut emporgehobenes Grabensystem gebunden ist.

### **2.3.4 Geochemische Gesteinsanalysen**

#### **2.3.4.1 Hauptelemente**

Viele Hauptelemente (hier in oxidischer Darstellung), wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO,  $\text{K}_2\text{O}$  und MgO kommen in beiden Granit-Arten vor. Dennoch gibt es sichtbare Unterschiede, wie der in Tab. 2.3.1 und Tab. 2.3.2 dargestellten statistischen Auswertung der Daten zu entnehmen ist.

#### **Gebirgsgranite**

Die Hauptelemente der Gebirgsgranite sind im Vergleich zu denen der Erzgebirgsgranite um einiges variabler. Sie sind mit  $\text{SiO}_2$ -Gehalten von 63,4-76,2 Gew.% weniger sauer und zeigen höhere Konzentrationen an  $\text{TiO}_2$ , CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  sowie ein geringeres Verhältnis von Aluminium/Alkali+Kalkalkali (A/CNK) mit einem Mittelwert von 1,14. Im in Abb. 2.3.2 dargestellten TAS-Diagramm /COX 79/ können alle Analysen mit einer Ausnahme dem klassischen Granitfeld zugeordnet werden.

#### **Erzgebirgsgranite**

Erzgebirgsgranite sind etwas saurer und besitzen mit einem Mittelwert von 1,20 ein höheres A/CNK-Verhältnis als die Gebirgsgranite. Im TAS Diagramm sind alle Proben ausschließlich im Granitfeld anzutreffen.

**Tab. 2.3.1:** Statistischer Vergleich der Hauptelementverteilung in den drei wichtigsten Gruppen magmatischer Gesteine innerhalb des Projektgebietes. A/CNK bezeichnet das molare Verhältnis  $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  [ppm]

### Gebirgsgranite

	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
SiO <sub>2</sub>	26	72,12	3,06	63,42	70,00	73,37	74,20	76,22
TiO <sub>2</sub>	26	0,35	0,21	0,08	0,19	0,29	0,55	0,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	14,07	0,83	12,40	13,42	14,09	14,72	15,63
FeO <sup>t</sup>	26	2,00	0,74	1,22	1,42	1,83	2,29	4,15
MnO	26	0,05	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
MgO	26	0,78	0,82	0,11	0,24	0,60	0,94	4,18
CaO	26	1,03	0,65	0,30	0,57	0,89	1,40	3,24
Na <sub>2</sub> O	26	3,21	0,22	2,68	3,13	3,24	3,33	3,52
K <sub>2</sub> O	26	4,73	0,31	3,96	4,56	4,74	4,95	5,44
A/CNK	26	1,15	0,06	1,01	1,11	1,14	1,19	1,31

### Erzgebirgsgranite

	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
SiO <sub>2</sub>	13	73,00	1,36	70,32	72,34	73,68	73,99	74,41
TiO <sub>2</sub>	13	0,27	0,13	0,10	0,18	0,22	0,34	0,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	14,03	0,40	13,43	13,67	14,05	14,26	14,81
FeO <sup>t</sup>	12	1,75	0,54	0,71	1,40	1,77	2,02	2,59
MnO	13	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06
MgO	13	0,59	0,27	0,17	0,47	0,56	0,71	0,99
CaO	13	0,85	0,34	0,43	0,66	0,71	1,03	1,46
Na <sub>2</sub> O	13	3,09	0,18	2,81	3,00	3,04	3,19	3,54
K <sub>2</sub> O	13	4,77	0,08	4,69	4,71	4,76	4,80	4,94
A/CNK	13	1,19	0,05	1,09	1,16	1,20	1,24	1,25

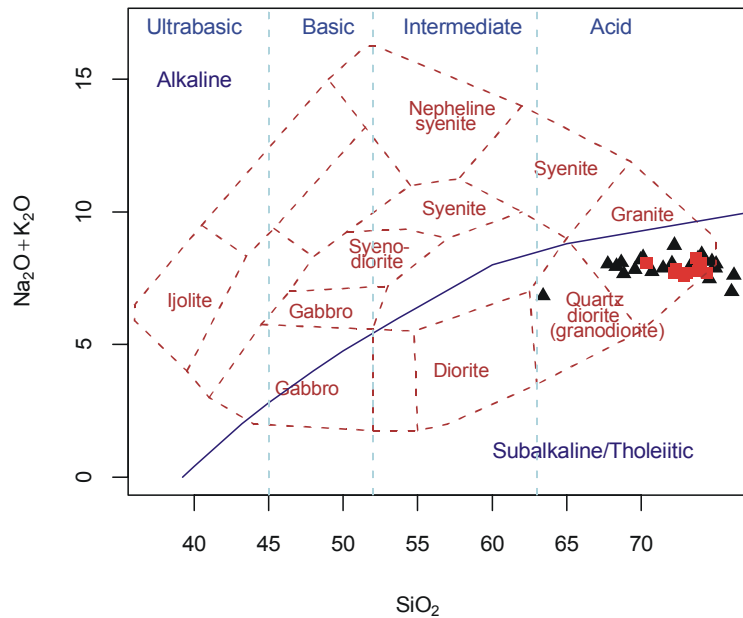
### Neovulkanite

	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
SiO <sub>2</sub>	99	42,84	4,24	35,73	40,63	42,71	44,14	61,26
TiO <sub>2</sub>	99	3,54	1,00	0,34	3,09	3,50	4,22	5,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99	12,61	2,56	6,32	10,93	12,34	14,00	19,65
FeO <sup>t</sup>	99	11,36	2,25	2,85	10,68	11,59	12,44	15,54
MnO	99	0,21	0,03	0,07	0,18	0,21	0,23	0,29
MgO	99	7,01	3,14	0,18	5,69	6,50	8,11	19,74
CaO	99	12,53	3,01	0,98	11,29	13,08	14,60	17,02
Na <sub>2</sub> O	99	2,99	1,09	0,81	2,42	2,97	3,38	7,52
K <sub>2</sub> O	99	1,58	1,28	0,36	0,86	1,20	1,75	6,79

Ungeachtet einer kleinen Abweichung, verursacht durch die Anwesenheit einer anormal basischen Gebirgsgranit-Probe, ist deutlich eine negative Korrelation zwischen SiO<sub>2</sub> einerseits und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sup>t</sup>, MgO und CaO andererseits erkennbar. Die



Konzentration aller letztgenannten Oxide verringert sich mit zunehmender Differentiation. In binären Diagrammen zeigen beide Granit-Gruppen einen gewöhnlichen Trendverlauf.



**Abb. 2.3.2:** Klassifizierung von granitischen Gesteinen im TAS- (Total Alkali – SiO<sub>2</sub>) Diagramm (▲ = Gebirgsgranit, ■ = Erzgebirgsgranit)

### Neovulkanite

Anhand vorliegender Analysen wird die deutliche Heterogenität der im weiteren Projektgebiet vorhandenen Vulkanite ersichtlich. Es dominieren deutlich basische Komponenten mit durchschnittlichen MgO-Gehalten von 6,5 Gew.-% und SiO<sub>2</sub> Gehalten von nur 42,7 Gew.-%. Neben hohen Konzentrationen an TiO<sub>2</sub>, FeO<sup>t</sup>, MnO, MgO und CaO sind ferner die niedrigen Gehalte von K<sub>2</sub>O, im Vergleich zu relativ hohen Na<sub>2</sub>O Gehalten, hervorzuheben.

### 2.3.4.2 Spurenelemente

#### Gebirgsgranite

Die Gebirgsgranite sind charakterisiert durch einen hohen Gehalt an den Übergangsmetallen Ti, Zr und Nb, an leichten Seltene-Erden-Elementen (LREE) und Eu. Sie weisen eine erhöhte Zusammensetzung an Th und geringe U-Gehalte sowie ein durchschnittliches Th/U-Verhältnis von 4,0 auf (Tab. 2.3.2).

## **Erzgebirgsgranite**

Diese Granit-Gruppe besitzt eine charakteristisch hohe Konzentration an Übergangsmetallen (Cr, Ni), höhere Gehalte an schweren Seltene-Erden-Elementen (HREE) und U, welche mit relativ geringen Th Gehalten einhergehen. Daraus resultiert ein deutlich niedrigeres Th/U Verhältnis mit einem Durchschnitt von 1,7. Positive Korrelationen zwischen Ba-Sr, Th-Zr und Sr-Zr sowie eine negative Korrelation zwischen Rb-Sr sind erkennbar. Wie bei den Hauptelementanalysen ist es auch bei den Spurenelementen schwierig, in binären Diagrammen verschiedene Trends der einzelnen Granit-Gruppen zu erkennen. In einem Ba-Sr Diagramm lassen sich beide Granit-Gruppen einem durchgängigen Trend zuordnen. Es ist anzunehmen, dass dieses Ergebnis auf einer umfassenden fraktionierten Kristallisation der K- Feldspat- Plagioklas- Minerale beruht.

Das Rb-Sr Diagramm unterstützt diese These nur anhand einzelner Analysen. Die meisten der Gebirgsgranite und einige der Erzgebirgsgranite besitzen höhere Sr-Gehalte. Der Rest der Proben zeigt Rb-Gehalte, die deutlich über den Erwartungen liegen. Möglicherweise haben diese Proben eine starke, spät-autometasomatische Überprägung erfahren /GER 89/

## **Neovulkanite**

Die Neovulkanite enthalten neben den geringsten Thorium-Konzentrationen ebenfalls geringe Uran Gehalte.

### **2.3.5 Voraussichtliche Quelle der U -Mineralisation bei Ruprechtov**

Wie aus einer Studie von /FÖR 95/ hervorgeht, kommen als Quelle der Urananreicherungen im westlichen Erzgebirge die hoch differenzierten, aluminiumreichen radioaktiven Granite in Betracht. Deren Gammaaktivitätsrate liegt zwischen 90 und 150 nGy/h /MAT 95/. Die älteste Urananreicherung ist ca. 20 Ma jünger als die Platznahme des letzten Granit-Körpers. Die Uranmineralisation hat über mehrere Stadien bis zum heutigen Zeitpunkt stattgefunden (250-240 Ma, 200-190 Ma, 170-150 Ma, 120-90 Ma, 30-0 Ma). Die Entstehung spröderer Strukturen, in die anschließend U-haltige Lösungen hinein migrierten, wird der postvariskischen Konsolidation, Auflösung in unterschiedliche Blöcke und Riftingprozesse während der Öffnung des Atlantiks zugeschrieben /FÖR 95/.

**Tab. 2.3.2:** Statistischer Vergleich der Spurenelementverteilung in den drei wichtigsten Gruppen magmatischer Gesteine innerhalb des Projektgebietes [ppm]

**Gebirgsgranite**

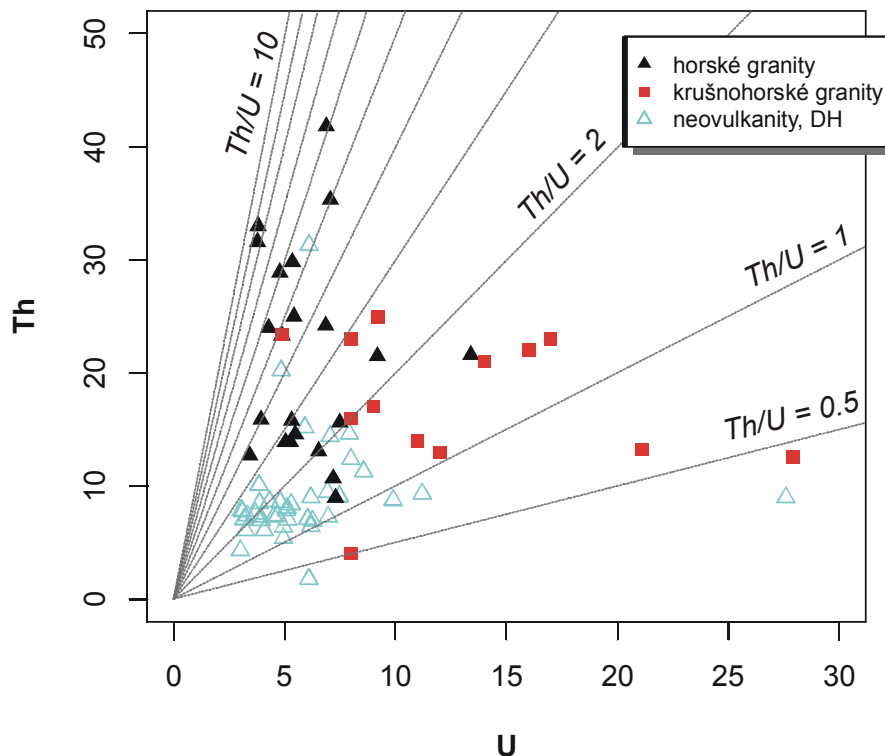
	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
Rb	26	360,81	180,72	149,00	232,00	265,50	461,50	715,00
Sr	26	116,15	82,78	14,00	37,50	108,00	174,75	302,00
Ba	21	456,67	237,23	52,00	279,00	451,00	615,00	917,00
Cr	25	19,36	20,63	5,00	12,00	14,00	19,00	114,00
<b>U</b>	<b>22</b>	<b>6,03</b>	<b>2,21</b>	<b>3,44</b>	<b>4,81</b>	<b>5,38</b>	<b>7,01</b>	<b>13,40</b>
<b>Th</b>	<b>26</b>	<b>22,75</b>	<b>8,80</b>	<b>8,97</b>	<b>14,85</b>	<b>23,25</b>	<b>29,57</b>	<b>41,80</b>
La	26	42,10	24,74	8,39	19,93	38,20	61,90	83,70
Eu	24	0,86	0,70	0,10	0,44	0,79	1,04	2,95
Sn	26	15,27	6,39	6,00	10,25	14,50	17,00	33,00
Y	26	22,23	7,20	6,00	17,50	22,00	26,00	41,00
Zr	26	162,96	76,91	54,00	103,50	161,00	206,50	317,00

**Erzgebirgsgranite**

	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
Rb	13	310,08	199,37	206,00	218,00	228,00	253,00	763,00
Sr	13	95,46	58,86	14,00	70,00	79,00	119,00	207,00
Ba	13	297,46	219,47	38,00	182,00	239,00	349,00	741,00
Cr	13	34,77	16,02	11,00	22,00	38,00	45,00	62,00
<b>U</b>	<b>13</b>	<b>12,78</b>	<b>6,38</b>	<b>4,90</b>	<b>8,00</b>	<b>11,00</b>	<b>16,00</b>	<b>27,90</b>
<b>Th</b>	<b>13</b>	<b>17,47</b>	<b>6,07</b>	<b>4,00</b>	<b>13,20</b>	<b>17,00</b>	<b>23,00</b>	<b>24,90</b>
La	13	32,58	14,17	12,40	25,00	28,00	43,30	54,90
Eu	13	0,59	0,25	0,20	0,45	0,59	0,78	0,98
Sn	13	8,77	3,17	6,00	7,00	7,00	10,00	15,00
Y	13	26,92	9,30	15,00	21,00	24,00	32,00	46,00
Zr	13	112,00	51,54	38,00	78,00	85,00	134,00	213,00

**Neovulkanite**

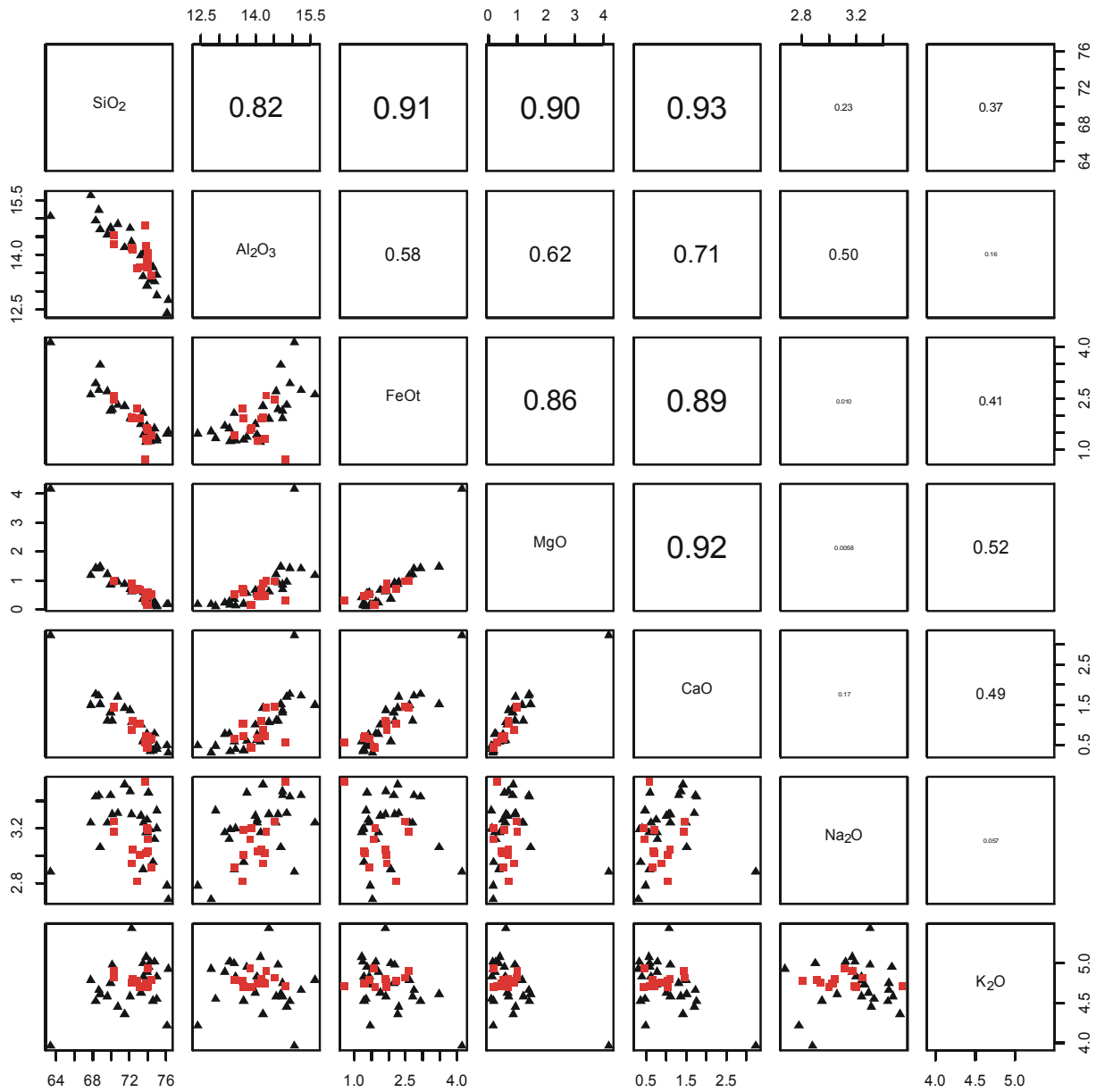
	n	Mittel	1 $\sigma$	Min	25%	50%	75%	Max
Rb	89	60,13	43,14	7,00	35,00	51,00	68,00	277,00
Sr	92	932,73	331,54	373,00	763,00	890,00	1020,25	2500,00
Cr	87	148,71	213,20	5,00	34,00	64,00	167,00	1103,00
<b>U</b>	<b>41</b>	<b>5,95</b>	<b>3,95</b>	<b>3,00</b>	<b>3,90</b>	<b>5,08</b>	<b>6,26</b>	<b>27,60</b>
<b>Th</b>	<b>90</b>	<b>9,00</b>	<b>4,40</b>	<b>1,80</b>	<b>6,94</b>	<b>7,92</b>	<b>10,04</b>	<b>31,30</b>
La	89	74,06	30,40	31,30	56,70	68,20	79,70	232,00
Eu	89	3,11	0,80	0,76	2,75	3,11	3,40	5,49
Y	90	29,36	7,39	14,00	24,00	28,00	32,75	55,00



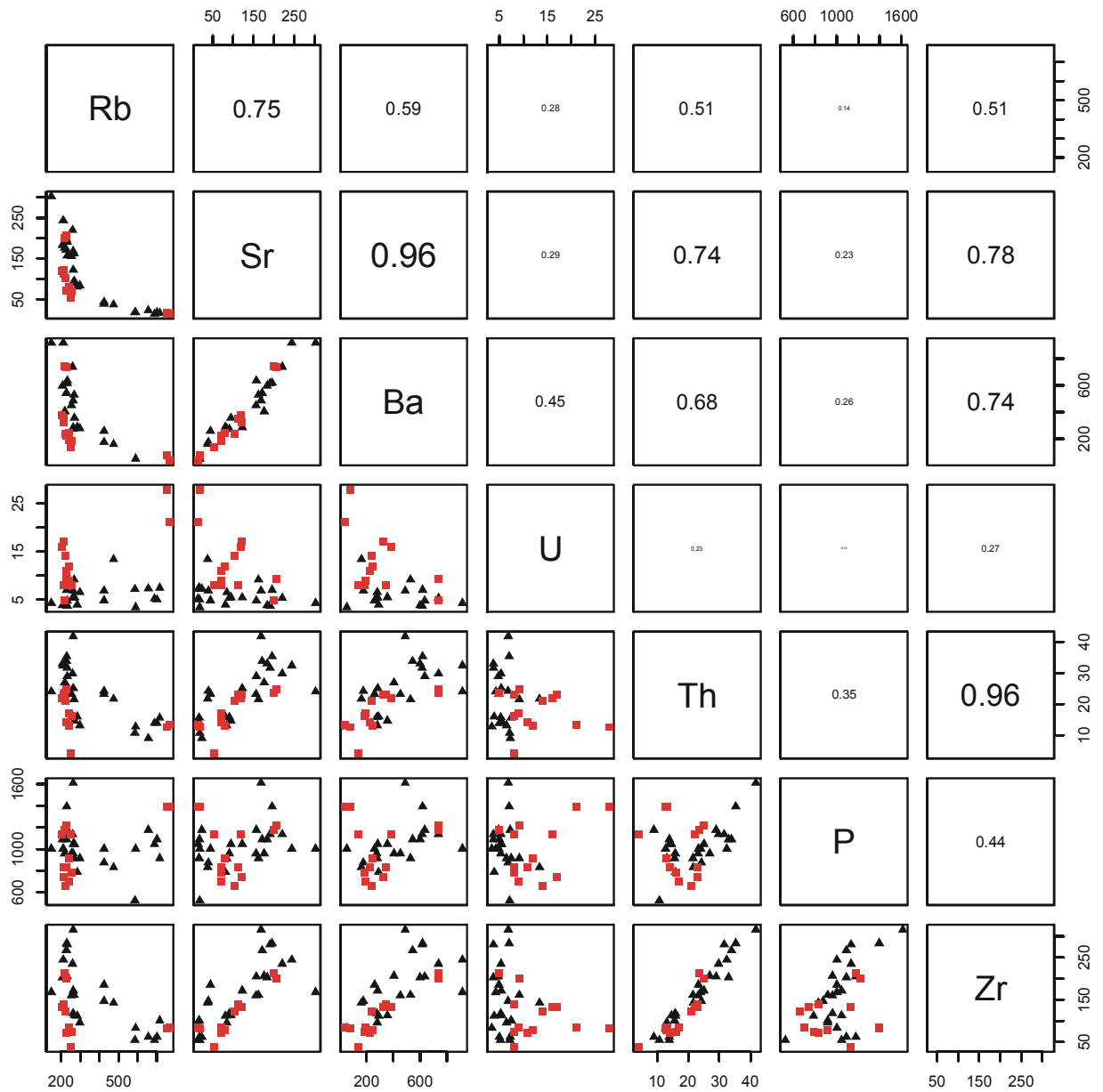
**Abb. 2.3.3:** Binäres Diagramm Th vs. U [ppm] der drei magmatischen Gesteinsgruppen innerhalb des Untersuchungsgebietes  
(▲ = Gebirgsgranit, ■ = Erzgebirgsgranit, △ = Neovulkanite)

Betrachtet man die Uran-Ablagerungen in den tertiären Sedimenten des Sokolov Beckens bei Ruprechtov, so können die känozoischen Vulkanite und deren Tuffe aufgrund der zu geringen Konzentration an Radionukliden mit geringen Urangehalten und Gammaaktivitätsraten von basischen Gesteinen bei 35-50 nGy/h und von sauren Vulkaniten bei 60-90 nGy/h /MAT 95/ als Uranquelle ausgeschlossen werden (vgl. Abb. 2.3.3). Die wahrscheinlichste Uranquelle stellen dagegen die Erzgebirgsgranite und deren Verwitterungsprodukte dar, die im Untergrund des Sokolov Beckens anstehen. Die Remobilisation des Urans, welches überwiegend an akzessorische Minerale wie Uraninit, Zirkon und Monazit gebunden ist, wurde zum einen durch autometasomatische Alteration der Granite und zum anderen durch die durch den radioaktiven Zerfall verursachten Kristallstörungen während der variskischen Intrusion und der tertiären Remobilisation gefördert bzw. beschleunigt.

Eine Schlüsselrolle in Hinsicht auf Lösung und Transport durch meteorische Wässer spielte wahrscheinlich der erhöhte Hitzefluß der Region. Dieser wurde hauptsächlich durch den gewaltigen Doupovske hory Stratovulkan, welcher am Kreuzungspunkt Eger-Graben und Jáchymov-Störung aktiv war, verursacht.



**Abb. 2.3.4:** Korrelation der Hauptelemente der Gebirgsgranite (▲) und Erzgebirgsgranite (■) innerhalb des weiteren Projektgebietes



**Abb. 2.3.5:** Korrelation ausgewählter Spurenelemente der Gebirgsgranite (▲) und Erzgebirgsgranite (■) innerhalb des weiteren Projektgebietes

## **2.4 Sedimente**

### **2.4.1 Bohrkernbeschreibung**

Für die Bohrkernaufnahme der Sedimente standen zunächst nur die nicht in PVC-Rohren versiegelten Bohrkernkerne zur Verfügung. Um eine Beschreibung der ungestörten Sedimente vornehmen zu können, wurden die äußeren Zentimeter der jeweiligen Kernabschnitte entfernt. Von einer sonst üblichen Kernhalbierung wurde abgesehen, da der Kern für spätere Untersuchungen möglichst intakt bleiben sollte.

Bereits während der Bohrkernaufnahme wurde eine Entnahme von Probenmaterial und eine unmittelbare Bestimmung der natürlichen Wassergehalte durchgeführt. Zusätzlich wurden Proben zur Ermittlung von Siebkurven, zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeiten und für die ICP-Analytik, sowie zur Herstellung von Dünnschliffen dem Bohrkern entnommen.

Das unter anoxischen Bedingungen gewonnene Material aus 33-38,4 m Teufe unterlag einem separaten Untersuchungsprogramm. Dieser Bohrkernbereich wurde erst nach Beendigung der betreffenden Analysen aufgesägt und makroskopisch erfasst. Zur Darstellung makroskopisch nicht erfassbarer Teilsegmente des Bohrkerns sind die Messdaten der geophysikalischen Bohrlochvermessung in die Auswertung einbezogen worden.

Eine Zusammenfassung der ermittelten Lithologie ist in Abb. 2.4.1 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Sedimente liefern die Bohrprofile im Anhang. Um auf die Ablagerungsfazies der tertiären Sedimente eingehen zu können, werden im folgenden die unterschiedlichen lithostratigraphischen Einheiten zunächst kurz vorgestellt und einige Auffälligkeiten näher erläutert.

Eine detaillierte Beschreibung des Bohrkerns der Bohrung NA5 ist vom tschechischen NRI vorgenommen worden und wird in einem separaten Bericht dokumentiert. Der basale Teil beider Bohrungen mit den für das vorliegende Projekt interessierenden Urananreicherungen ist in Abb. 2.4.2 gegenübergestellt und erlaubt aus lithologischer Sicht eine klare Korrelation der einzelnen Horizonte (siehe auch Abb. 2.4.3 für einen Vergleich mit den älteren Explorationsbohrungen NA1 und NA3).

# NA4

471.70 m

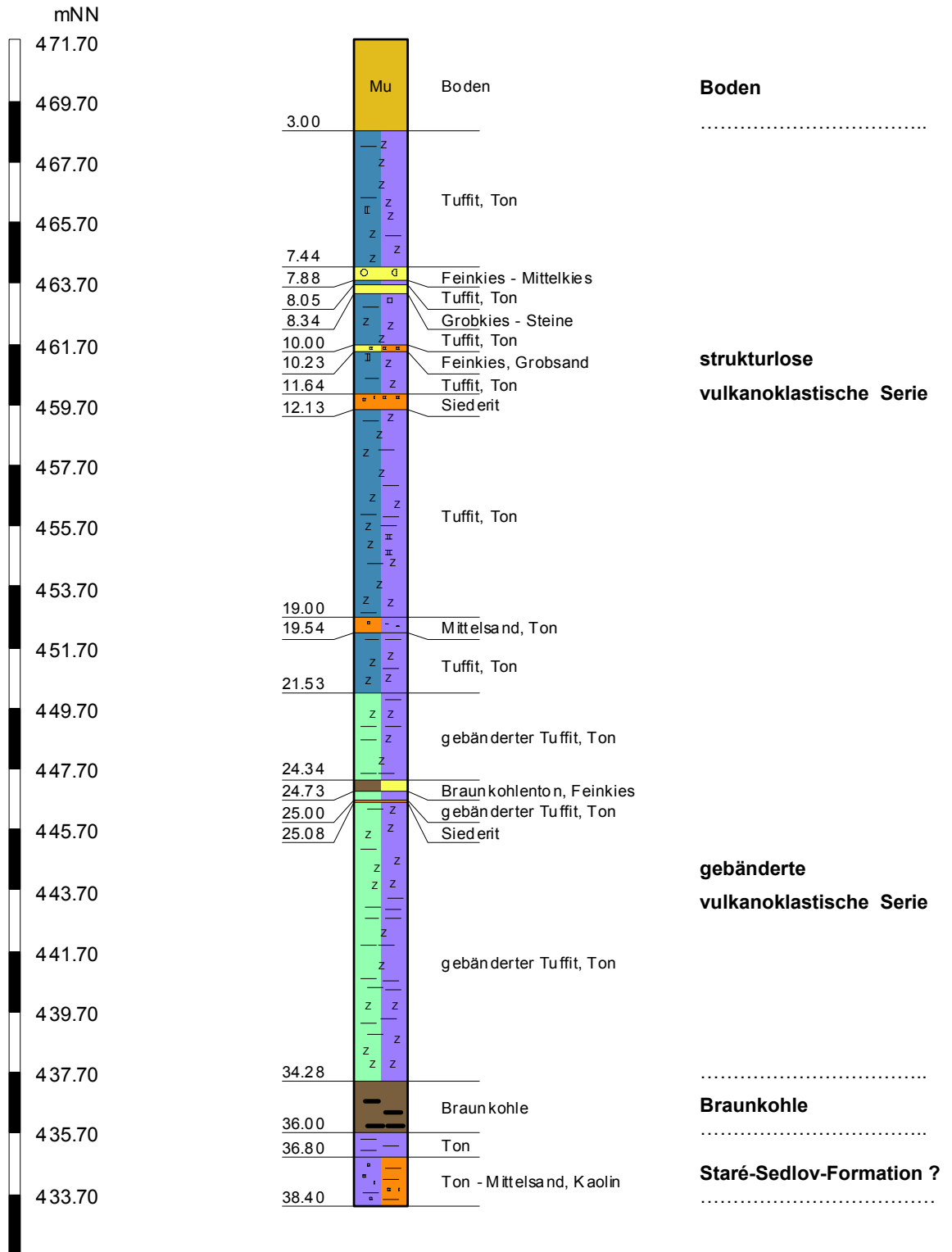
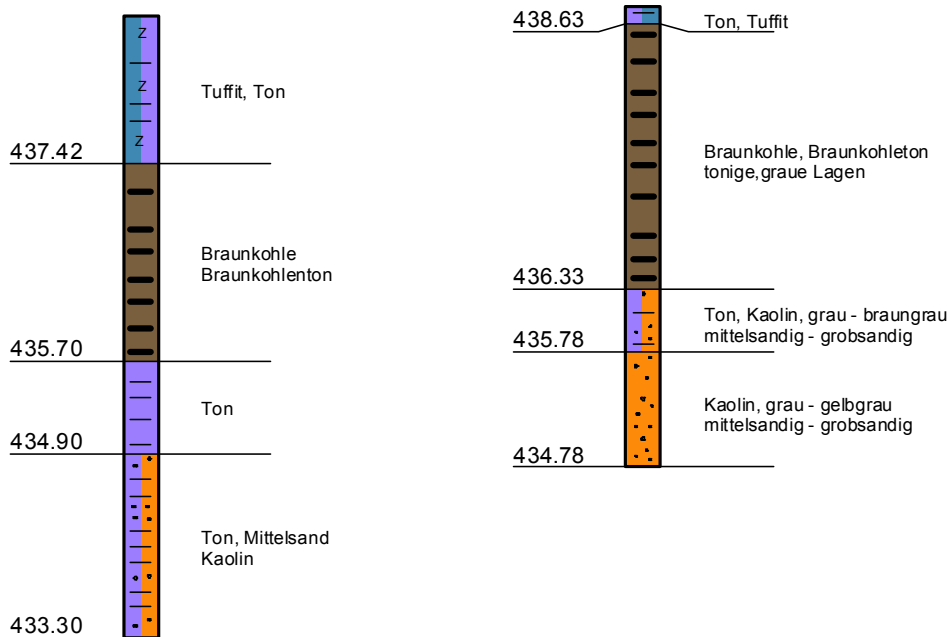
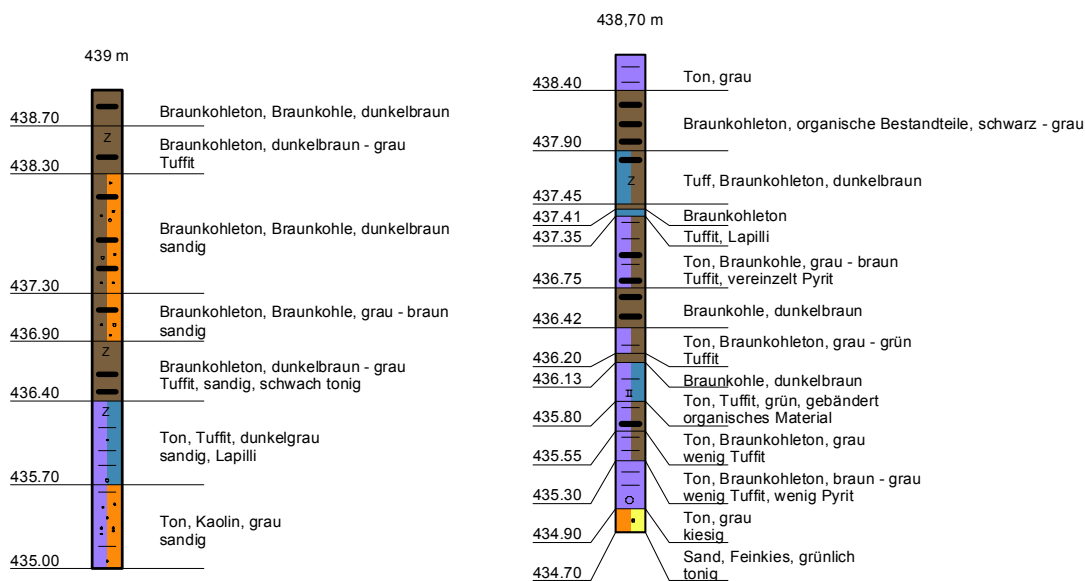


Abb. 2.4.1: Lithologische Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (gesamt)





**Abb. 2.4.2:** Vergleichende Profildarstellung der Bohrungen NA4 (links) und NA5 (rechts) von 33,00 m u. GOK bis Endteufe (Skalenangaben = m ü. NN)



**Abb. 2.4.3:** Vereinfachte geologische Profile der Bohrungen NA1 (links) und NA3 (rechts); dargestellt ist jeweils der Teufenbereich von 33,00 - 37,00 m u. GOK (Skalenangaben = m ü. NN)

## **2.4.2 Lithostratigraphische Beschreibung**

### **2.4.2.1 Boden**

Bei den oberen 3 m der Bohrung NA4 handelt es sich um quartäre Bodenbildung. Die obersten 50 cm weisen eine charakteristisch braun-hellbraune Verwitterungsfarbe auf. Bereits ab 0,5 m zeigen graugrüne-graue Farben einen Übergang in reduzierende Milieubedingungen an; dennoch belegen zahlreiche oxidierte, rostfarbene Zwischenlagen den Kontakt mit Sauerstoff und kleinräumig positive Redox-Verhältnisse.

### **2.4.2.2 Vulkanoklastische Serie**

Den größten Anteil der abgelagerten Sedimente bilden stark vertonte Tuffite. In Bereichen, in denen der Grobkornanteil zunimmt, weisen die Kerne häufig Brüche auf. Innerhalb dieser vulkanoklastischen Serie konnte eine Unterteilung in einen strukturlosen und einen gebänderten Abschnitt vorgenommen werden.

#### **Strukturlose vulkanoklastische Serie**

In einer Bohrkern-teufe zwischen 3,00 m und 21,53 m ist keine Schichtstruktur bzw. keine regelmäßige Textur der Partikel zu erkennen. Der überwiegende Teil dieses Bohrkernabschnitts wird aus tonigen Lagen mit variierendem Schluffgehalt gebildet; nur selten sind Sandhorizonte zwischengeschaltet. Vereinzelt wurden umgelagerte Braunkohletone und kleine Kohlestückchen sedimentiert, deren Mächtigkeit nur wenige Zentimeter erreicht.

Abweichend von den vertonten Tuffiten sind im Bereich 7,44-7,80 m und 8,05-8,34 m deutlich grobkörnigere Sedimentlagen zwischengeschaltet. Die Körnung des oberen grobkörnigen Horizontes erreicht Korngrößen im Grobsand-Feinkiesbereich. Dieser, oberflächennahe Grundwasser führende Bereich ist beim Ausbau der Messstelle mit einem abgedichteten Standrohr versehen worden.

Innerhalb der vulkanoklastischen Serie sind bei 11,64-11,75 m und 25,00-25,08 m außerdem zwei auffällig harte, hell-gelbbraune Zwischenlagen zu erkennen. Mit Hilfe von ICP- und Röntgenanalysen wurde dieses Material als Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) identifiziert.

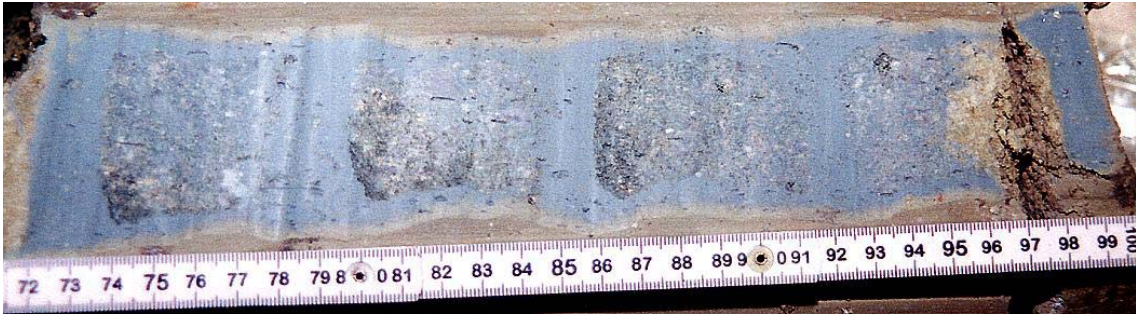
Neben diesen zwei durchgängigen Lagen sind immer wieder kleinere, im cm-Bereich liegende Siderit-Konkretionen vorhanden, z. T. im direkten Kontakt mit organischen Resten. Die Dünnschliffauswertung sideritischen Materials /BÖH 00/ aus dem Kernbereich 11,64-11,75 m bestätigt die Anwesenheit von Pflanzenresten in diesem diagenetisch entstandenen, sehr feinkörnigen Material. Der in der Natur am häufigsten vorkommende Siderittyp ( $\text{Fe}_9\text{Ca}(\text{CO}_3)_{10}$ ) entsteht in einem pH-Bereich zwischen 6-7. Zu solchen Bedingungen kommt es oft in Sümpfen und Tümpeln, deren reichlicher Pflanzenbewuchs zudem als  $\text{CO}_2$ -Quelle für die Karbonatbildung in Frage kommt.

Innerhalb der Bohrung NA4 herrschen jedoch leicht alkalische Milieubedingungen vor. Eine Erklärung für die Bildung der Sideritlagen können lokal vorkommende Kohlestücke liefern, in deren nächster Umgebung ein leicht saures Milieu anzutreffen und somit eine Sideritbildung möglich ist, die darüber hinaus auch von schwach negativen Eh-Werten abhängt. Eine wichtige Voraussetzung für die Bildung von Siderit ist jedoch das Fehlen von  $\text{H}_2\text{S}$  bzw.  $\text{HS}^-$ - und  $\text{S}^{2-}$ -Ionen, da bei deren Anwesenheit vorhandene  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen das schwerlösliche Pyrit bilden.

Bei einer ausreichend hohen Fe-Konzentration kann es zur Ausfällung des leichter löslichen  $\text{FeCO}_3$  erst nach Ablauf einer vollständigen Pyritbildung kommen. Aus diesem Grund ist die Bildung eines Pyritkerns innerhalb von Sideritknollen und Konkretionen, wie sie auch für den Bohrkern NA4 in Proben der Teufe 33,33-33,38 m und 34,93-34,98 m identifiziert wurden, keine Seltenheit.

### **Gebänderte vulkanoklastische Serie**

Ab einer Teufe von 21,53 m ändert sich das Erscheinungsbild des Bohrkerns. Bis zu einer Teufe von 34,30 m lassen die Sedimente einen mehr oder weniger regelmäßigen Wechsel zwischen überwiegend grobkörnigen Lapilli und feinkörnigen Aschelagen erkennen. Besonders gut ausgeprägt ist eine rhythmische Ablagerung im Bereich von 26,50-32,20 m. 2-5 cm dicke Lapillilagen wechseln sich regelmäßig mit 2-3 cm mächtigen Aschehorizonten ab.



**Abb. 2.4.4:** Rhythmische Bänderung und Blaufärbung des Bohrkerns NA4 (26,72 - 27,00 m)

Abb. 2.4.4 zeigt neben der rhythmischen Bänderung den ausgeprägten blauen Farbton dieses Bohrkernabschnitts. Die auffallende Färbung der Tonlagen in einer Tiefe von 26,45 m bis 27,30 m kann nur in reduzierenden Ablagerungsmilieus entstehen und ist auf die Anwesenheit von  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen zurückzuführen.

In Gegenwart von Sauerstoff werden die  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen rasch (bereits innerhalb von 15 min.) zu  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen oxidiert und verlieren den charakteristischen Blauton, so dass dann Grüntöne dominieren. Unter reduzierenden, nicht all zu sauren Bedingungen kann es zusätzlich auch zur Bildung von Eisen (II, III)-Hydroxiden, dem sogenannten Grünen Rost, kommen.

### **2.4.2.3 Braunkohle**

Die geophysikalischen Messungen (Dichte-Log; Dichte-Gamma-Gamma-Log) sowie die makroskopische Bohrkernaufnahme haben kohlehaltige Sedimente bzw. Kohlelagen in einem Teufenbereich zwischen etwa 34,30 - 35,80 m nachgewiesen. Zusätzlich konnte eine Unterscheidung zwischen Kohletonlagen und dem eigentlichen Kohleflöz vorgenommen werden.

### **2.4.2.4 Staré-Sedlov-Formation**

Die Bohrkernaufnahme ergibt für die basalen 0,85 m des Bohrkerns NA4 ein überwiegend fein-mittelsandiges Sediment. Neben vertonten Lagen ist als auffälligstes Merkmal die Anwesenheit von Kaolin zu nennen. Ein Übergang von beigen zu grauen bis hellgrauen Farben belegt die Zunahme des Kaolingehaltes zur Basis hin.



**Abb. 2.4.5:** Braunkohle aus der Bohrung NA4 in einer Teufe zwischen 35,51 und 35,75 m

Die während der Bohrarbeiten getroffene Entscheidung des betreuenden tschechischen Geologen, die Bohrung NA4 in einer Tiefe von 38,40 m zu beenden, basierte auf dem Nachweis des durchteuften Braunkohlehorizontes und der Annahme, dass der unterlagernde kaolinisierte Granit (Primärer Kaolin) erreicht ist. Erst nach der makroskopischen Bohrkernaufnahme dieser kaolinitisch zementierten Sedimente ist diese Einstufung neu zu diskutieren. Neu hinzugezogene Literaturbeschreibungen geben Hinweise auf ein mögliches Vorliegen ebenfalls stark kaolinisierter Sande und Tone der oligozänen Staré-Sedlov-Formation (sekundärer Kaolin). Eventuell ist mit der Bohrung NA4 auch der Übergang zwischen Sekundärem und Primärem Kaolin erbohrt. Dieser Frage soll u. a. in einem späteren erweiterten Bohr- und Untersuchungsprogramm nachgegangen werden, zumal zwischenzeitlich auch uranhaltige Sande der Staré-Sedlov-Formation bekannt sind. Für die Lokation Ruprechtov und deren Umgebung wurde jedoch bislang die bedeutendste Urananreicherung in kohlehaltigem und kohligem Ton beschrieben /BRA 98/.

#### **2.4.2.5 Zusammenfassung der Bohrkernaufnahme**

Das geologische Profil der Bohrung NA4 kann in vier unterschiedliche lithostratigraphische Einheiten unterteilt werden.

An der Basis werden vermutlich stark kaolinisierte Relikte der Staré-Sedlov-Formation bzw. kaolinisierter Granit angetroffen. Im Hangenden folgt ein insgesamt etwa 2 m mächtiges Kohleflöz. Den größten Anteil der Bohrung bilden vulkanoklastische Sedimente, die in einen Bereich, der durch rhythmische Bänderung gekennzeichnet ist,

und einen texturlosen Bereich unterschieden werden können. Die oberen 3 Meter repräsentieren quartäre Bodenbildung.

Abweichend von den in der Literatur beschriebenen dickbankigen Antonin- und Anetzka-Kohleflözen im westlichen Sokolov-Becken, kam es im Raum Ruprechtov nur zur Ausbildung kleinerer Kohlevorkommen. Die Bohrung NA4 weist im Gegensatz zum Hauptbecken nur ein und nur sehr geringmächtiges Kohleflöz auf. Diese Tatsache lässt kleinräumige, schnell wechselnde Ablagerungsbedingungen vermuten. Als Ablagerungsraum für die tertiären Sedimente des Bohrkerns NA4 kommt ein kleinräumiges Flachwasserbecken in Frage. Überschwemmte Sumpfbereiche und fluviatile Ablagerungsräume unterlagen einer ständigen Veränderung. Ein Indiz für Flachwasserablagerungen ist das völlige Fehlen einer Feinlamination im mm-Bereich. Die Schichtmächtigkeit der Sedimente beträgt im geringsten Fall zwei cm und entspricht daher nicht den typischen Ablagerungen ungestörter, tiefer Beckenbereiche.

Zur Zeit der Kohlebildung kam es innerhalb des Beckens in kleinräumigen Senken zur Ausbildung stagnierender Seen, Teiche und Sumpfbereiche. Für einen von Zeit zu Zeit trockenfallenden Sumpfbereich spricht die relativ geringe Menge an Pflanzenmaterial und somit die geringe Mächtigkeit des vorhandenen Kohleflözes.

Die auffällig rhythmische Bänderung in einer Teufe von 21,53 - 34,30 m deutet auf einen regelmäßigen Sedimenteintrag hin. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurden diese Sedimente subaquatisch abgelagert. Episodisch auftretende starke Regenfälle können große Mengen klastischen Materials transportieren, während in ruhigeren Phasen feinkörniges Sediment zur Ablagerung kommt. Seen mit regelmäßigem Sedimenteintrag lassen unter geeigneten Bedingungen eine Warvenbildung erkennen. Dabei wechseln sich Perioden mit hohem, grobem Suspensionseintrag (Frühling) und feinkörnige Tonlagen (Winter) ab. Die Sedimente des Bohrkerns NA4 weisen einen warvenähnlichen Charakter auf. Es ist jedoch fraglich, ob die beschriebene Bänderung der Bohrung NA4 solch jahreszeitliche Transportschwankungen eines Flusses darstellt. Ob ein Fluss immer wiederkehrend große Materialmengen aus dem Hinterland in das Becken einspülte oder ob die rhythmische Bänderung auf einen regelmäßigen Vulkanausbruch hindeutet, ist letztendlich im Rahmen der vorliegenden Studie nicht zu entscheiden. Gegen eine jahreszeitliche, fluviatile Ablagerung spricht jedoch die große Mächtigkeit der feinkörnigen Lagen. Es ist daher wahrscheinlicher, dass die beschriebenen Tonlagen aus feinkörnigen Aschepartikeln bestehen, die während regelmäßig wiederkehrenden (plinianischen) Vulkanausbrüchen abgelagert wurden. In

diesem Fall können die Lapilli und Aschepartikel als „Fall-out“-Tephra bezeichnet werden.

### **2.4.3 Mineralogie**

#### **2.4.3.1 Mineralogische Übersichtsuntersuchungen**

Eine umfassende Darstellung aller mittels Röntgendiffraktometrie ermittelten Mineralbestände ist im Anhang erfolgt. Die dort zusammengestellte Liste enthält die jeweils signifikantesten Peaks einer Probe. Dabei treten eine Reihe von Mineralen nur einmalig oder in wenigen Proben auf und/oder stellen sekundäre Neubildungen dar, die sich aufgrund von Milieuänderungen, wie sie bei Transport und Lagerung nicht ausgeschlossen werden können, gebildet haben. In Tab. 2.4.1 ist deshalb ein diesbezüglich „bereinigter“ und auf die Bohrung NA4 begrenzter Mineralbestand zusammengestellt. Trotz der aufgrund der insgesamt sehr geringen Urangehalte nur mit Einschränkungen zu interpretierenden Uranmineral-Zusammensetzung sind in dieser Tabelle alle identifizierten Uran-Mineralen aufgeführt, da bei einer Teufe von ca. 36,50 m ein Übergang von U(IV)- zu U(VI)-Mineralen zu verzeichnen ist. Möglicherweise kann dies als Hinweis auf eine unterschiedliche Genese der im Braunkohlenhorizont einerseits und im unterlagernden Kaolin andererseits festgestellten Urananreicherungen interpretiert werden. Das in der Bohrung NA5 im Braunkohlenhorizont mit der höchsten Urankonzentration zweifelsfrei nachgewiesene Uranmineral Ningyoit ( $\text{CaU}[\text{PO}_4]_2$ ) stellt ebenfalls ein U(IV)-Mineral dar.

Neben diesen mineralogischen Übersichtsanalysen ist an ca. 10 Proben detailliert die spezielle Tonmineralogie untersucht worden (Abb. 2.4.6). Bei der Auswertung dieser Röntgenanalysen, deren Methodik etc. ausführlich in /SCH 00/ beschrieben ist, konnten Alkalifeldspäte und Klinopyroxene nachgewiesen werden, die auf ein alkalibasaltisches Ausgangsgestein hindeuten. Ferner belegen die vorhandenen Titanminerale den vulkanischen Ursprung dieser Sedimente (Doupovské hory Stratovulkan). Neben dem Eintrag der vulkanischen Serie kam es auch zur Resedimentation von Kaolinit und Kohlestückchen. Alle tonmineralogisch untersuchten Proben des Bohrkerns NA4 enthalten unregelmäßige Illit-Smektit-Wechselagerungen, deren Gehalt zwischen 10 und 90 % variiert. Reiner Montmorillonit konnte dagegen nur in den Proben 6,81-6,86 m, 26,86-26,89 m und 32,64-32,73 m nachgewiesen werden; in diesen Proben stellt er mit 60 bzw. 80 % jedoch das mit Abstand häufigste

Tonmineral dar. Die makroskopisch sichtbare Blaufärbung der Tonmatrix dieser Proben kann auf die Anwesenheit von Montmorillonit bzw. die darin enthaltenen Eisenionen zurückgeführt werden.

Die Smektite und die Wechsellagerungen haben sich +/- autochthon gebildet. Als Edukte kommen vulkanische Gläser (die thermodynamisch besonders instabil sind und daher am ehesten der Verwitterung unterliegen) in Frage, die vom Doupovské hory in das Sedimentbecken gelangten. Kaolinit ist in diesen Proben nicht bzw. nur in ganz geringen Mengen enthalten.

In einer Teufe von 19,35 m erreicht Kaolinit dagegen maximale Gehalte von bis zu 65 %. Diese relative Anreicherung des Kaolinites steht im Zusammenhang mit einem wasserführenden Horizont, der mit Hilfe der geophysikalischen Bohrlochmessungen in einer Teufe von 19,50 m identifiziert werden konnte. Offensichtlich wurden aufgrund eines geringen, aber ständigen Wasserflusses  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Na^{+}$ -Ionen abgeführt und Kaolinit als resistentes Mineral relativ angereichert (autochthon). Demgegenüber stellt aus der Umgebung in das Becken hineingeschwemmter Kaolinit ein Produkt tiefgründig verwitterten Granits dar (allochthon).

Bei Siderit und dem in geringen Mengen nachgewiesenen Pyrit handelt es sich um diagenetische Neubildungen. Beide Minerale bleiben meist auf wenige cm dicke Lagen und Konkretionen beschränkt, treten aber generell über weite Bereiche des Profils auf .

Zur genaueren Bestimmung der komplexen petrographischen Verhältnisse sind darüber hinaus eine Reihe von Dünnschliffen angefertigt und analysiert worden, wobei die Herstellung von Dünnschliffen aus dem vorliegenden vulkanoklastischen, tonreichen und wenig verfestigten Material mit hohem Wassergehalt sehr problematisch ist. Darüber hinaus sind Pyroklastika allgemein und Tuffite im besonderen im Hinblick auf eine Mineralbestimmung problematisch. Insgesamt weist die Mehrzahl der angefertigten Schliffe einen hohen Glasanteil auf.



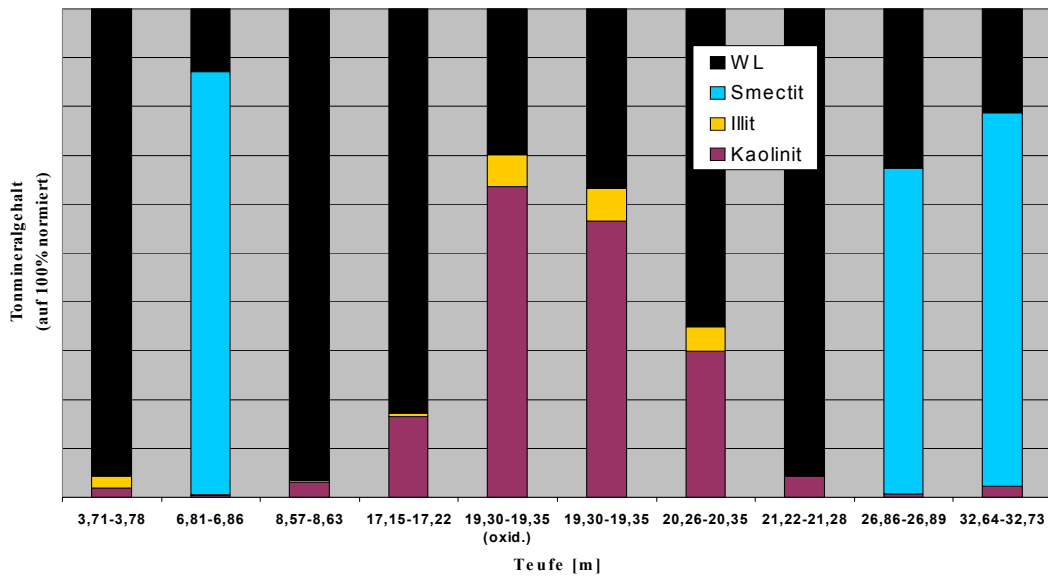


Abb. 2.4.6: Semiquantitative Auswertung von Tonmineralanalysen der Bohrung NA4

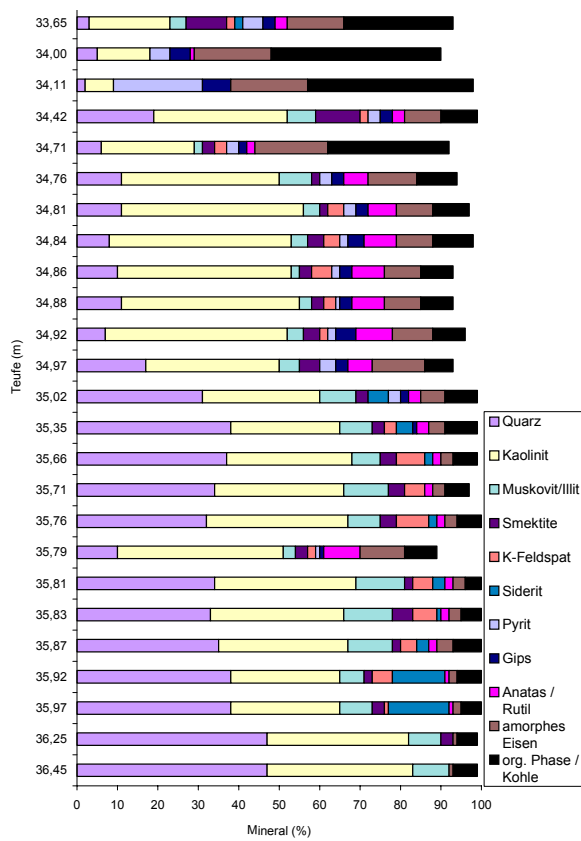


Abb. 2.4.7: Semiquantitativer Mineralbestand ausgewählter Sedimentproben der Bohrung NA5 (nach Unterlagen des NRI). Auffällig sind die gegenüber NA4 geringen Smektit-Gehalte

Tab. 2.4.1: Röntgendiffraktometrisch ermittelter Mineralbestand von Sedimentproben der Bohrung NA4 - Kurzform

Mineral	Chem. Formel	03.71-03.78	04.33-04.37	06.81-06.86	08.57-08.63	11.64-11.75	17.15-17.22	19.30-19.35a	19.30-19.35b	20.26-20.35	21.22-21.28	25.00-25.10	26.86-26.89	32.45-32.55	32.64-32.73	33.28-33.33	33.74-33.78	34.18-34.22	34.30-34.34	34.50-34.68	34.71-34.76	34.88-34.93	35.47-35.51	35.84-35.88	36.02-36.07	36.39-36.44	36.49-36.54	36.64-36.69	37.18-37.23	37.50-37.55	37.55-37.67	37.67-37.22	37.92-37.97	38.19-38.22	38.22-38.27	38.30-38.35								
Anatas/Rutil	TiO <sub>2</sub>	X		X					X											X																			X					
Kohlenstoff	C		X		X		X														X																		X					
Gismondin	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ·4H <sub>2</sub> O				X																																							
Illit	u.a. KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>		X							X				X							X																							
Kaolinit	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>					X		X													X																			X				
Montmorillonit	Na <sub>x</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·zH <sub>2</sub> O u.ä.	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Muskovit	u.a. (K,Na)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si <sub>3,1</sub> Al <sub>0,9</sub> )O		X									X																													X			
Nontronit	Na <sub>0,3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O						X									X																												
Pyrit/FeS	FeS <sub>2</sub>	X			X		X														X																							
Quarz	SiO <sub>2</sub>	X		X	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Siderit	FeCO <sub>3</sub>	X	X			X		X	X												X																							
Ba-U-Oxide	Ba <sub>3</sub> UO <sub>6</sub> (U VI)																																											
Fourmarierit	PbU <sub>4</sub> O <sub>13</sub> ·4H <sub>2</sub> O (U VI)																																											
Na-U-Oxide	Na <sub>2</sub> UO <sub>4</sub> (U VI)																																											
Schoepit	UO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O (U VI)																																											
Uraninit	UO <sub>2,25</sub> (U IV)																																											

Vulkanische Gläser sind thermodynamisch instabil und wandeln sich daher schneller als alle sonst in Pyroklastika enthaltenen Mineralphasen um. Dadurch sind besonders schnelle und umfangreiche diagenetische Veränderungen, wie in den vorliegenden Schliffen, begünstigt. Bei Tuffiten spielt darüber hinaus der stark variierende Gehalt an detritogenem Material eine Rolle; insbesondere kann der Tongehalt nicht eindeutig vulkanischer Asche, „herkömmlichen“ Sedimenten oder neuen autigenen Mineralphasen zugeordnet und daher in Dünnschliffbeschreibungen lediglich durch seine Korngröße bezeichnet werden.

Im Zuge der Diagenesevorgänge führen beispielsweise Hydratation und die begleitende Glasumwandlung dazu, dass einige Elemente aus dem Glas in die Porenwässer übergehen. Durch das Lösen von Glaspartikeln entstehen dabei neue Poren- und Hohlräume, die wiederum von neuen Mineralen aus den sekundär entstandenen Lösungen ausgefüllt werden können.

Aber auch vor Beginn der Diagenese sind Glas- und Mineralanteile von pyroklastischen Gesteinen durch erste Verwitterungsprozesse und Transport schon zahlreichen Veränderungen unterworfen, die praktisch nicht von den späteren diagenetischen Prozessen nach der endgültigen Sedimentation abzugrenzen sind. Dies gilt insbesondere unter warmen und feuchten Klimabedingungen.

Bezogen auf den Standort Ruprechtov und den dort stattgefundenen Vulkanismus sind im wesentlichen Pyroklastika und Vulkanoklastika (Basaltoide mit Leucit des Doupovské hory - Stratovulkans, ggf. auch Sodalith und Nephelin als Hauptfeldspatvertreter aus dem Böhmisches Mittelgebirge) zu erwarten, darüber hinaus (in geringerem Umfang) für Granite typische Minerale, die detritogen herangeführt wurden, also verschiedene Feldspäte, Quarz und Glimmerminerale. Sie stammen wahrscheinlich vorwiegend aus den jüngeren variskischen Graniten des Karlovy Vary- und Horsky- Typs aus der Umgebung.

Ein Großteil der Minerale dieser Ursprungszusammensetzung dürfte bereits umgebildet und/oder anderweitig diagenetisch verändert sein; dies gilt insbesondere für die Glasanteile und ebenfalls für Feldspäte, die nur äußerst selten erhalten sind. Als erste Veränderung tritt normalerweise eine Umwandlung vulkanischer Gläser zu Palagonit auf. Dies ist mit einem Farbwechsel von durchsichtig bis blassgelb bei Sideromelan zu dem intensiver gelben bis braunen Palagonit verbunden, wobei die

Umwandlung an Korngrenzen oder an Rissen beginnt. Die Palagonitisierung ist mit einer Gewichtsprozentzunahme an Wasser von 10% bis 20% durch Hydratation, Eisenoxidation (meist von FeO zu Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sowie mit einer Verringerung des Calcium- und Natriumgehaltes verbunden. Bevor als häufiges Endprodukt der Umwandlung von vulkanischen Gläsern der relativ stabile Chlorit entsteht, kommt es durch die fortschreitende Diagenese zunächst zur Bildung von Schichtsilikaten, hier insbesondere Smectiten. Weitere Bildungen sind Zeolithe, Opal, Karbonate, Eisen-Mangan-Oxide oder -Karbonate und selten Gips.

Ein wesentlicher Faktor für die Lösung und Umwandlung der vulkanischen Gläser ist der pH-Wert des vorhandenen Porenwassers. So werden die Lösung von Aluminium aus Gläsern und die Entstehung von Zeolithen durch pH-Werte > 9 begünstigt /BÖH 00/. Der in Proben der Bohrung NA4 festgestellte Gehalt an Tonmineralen (s. o.) ist vermutlich zu einem wesentlichen Teil auf die beschriebenen Umwandlungsprozesse zurückzuführen.

Die Entstehung von Bentoniten in vulkanischen Aschen und Tuffen findet im wesentlichen in situ statt. Dieser Ursprung kann unter dem Mikroskop u. a. am Charakter der Nicht-Tonminerale erkannt werden. Hierzu gehören zunächst die hohen Konzentrationen an Tonmineralen selbst, sowie die weitgehende Abwesenheit von verwitterten Mineralen.

Während die Bildung in flachmariner Umgebung am häufigsten ist, kommen jedoch auch Bildungen in lacustrinem Süßwasserbereich vor. Darüber hinaus ist auch die Entstehung in kohlebildendem Umfeld aus Australien und Kanada bekannt. Die Bildungsbedingungen im Projektgebiet könnten somit eine Kombination aus lacustrinem Flachwassermilieu und dem kohlebildendem Umfeld darstellen /BÖH 00/.

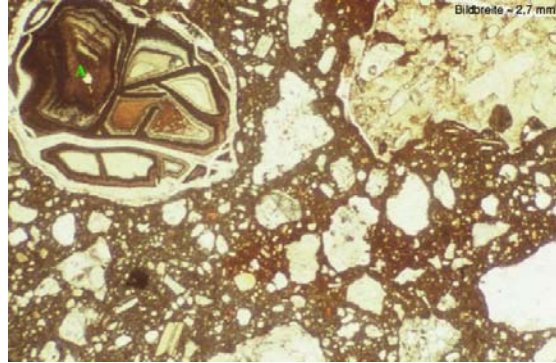
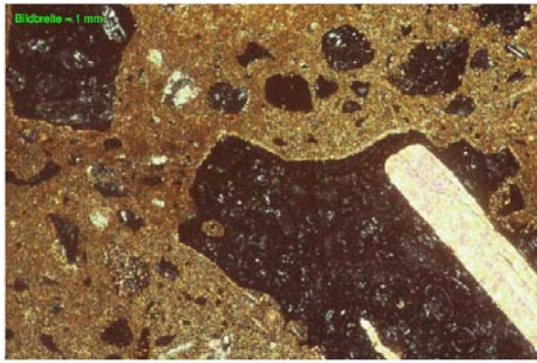
Während das Milieu für die Möglichkeit der Entstehung offensichtlich eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials für die Art der entstehenden Bentonite und die Begünstigung ihrer Entstehung von zentraler Bedeutung. So sind hohe SiO<sub>2</sub>-Gehalte ungünstig, während ein mittlerer Gehalt an MgO die Bentonitisierung begünstigt. Diese Bedingungen treffen bis auf den Gehalt an detritogenen Quarzen auf die untersuchte, vulkanogene Materialzusammensetzung der Dünnschliffe und der Durchlässigkeitsversuche weitgehend zu. Ebenso begünstigen wahrscheinlich die Transport- und Ablagerungsbedingungen der vulkanischen Asche die Bentonitentstehung.

## Ausgewählte Dünnschliffe

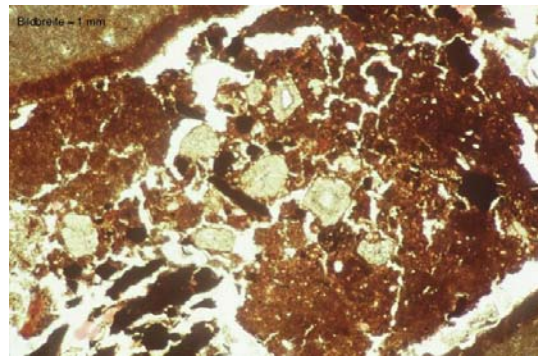
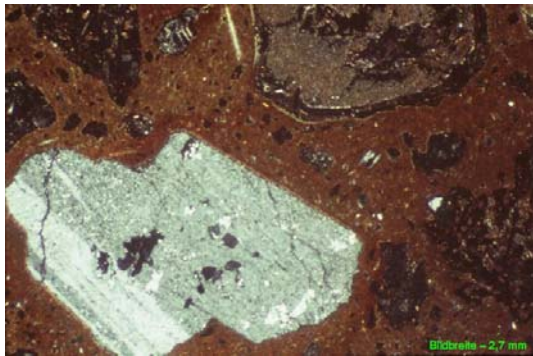
Zu den eindeutig bestimmbar Mineralanteilen, die in Tab. 2.4.2 aufgelistet sind, kommen viele mögliche Bildungen hinzu, die mittels Mikroskop nicht gesichert zu bestimmen sind. So zeigen mehrere Schliffe gelblich-orange bis braune Verfärbungen insbesondere in glasigen oder tonigen Bereichen, die auf die Bildung von Palagonit aus den basaltischen Gläsern (z. B. Sideromelan und selten Tachylit) hindeuten. Die Brechungsindizes der vielfältig vorhandenen Gesteinsgläser liegen nahe beieinander. Aufgrund der fast überall beginnenden bis fortgeschrittenen Umwandlung ist es nicht möglich, diese eindeutig zuzuordnen. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein Teil des Tongehalts durch bereits abgelaufene Umwandlungsprozesse aus den Gläsern und Feldspäten entstanden ist.

**Tab. 2.4.2:** Überblick über analysierte Dünnschliffe an Sedimentproben der Bohrung NA4 (nach /BÖH 00/, modifiziert)

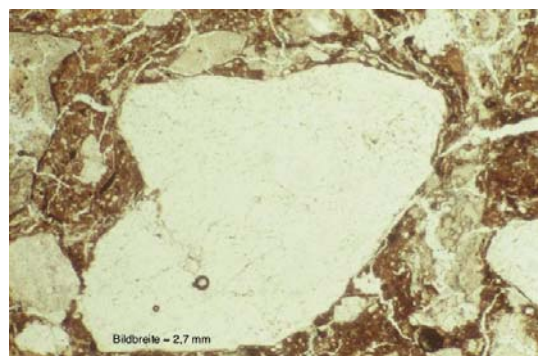
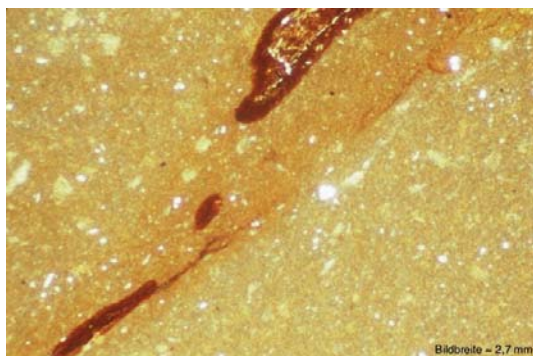
Schliff-Nr.	Teufe [m]	Schliff-Charakteristika
1	3,66	tonig-siltige Matrix, glasige Körner, Glaukonit, Pyroxen, Gipssäume, Quarz, Biotit
2	4,70	Komponenten, tonige Matrix, Muskovit, Biotit, Quarz, Amphibol, Pigeonit mit Augitentmischungsstrukturen
3	5,55	Komponenten, tonige Matrix, Oxyhornblende, Feldspat, verwitterter Nephelin, Quarz
4	7,50	>90 % Quarz (eckig - kantengerundet), Fuchsit, Mikroklinpertith
5	8,10	Ton, inkohlte Pflanzenreste, Quarz, Muskovit, Dolomit
6	11,70	Siderit, inkohlte Pflanzenreste, Quarz
7	14,55	Glaspartikel, Tonmatrix, Pigeonit, Quarz
8	20,30	70 % glasige Komponenten, Tonmatrix, Titanit, Quarz, Limonit, Cummingtonit
9	21,25	fast ausschließlich glasige Komponenten, Titanit, Granatparamorphosen, Pyritwürfel
10	22,30	Zeolith, Quarz, Perthit, Nephelin
11	29,65	80 % Tonmatrix, eckige Quarze, Glaspartikel, Mikroklin



**Abb. 2.4.8:** Dünnschliff 1 (links): Glasstuffit mit toniger Matrix; Dünnschliff 2 (rechts): Glas- bis Kristalltuffit mit toniger Matrix

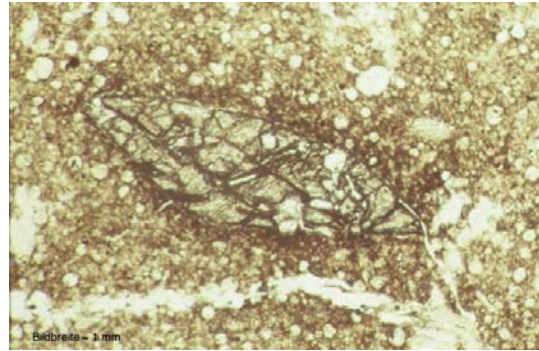
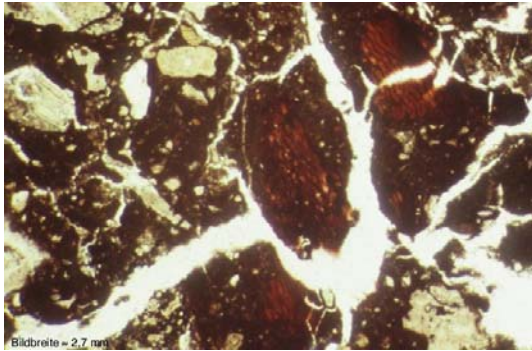


**Abb. 2.4.9:** Dünnschliff 3 (links): verzwilligter Feldspat in Tonmatrix und Glasfragmenten; Dünnschliff 4 (rechts): inkohlte Pflanzenreste und Dolomitekristalle in Tonmatrix

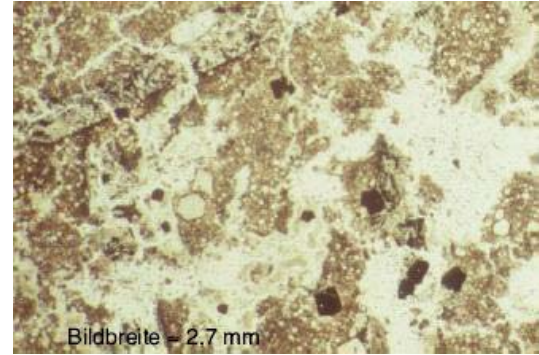
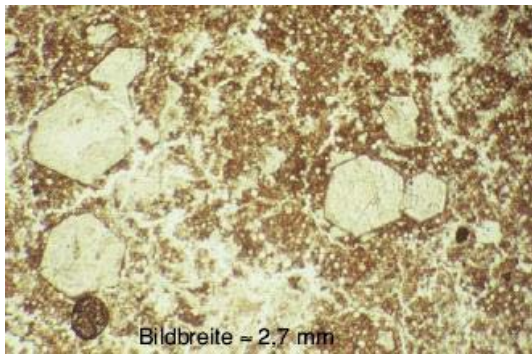


**Abb. 2.4.10:** Dünnschliff 6 (links): Siderit mit Limonit (dunkel) und feinverteilten Quarzen; Dünnschliff 7 (links): Pigeonit zwischen überwiegend glasigen Komponenten

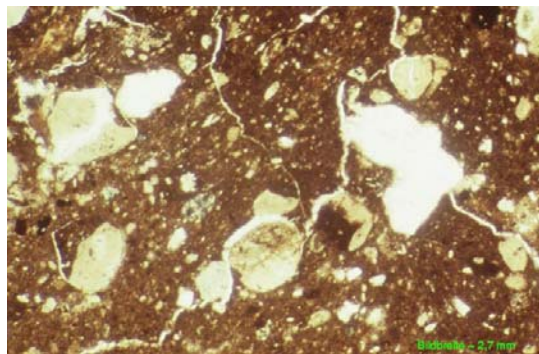
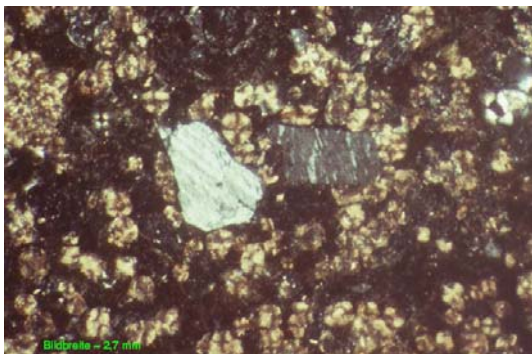




**Abb. 2.4.11:** Dünnschliff 8 (links): Biogene Fragmente in Tonmatrix mit Glasfragmenten; Dünnschliff 9 (rechts): Titanit in Glastuffit



**Abb. 2.4.12:** Dünnschliff 9 (Ausschnitte): Granate und Pyrit



**Abb. 2.4.13:** Dünnschliff 10 (links): Perthit in sphärolithischem Glastuffit; Dünnschliff 11 (rechts): Tonmatrix mit unreinen, eckigen Quarzen

### 2.4.3.2 Mineralogische Detailuntersuchungen im Urananreicherungshorizont

Aus dem tieferen Bereich der Bohrungen NA4 und NA5 sind ausgewählte Proben einer detaillierteren mineralogischen Untersuchung unterzogen worden, um Informationen über die Art der Uranbindung zu erhalten. Die untersuchten Kernsegmente sind in Tab. 2.4.3 aufgelistet. Die Probe NA4-1 diente als „nichtaktive“ Referenzprobe, alle anderen Proben stammen aus Bereichen, in denen mittels Gammaskopie Aktivitätsanomalien festgestellt worden sind.

**Tab. 2.4.3:** Probenauswahl für mineralogische Detailuntersuchungen

NA4		NA5	
NA4-1	33,33 - 33,38 m	NA5-1	34,55 - 34,60 m
NA4-2	34,93 - 34,98 m	NA5-2	35,05 - 35,10 m
NA4-3	36,44 - 36,49 m		
NA4-4	37,80 - 37,88 m		
NA4-5	37,92 - 37,97 m		
NA4-6	37,97 - 38,02 m		

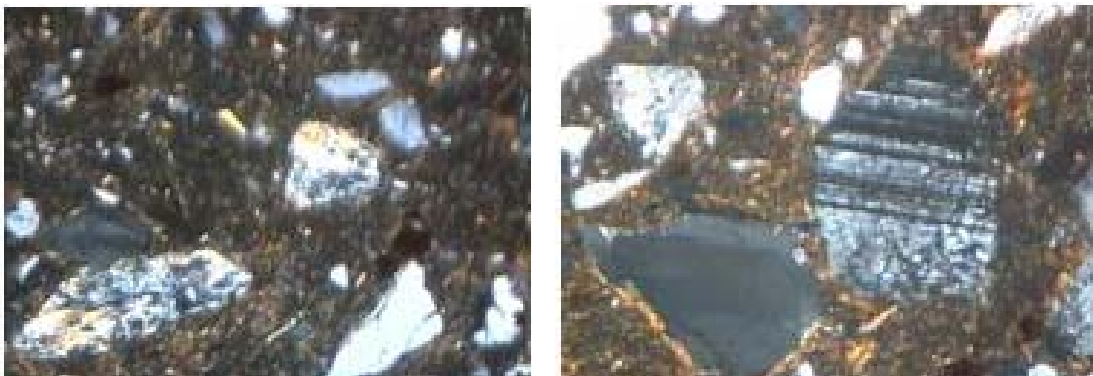
Alle untersuchten Proben variieren in Farbe und Textur. Die meisten von Ihnen ähneln pyroklastischen Agglomeraten. Sie bestehen aus kugeligen Aggregaten von Tonmineralen bis zu 1 cm Durchmesser und grauer, grün-grauer, beiger, brauner und türkiser Farbe (Abb. 2.4.14).

In Abb. 2.4.15 ist zu erkennen, dass Körner und kantige Fragmente von Quarz verstreut in der tonigen Matrix vorliegen. Der Quarzanteil variiert von Probe zu Probe. Frische Proben sind weich und zeigen einen Wachsglanz, der beim Trocknen der Proben verschwindet. Im Verlauf des Trocknens werden die Proben spröde und mit Haargips und Sylvin beschichtet.





**Abb. 2.4.14:** Ausschnittsphoto der Probe NA4-4 mit Tonmineralen

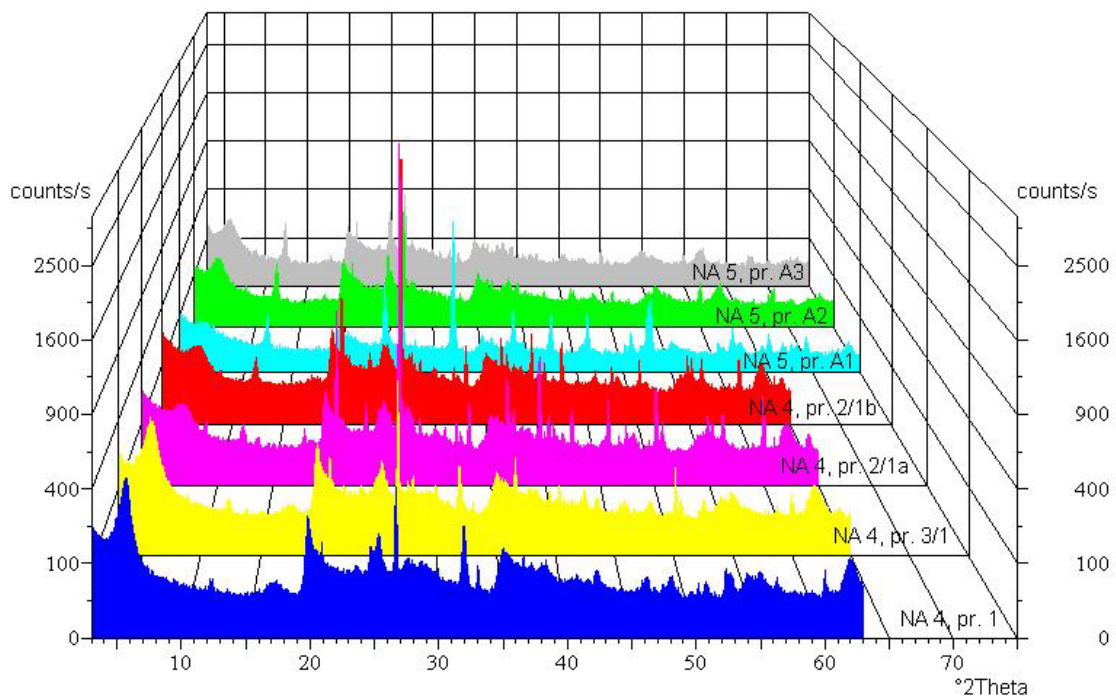


**Abb. 2.4.15:** Mikroskopische Aufnahmen der Probe NA4-4: Kantige Körner bestehen aus Quarz und kalonisiertem Feldspat, der Hintergrund aus Tonmineralen (links); das rechte Bild zeigt ein kantiges Quarzkorn (links unten) sowie einen verzwillingten Plagioklas in einer Tonmatrix (Vergrößerung: 10x)

Quarz kommt in einer Reihe von Proben sehr häufig vor. Die Farbe der Quarzkörner variiert von farblos über bräunlich, zitronengelb bis nahezu schwarz. Pyrit, silbrige Glimmer und weiße Feldspatkörner können in allen Handstücken unterschieden werden. In einigen Proben treten Sideritknollen und schwarze Streifen von unregelmäßigen Aggregaten organischer Materie auf. Einige Proben weisen eine deutliche Porosität auf.

Dünnschliffe wurden von den Proben NA4-6 und NA5-2 angefertigt. Unter dem optischen Polarisationsmikroskop bestehen diese Proben aus einer feinkörnigen, bisweilen gestreiften tonigen Matrix. Winzige Glimmerschuppen weisen aufgrund ihrer Verwitterung geringe Interferenzfarben auf. Seltene Biotit-Blättchen zeigen einen schwachen Pleochroismus, der auf eine Alteration des Biotits hinweist.

Unter dem optischen Mikroskop lassen sich Konturen der primären Gesteinsbestandteile erkennen, höchstwahrscheinlich handelt es sich dabei um Überreste von vulkanischem Glas und verwitterten Feldspäten. In einer Probe der Bohrung NA5 konnten Pseudomorphosen von Kaolinit nach Feldspat beobachtet werden. Die spezielle Form zahlreicher Quarzkörner (scharfkantig mit Einbuchtungen) ist typisch für pyrogenen (vulkanoklastischen) Quarz. Moosaikartige oder wellenförmige Extinktion von Licht in Quarzkörnern deutet auf einen plötzlichen Temperaturabfall während der Abkühlungsphase der pyroklastischen Gesteine hin.



**Abb. 2.4.16:** Röntgendiffraktogramme von Sedimentproben der Bohrungen NA4 und NA5. Die basalen Peaks von Smektit und Kaolinit treten bei ca. 5-6° bzw. 20° 2θ auf. Die mittels XRD identifizierten Minerale sind in Tab. 2.4.4 aufgelistet („pr.“ = Teilprobe „TP“)

Tonminerale dominieren den Mineralbestand in allen untersuchten Proben, unterscheiden sich jedoch im Verhältnis von Smektit, Kaolinit und Glimmer. Quarz ist, wie schon oben beschrieben, in allen Proben, jedoch unterschiedlichen Mengen vorhanden.

**Tab. 2.4.4:** Röntgendiffraktometrisch ermittelte Mineralbestände

Probe	Teil-Probe	Ton-Mineraie	Quarz	Feld-späte	Karbonat Sulfide	Ti-Oxide	Sonst. Minerale
NA4-1	TP1	Überw. Smektit, gering Kaolinit	ger. Mengen	K-Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	
	TP2	Smektit, Spuren von Glimmer	Spuren	Feldspat-Spuren	Siderit, Pyrit		
	TP3/1	Smektit, etwas Kaolinit & Glimmer	vorh.	Alkali Feldspäte	Siderit, Pyrit	Anatas	
NA4-2	TP2/1a	Smektit, Kaolinit, Glimmer	häufig	K-Feldspäte	Pyrit, Siderit	Anatas	Uraninit? Gips
	TP2/1b	Smektit, Kaolinit, Glimmer	häufig	Alkali-Feldspäte	Pyrit, Siderit	Anatas	Uraninit? Gips
NA4-3	TP3/1a	Kaolinit, Glimmer, Smektit und/oder Wechsellagerung	vorh.	K-Feldspäte	Pyrit, Siderit u. Goethit	Anatas	Uraninit? Gips
	TP3/1b	Kaolinit, Glimmer, Smektit-Spuren	vorh.	Alkali Feldspäte	Viel Pyrit	Beim. von Anatas	Uraninit?
	TP3/1c	Kaolinit, Glimmer, Smektit-Spuren	vorh.	K-Feldspäte	Pyrit, Siderit-Spuren	Beim. von Anatas	Uraninit?
	TP3/1d	Kaolinit, Smektit, Glimmer	vorh.		Beim. von Ppyrit	Anatas	
NA4-4	TP1/1	Kaolinit, Smektit, Glimmer	vorh.	Alkali Feldspäte	Siderit, Pyrit	Anatas	
	TP1/2	Kaolinit, Smektit, Glimmer	vorh.	K-Feldspat	Siderit, wenig Pyrit	Anatas	
	TP1/3	Kaolinit, Smektit, Glimmer	vorh.	K-Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	
NA4-6	TP4/1a	Kaolinit, Glimmer, wenig Smektit	häufig	Alkali-Feldspäte	Siderit, Pyrit-Spuren	Anatas	Uraninit?
	TP4/1b	Kaolinit, Smektit und/oder Wechsel-lagerung I/S	wenig		Siderit, Pyrit	Anatas	
	TP4/1c	Kaolinit, Smektit und/oder Wechsel-lagerung I/S, Glimmer-Spuren	vorh.	K-Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	Uraninit?
NA4-5		Kaolinit, Smektit	vorh.	Alkali Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	etwas Hämatit
NA5-1	TP-A1	Kaolinit, Smektit, Glimmer-Spuren	wenig		haupts. Siderit,		
	TP-A2	Smektit, Kaolinit, wenig Glimmer	vorh.	K-Feldspat	wenig Pyrit	Anatas	
	TP-A3	Smektit, Kaolinit, wenig Glimmer	vorh.	K-Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	
NA5-2	TP-B1	Kaolinit, Glimmer, Smektit	häufig	Alkali Feldspäte	Siderit	Anatas	Gips
	TP-B2	Kaolinit, wenig Glimmer & Smektit	häufig	K-Feldspat	Siderit, Pyrit	Anatas	Gips
	pr.B3	Kaolinit, wenig Glimmer & Smektit	vorh.	K-Feldspat	Pyrit, Siderit	Anatas	Gips

Smektite: Die röntgendiffraktometrisch ermittelten Daten sind typisch für Ca-Na-Montmorillonite, wobei die Größe der Kristallite gering ist. Bei einigen Smektiten

handelt es sich höchstwahrscheinlich um eine Wechsellagerung von Illit und Smektit. In den Proben der Bohrung NA4 dominiert Smektit gegenüber Kaolinit bis zu einer Tiefe von etwa 35 m. In einzelnen Teilproben der Probe NA5-1 überwiegt teilweise Kaolinit, teilweise Smektit, in Probe NA5-2 dominiert eindeutig Kaolinit.

Kaolinit: In den meisten Proben liegt Kaolinit in mittel- bis gutgeordneter Struktur vor, d. h. nahezu 1Tc-Polytyp. In den Teilproben TP 4/1b und A3 dagegen liegt der Kaolinit in ungeordneter Struktur (1Md-Typ) vor.

Glimmer: Glimmer tritt in geringen Mengen oder Spuren in Form winziger Plättchen auf. Die röntgendiffraktometrischen Daten deuten auf feinkörnigen Muskovit hin, Biotit kann zumindest in einigen Proben nicht ausgeschlossen werden.

Einige Proben wurden zur detaillierteren Charakterisierung der Tonminerale als orientierte Proben präpariert (NA4-1, TP1 / NA4-2, TP2/1b / NA4-4, TP1/2 / NA5-1, TP-A2) und dabei mit Glykol behandelt. Es ist ein deutlicher und symmetrischer Peak im Röntgendiffraktogramm der Teilprobe NA4-1, TP1 bei 15,0 Å festzustellen. Darüber hinaus gibt es einen schwächeren, aber scharfen Kaolinit-Peak bei 7,16 Å und einen sehr schwachen Glimmer-Peak bei 9,97 Å. Außerdem sind Peaks von Anatas, Siderit und Pyrit zu beobachten. Ein hoher und oszillierender Hintergrund im Röntgendiffraktogramm ist zumindest teilweise auf die Kristallinität des Smektit zurückzuführen. Das Röntgendiffraktogramm der Glykol-behandelten Teilprobe hat gezeigt, dass keine Tonmineral-Wechsellagerungen vorliegen.

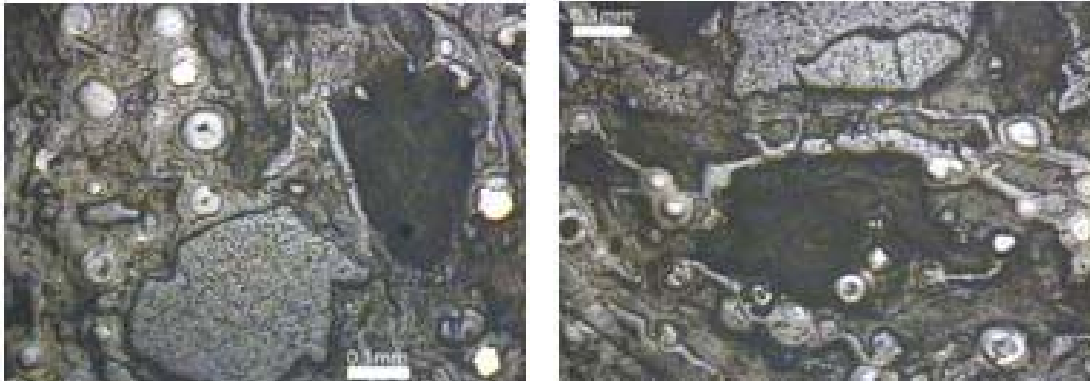
In der Teilprobe NA4-4, TP1/2 ist der deutlichste Peak bei 7,2 Å dem Kaolinit zuzuordnen, Smektit- und Glimmer-Peaks sind deutlich schwächer ausgebildet. Der basale Smektit-Peak bei 15,2 Å ist breit ausgebildet und leicht asymmetrisch, was auf einen geringen Anteil an Illit/Smektit-Wechsellagerungen hinweist.

Teilprobe NA5-1, TP-A2 weist bei 15,4 Å einen deutlichen, scharfen und symmetrischen Montmorillonit-Peak auf. Der Kaolinit-Peak bei 7,2 Å ist der stärkste im gesamten Röntgendiffraktogramm, ein schwacher Peak bei 10,0 Å lässt sich dem Glimmer zuordnen.

Kalium- und Alkali-Feldspäte sind deutlich mit Kaolinit assoziiert. Es besteht kein Zweifel daran, dass Kaolinit ein Verwitterungsprodukt der Feldspäte darstellt.

Quarz kommt in nahezu allen Proben als farbloses, transparentes, graues bis fast schwarzes, teilweise gebändertes Mineral vor. Die schwarze Färbung mancher Quarzkörner kann durch die Verschiebung eines bedeutenden Quarz-Peaks verursacht sein, die wiederum auf Punkt-Defekte durch Bestrahlung zurückzuführen ist.

Anatas ist ein verbreiteter Nebenbestandteil aller Proben. In Ergänzung zu Siderit konnte in einigen Proben auch Ankerit ( $(\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2)$ ) identifiziert werden.



**Abb. 2.4.17:** Reflexionsmikroskopische Aufnahmen der Probe NA4-4 mit Siderit-Knollen und Pyritsphäroiden (helle Kugeln - links) bzw. verwitterten Pyritsphäroiden in einer Matrix aus Tonmineralen und organischem Material (rechts)

Aufgrund der Überlappung von Diffraktionspeaks mit denen des in vielen Proben häufig vorkommenden Pyrit ist die Identifikation von Uraninit nicht schlüssig und entsprechende Angaben in Tab. 2.4.4 nur mit entsprechender Vorsicht zu verwenden.

### 2.4.3.3 Autoradiographie und Gamma-Spektrometrie

Zwei Proben aus der Bohrung NA4 (NA4-2: 34,93-34,98 m bzw. NA4-6: 37,97-38,02 m) sind einer Autoradiographie unterzogen und zuvor mittels hochauflösender Gamma-Spektrometrie unter Verwendung eines Germanium-Detektors analysiert worden. Der Unterschied in der spezifischen Aktivität beider Proben ist signifikant. Wie aus vorhergehenden Untersuchungen bekannt, stellen  $^{238}\text{U}$  und die übrigen Nuklide dieser Zerfallsreihe die Hauptquelle der Aktivität in beiden Proben dar, während  $^{232}\text{Th}$  eine vernachlässigbare Rolle spielt. (Tab. 2.4.5)

**Tab. 2.4.5:** Konzentration von Radionukliden in Proben der Bohrung NA4

	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra	<sup>214</sup> Bi	<sup>214</sup> Pb	<sup>212</sup> Pb	<sup>212</sup> Bi	<sup>210</sup> Pb	<sup>234</sup> Th	<sup>40</sup> K
NA4-2	52±5	12±1	55±1	49±1	9±1	9±1	38±3	27±2	46±3
NA4-6	403±24	33±2	249±6	218±5	24±1	22±3	338±20	358±12	69±6
Lithos*	10-50	7-50							100-700

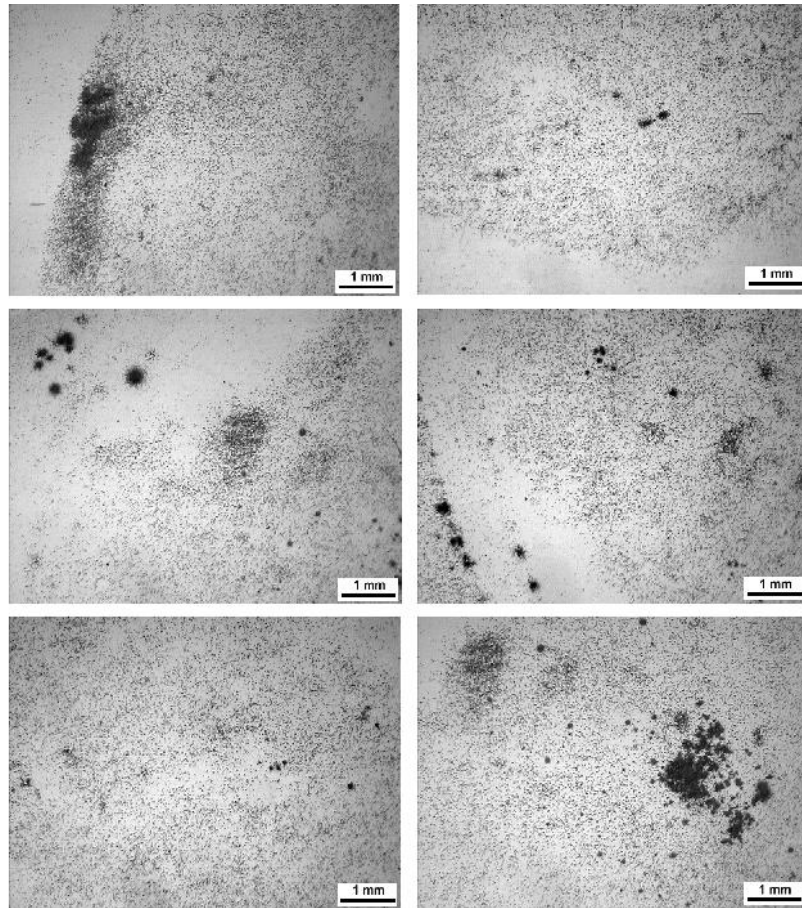
\*Typische Werte für die Lithosphäre in Anlehnung an UNSECEAR (1982)

Mittels einer speziellen CR39-Platte sind beide Proben auf einer glatten Schnittfläche und über einen Belichtungszeitraum von 8 Monaten auf Spuren von Alpha-Teilchen hin untersucht worden. Im Ergebnis sind eine Reihe von Spots festzustellen, die durch Spuren von Alpha-Strahlern, d. h. lokalen Urananreicherungen (wahrscheinlich Uranminerale), verursacht sind (Abb. 2.4.18). Unter einem optischen Mikroskop stellen sich diese Spuren oval oder sphärisch dar.

#### 2.4.3.4 Mikrosonden-Analysen

Die Proben, an denen mittels Autoradiographie das Vorhandensein von Alpha-Strahlern nachgewiesen worden ist, wurden auch mit Hilfe einer Mikrosonde analysiert. Allerdings konnten weder mittels Energy Dispersive Xray Spectroscopy (EDS) noch über Back Scattered Electron (BSE) Aufnahmen Uranminerale nachgewiesen werden. Wahrscheinlich liegt die Größe der Uranminerale unter der Nachweisgrenze der Mikrosonde.

Eine qualitative EDS-Analyse wurde auch an Siderit durchgeführt. Siderit tritt in Form zonierter Knötchen und Kugeln bis zu 300 µm Durchmesser auf. EDS-Spektren der Kugel-Kerne zeigt signifikante Fe- und schwächere Ca- und Mn-Peaks. Der äußere Rand der Kugeln enthält Fe und Ca, aber kein Mn. In beiden Zonen konnten weder U noch Th nachgewiesen werden.

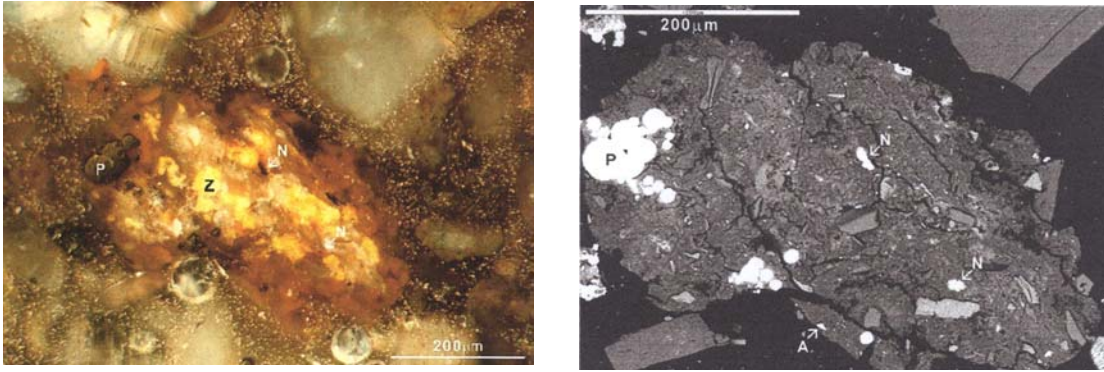


**Abb. 2.4.18:** Autoradiographie-Aufnahmen der Proben NA4-2 (oben) und NA4-6 (Mitte und unten) mit Verteilung der Spuren von Alpha-Strahlern

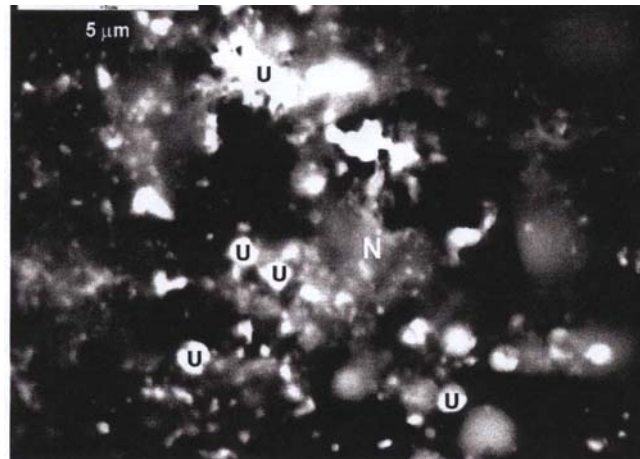
### 2.4.3.5 Rasterelektronenspektroskopie mit EDS

Vom tschechischen NRI wurden Proben des Bohrkerns NA5 aus dem Bereich der höchsten Urananreicherung (34,9 m Teufe) mittels Rasterelektronenspektroskopie und Mikrosonde analysiert. Die Proben zeigen eine heterogene Struktur. In diesen Proben, deren Urangelhalte etwa zehnmals höher als die höchsten Urangelhalte in der Bohrung NA4 waren, konnten erstmalig Uranminerale nachgewiesen werden. Abb. 2.4.19 zeigt mikroskopische Aufnahmen einer Dünnschliffprobe mit Ningyoiit-Mineralen. Die Minerale befinden sich in direkter Umgebung von Pyrit und Apatit. Ebenso wurden Spuren von Uraninit (vgl. Abb. 2.4.20) gefunden. Zippeit als U(VI)-Mineral ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit durch Oxidation der Probe mit Luftsauerstoff entstanden, stellt also kein autogenes Mineral dar. Der Element-Nachweis erfolgte durch Energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDS).





**Abb. 2.4.19:** Mikroskopische Aufnahmen von verwitterten vulkanoklastischem Material aus dem Bereich des NA5-U-Peaks mit Pyrit-Knollen (P) und Ningyoit-Mineralenkörnern (N), sowie Zippeit (Z) und autogenem Apatit (A). links: reflektiertes Licht; rechts: reflektierte Elektronen



**Abb. 2.4.20:** REM-Bild reflektierter Elektronen mit Uranoxid- (U) und Ningyoit- (N) Mineralen in einer Dünnschliffprobe aus dem Bereich mit höchstem Urangehalt der Bohrung NA5; maximale Vergrößerung

#### 2.4.3.6 OTA (Oxyreactive Thermal Analysis) Untersuchungen an organischem Material der Bohrung NA4

Die Ergebnisse der OTA-Analysen an Sedimentproben der Bohrung NA4 zeigen einen niedrigen Grad diagenetischer Veränderung an organischem Material, das demzufolge zwischen Torf und Weichbraunkohle einzustufen ist.

Organisches Material der Probe NA4-1 weist den niedrigsten Inkohlungsgrad auf. Seine Reaktivität mit Sauerstoff bei erhöhten Temperaturen entspricht Torf oder



lignitischer Braunkohle. Material der Probe NA4-2 weist einen höheren Inkohlungsgrad auf (Peak der DTA-Kurve bei 340-350°C). Die darunterliegende Probe NA4-3 zeigt eine ähnliche Oxyreaktivität; ein zusätzlicher Peak auf der DTA-Kurve bei 420°C kann aber als Beweis für eine fortgeschrittene Inkohlung herangezogen werden. Ein derartiger Prozess ist typisch für Braunkohlen.

Die Unterschiede im Inkohlungsgrad des organischen Materials in der Bohrung NA4 lassen sich nicht durch die unterschiedlichen Teufen erklären, aus denen die Proben stammen; hierzu sind die Teufenunterschiede zu gering. Möglicherweise resultieren die beobachteten Unterschiede im Inkohlungsgrad aus unterschiedlichen Oberflächen des unterschiedlich dispersiv verteilten organischen Materials.



**Abb. 2.4.21:** Handstück der Probe NA5-1: der obere, dunkle Teil der Probe ist reich an organischem Material

#### **2.4.3.7 Diskussion der Ergebnisse**

Die Handstücke der untersuchten Proben sind insgesamt sehr heterogen. Abgesehen von unterschiedlichen Farben und Texturen zeigen jedoch alle eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung. Die bedeutendsten Unterschiede bestehen in den relativen Verhältnissen der Hauptkomponenten. Im unteren Bereich der Bohrung dominiert Kaolinit vor allen anderen Tonmineralen; demgegenüber ist Smektit besonders häufig in geringeren Tiefen. Kaolinit ist offensichtlich das Produkt der chemischen Verwitterung von Feldspäten des unterlagernden Granits. Smektit ist wahrscheinlich durch Alteration vulkanischer Gläser in den pyroklastischen Sedimenten entstanden.

Die Anwesenheit von organischem Material, Siderit und Pyrit kann als Beweis für das Vorhandensein reduzierender Bedingungen in den Sedimenten dienen. Obwohl keine klare Korrelation zwischen organischem Material und dem Auftreten von Alpha-Strahlern zu erkennen ist, haben die reduzierenden Bedingungen eine Ausfällung von U(IV)-Mineralen erlaubt. Aus den Porenlösungen der Proben durch Verdunstung ausgefallter Gips weist darauf hin, dass die Porenwasserzusammensetzung durch partielle Oxidation von Pyrit beeinflusst ist. Die Anwesenheit von Pyrit ist insofern von Bedeutung, als er wahrscheinlich eine Rolle als Redox-Puffer beim Kontakt mit oxidierten Wässern spielt. Im Zuge dieses Prozesses wandelt sich Pyrit in Goethit und Hämatit um, was das Auftreten roter Flecken in manchen Proben erklärt. Relikte von Pyrit, umgeben von roten oder dunkelbraunen Halos konnten in einigen Proben beobachtet werden.

Die Autoradiographie-Untersuchungen haben in zwei Proben einige „hot spots“ aufgedeckt. Dies ist ein direkter Nachweis für die Anwesenheit von Uran-Mineralen, die +/- zufällig im Sediment verteilt sind. In einigen Probenbereichen jedoch treten die „hot spots“ in länglicher Form und orientiert auf, was als Hinweis darauf interpretiert werden kann, dass sie mit Uranmineralen assoziiert sind, die an Schichtflächen von Tonmineralen ausgefällt worden sind.

#### **2.4.3.8 Schlussfolgerungen**

Die Autoradiographie hat sich als ein geeignetes, wenn auch zeitaufwendiges Instrumentarium zur Feststellung selbst geringster Radionuklid-Spuren erwiesen. Dieses Verfahren sollte deshalb in Zukunft an einer breiteren Probenauswahl durchgeführt werden, um evtl. Korrelationen von Radionuklidanreicherungen mit bestimmten Mineralen oder Texturmerkmalen erkennen zu können. Eine Analyse von Zonen, die Urananreicherungen benachbart sind, kann dabei Informationen darüber liefern, ob eine Migration von Radionukliden stattgefunden hat. Alle bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in den Proben herrschenden reduzierenden Bedingungen eine signifikante Migration von tetravalentem Uran verhindert haben.

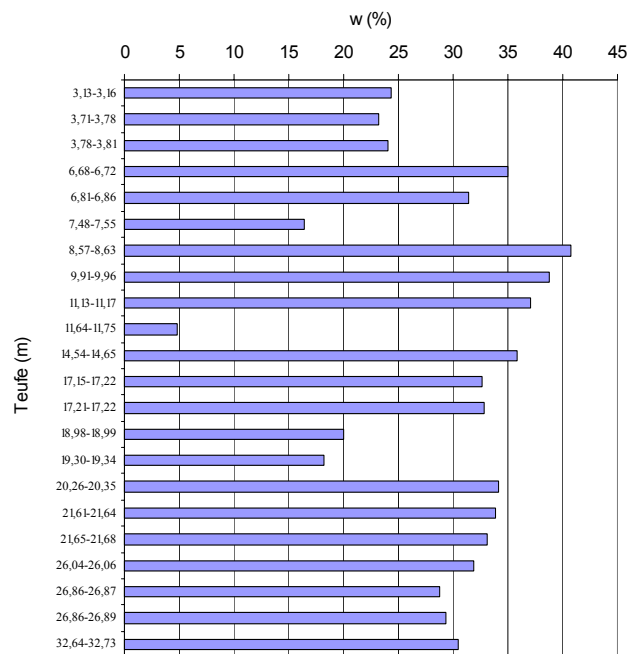
Die Identifikation von uranführenden / -haltigen Mineralen in einer größeren Anzahl von Proben ist ein weiteres dringendes Erfordernis. Als aussichtsreiches Verfahren wird die Analyse mittels „Analytical High-Resolution Environmental Electron Scanning Microscope“ (ASEM) angesehen.

## 2.4.4 Sedimentologische Untersuchungen

### 2.4.4.1 Wassergehaltsbestimmung

Die Bestimmung des Wassergehalts, also der Masse Wasser pro Masse Trockensediment, erfolgte nach DIN 18121 T1 durch Ofentrocknung. Bei der Probennahme wurde darauf geachtet, die Proben möglichst aus dem Inneren des Bohrkerns zu entnehmen, um Ungenauigkeiten, die durch etwaige Veränderungen des Bohrkernrandes entstanden sein könnten, möglichst auszuschließen.

Im Ergebnis schwanken die Wassergehalte stark, liegen aber meist um 30%, nur in Ausnahmefällen unter 20%; in einem Fall knapp über 40%. Bei einer Probe aus 11,70 m Teufe handelt es sich um festen Siderit, der diesbezüglich als Ausnahme zu betrachten ist. (Abb. 2.4.22).



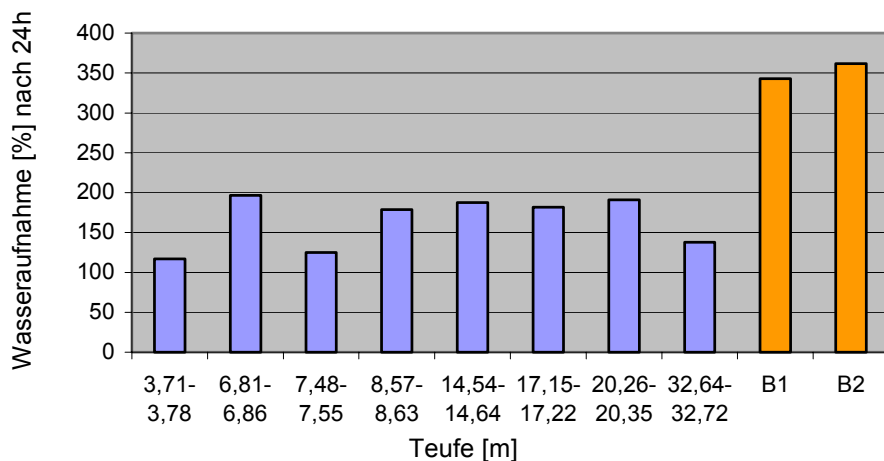
**Abb. 2.4.22:** Wassergehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4

### 2.4.4.2 Wasseraufnahmefähigkeit

Mit Hilfe der Wasseraufnahmefähigkeit (Wasserbindevermögen  $W_{b/a}$ ) einer Gesteinsprobe ist bereits eine Aussage über die Art der enthaltenen Tonminerale möglich. Die Messung der Wasseraufnahmefähigkeit wurde gemäß DIN 18132 mit

einem Gerät nach Neff durchgeführt. Dazu wurden die Proben bei ca. 60°C getrocknet, der Korngrößenanteil < 0,125 mm durch Sieben abgetrennt und je nach Material 1 bzw. 0,3 g für die Versuchsdurchführung eingesetzt. Zur Auswertung wurden die über einen Zeitraum von 24 Stunden gewonnenen Ergebnisse verwendet. Zu Vergleichszwecken wurde außerdem die Wasseraufnahmefähigkeit von zwei Bentoniten (B1 und B2) bestimmt, wie sie zur Ringraumverfüllung in den beiden Bohrungen NA4 und NA5 eingesetzt worden sind.

Die Wasseraufnahmefähigkeit liegt bei allen untersuchten Proben mit über 100 Gew.% bis nahe 200 Gew.% sehr hoch, was auf das Vorhandensein quellfähiger, smektitischer Tone zurückzuführen ist. Auch ein Vergleich mit Literaturwerten für unterschiedliche Tonminerale /WHI 59/ zeigt, dass die Wasseraufnahmefähigkeit des Feinkornanteils der Proben der Bohrung NA4 häufig im Bereich von Ca-Bentoniten liegt und somit deren Gehalt an quellfähigen Tonmineralen als hoch einzustufen ist.



**Abb. 2.4.23:** Wasseraufnahmevermögen von Sedimentproben des Bohrkerns NA4 und zweier Bentonite

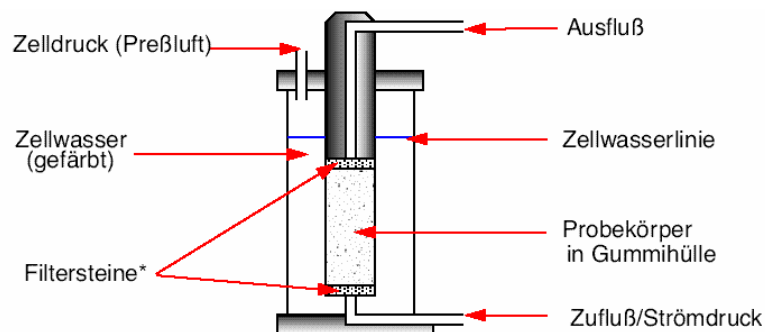
Das (mit einzelnen Ausnahmen im oberflächennahen Bereich) ähnliche Wasserbindevermögen über die gesamte Kernlänge lässt auf eine gleichmäßige Verteilung schließen.

#### 2.4.4.3 Durchlässigkeitsversuche

Zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit im Labor wurden Durchlässigkeitstests an Kernproben zur Ermittlung der horizontalen (schichtparallelen) Durchlässigkeit durchgeführt. Dazu wurden die Einzelproben zunächst mit Hilfe von

Metallzylindern, deren Innendurchmesser exakt dem benötigten Probendurchmesser entsprach, aus den jeweiligen Kernabschnitten herauspräpariert und anschließend - geschützt von einer flexiblen Gummihülle - in eine umgebaute Triaxialzelle eingesetzt. Die Probenkörper haben einen Durchmesser von 36 mm und eine variierende Höhe von ca. 6,2 bis 8,4 cm, die von der Materialqualität abhängig ist (Präparationsverluste).

Die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit, im folgenden als  $k_f$ - bzw.  $k_{10}$ -Wert bezeichnet, erfolgte im Laborversuch in Anlehnung an DIN 18130, T1 mit konstanter Druckhöhe. Im Unterschied zur DIN wurde jedoch, bedingt durch den Bohrerkerndurchmesser und die Vorgabe schichtparalleler Messungen, ein geringerer Probendurchmesser verwandt. Als Durchströmungsflüssigkeit diente deionisiertes Wasser. Als Zellwasser wurde zur Kontrolle mit Farbstoff versetztes Leitungswasser benutzt. Der Zelldruck lag immer mindestens 0,2 bar über dem Durchströmungsdruck. Dieser Wert weicht um 0,1 bar von dem in der DIN empfohlenen Wert ab, hat sich jedoch als völlig ausreichend erwiesen. Zudem wurde so die Gefahr minimiert, die Gummihülle durch grobkörniges, scharfkantiges Material zu beschädigen, was aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Proben ein wesentlicher Faktor war. Die Apparatur ist in Abb. 2.4.24 schematisch dargestellt.



\*durch zusätzliches Filterpapier vor Zusetzen geschützt

**Abb. 2.4.24:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit einiger Proben des Bohrkerns NA4

Die Probenkörper wurden entsprechend dem Versuchsaufbau von unten nach oben durchströmt, um das Entweichen von Restluft, die bis zum Erreichen der Wassersättigung in den Proben verbleiben kann, zu ermöglichen und im Versuchsverlauf, soweit möglich, Zufluß und Ausfluß zu messen. In Abhängigkeit von Zeit, Probenhöhe, Probendurchmesser, Temperatur und hydraulischem Gefälle können die  $k_f$ -Werte

ermittelt werden. Die erhaltenen Werte sind, temperaturkorrigiert für 10°C, als  $k_{10}$ -Werte angegeben.

Das System ist bis zum Ausflußpunkt der Apparatur vollständig geschlossen. Geringe Differenzen zwischen Zulauf und Ablauf entstehen teilweise durch Verdunstung des aufgefangenen Auslaufwassers, da die Verdunstung trotz Verdunstungskappen nicht vollständig verhindert werden kann. Die erste Versuchsreihe konnte, nachdem sie einen konstanten Durchfluss erreicht hatte, nach 20 Tagen beendet werden. Eine Versuchsdauer von drei bis vier Wochen erwies sich auch bei den folgenden Versuchen als zweckmäßig.

Die nach der temperaturkorrigierten Darcy-Formel ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten sind in Tab. 2.4.6 zusammengefasst. Die gemessenen Wassergehalte bei Wassersättigung deuten dabei auf eine Porosität von meist über 40 % bis nahe 50 % hin, was für diese Art tonreicher Gesteine charakteristisch ist.

**Tab. 2.4.6:** Hydraulische Durchlässigkeiten (Laborwerte) ausgewählter Sedimentproben der Bohrung NA4

Probe-Nr.	Teufe [m]	$k_{10}$ -Zulauf	$k_{10}$ -Auslauf	Wassergehalt Einbau [%]	Wassergehalt Ausbau [%]	Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Porenanteil [n]
K7	19,21-19,25	n/a	$8,6 \cdot 10^{-10}$	28,0	35,4	1,45	0,51
K8	19,42-19,46	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	40,9	48,6	1,21	0,59
K2	26,58-26,61	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	38,0	42,7	1,30	0,56
K1	26,90-26,94	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$8,9 \cdot 10^{-11}$	42,0	45,9	1,29	0,59
K3	29,72-29,76	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$	47,0	51,6	1,19	0,61
K4	33,67-33,71	$2,4 \cdot 10^{-12}$	n/a	48,3	49,5	1,18	0,58
K5	36,94-36,98	$3,7 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	30,6	32,7	1,46	0,48
K6	37,37-37,41	$2,1 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	16,2	19,9	1,74	0,35

Zusätzlich konnte aufgrund der exakt vorgegebenen Probengeometrie in Form eines Zylinders der Porenanteil  $n$  errechnet werden. Die über die Probengeometrie ermittelten Porenanteile liegen meist über 50 % bis um 60 %, was einem tonigen Schluff bis schluffigen Ton entspricht. Der für hydraulische Belange wichtige durchflusswirksame oder nutzbare Porenanteil  $n_f$  für tonigen Schluff liegt bei lediglich 0,03 bis 0,08 und für schluffigen Ton bei 0,01 bis 0,05.

#### 2.4.4.4 Messung von Porositäten und spezifischen Oberflächen

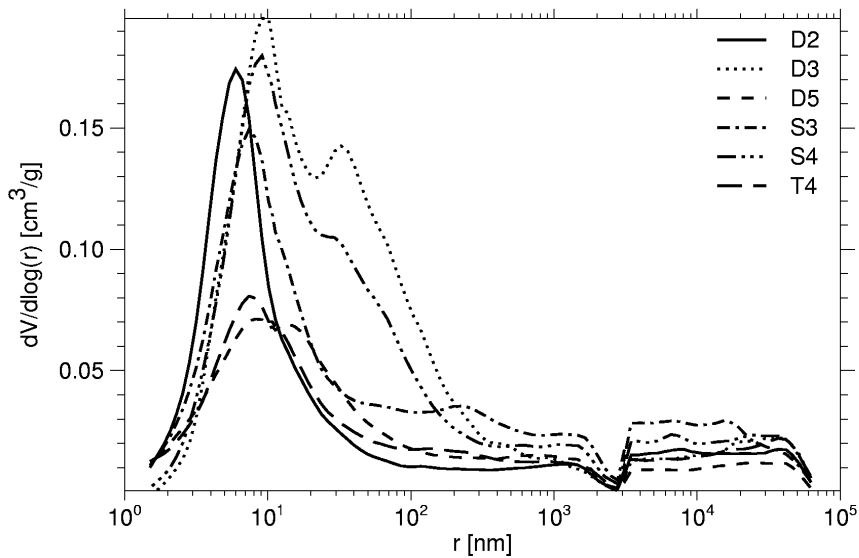
An ausgewählten Proben wurden vom tschechischen NRI Messungen der spezifischen Oberfläche nach der BET-Methode sowie Porositätsbestimmungen mittels Quecksilber-Porosimetrie durchgeführt. In Tab. 2.4.7 sind die Ergebnisse übersichtsartig zusammengestellt. Die Porenverteilungen zeigt Abb. 2.4.25.

**Tab. 2.4.7:** Porositäten und spezifische Oberflächen ausgewählter Proben des Bohrkerns NA5

Probe	Teufe [m]	Mineraldichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockenraumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosität [n]	Spez. Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]
D2	34,85	3,08	1,96	0,36	42,52
D3	34,87	2,93	1,62	0,45	49,67
D5	35,80	2,62	2,00	0,24	41,97
S3	34,78	2,64	1,74	0,34	35,23
S4	34,89	2,70	1,70	0,37	42,16
T4	35,25	2,61	2,00	0,24	31,77

#### 2.4.4.5 Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Die schichtparallel ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten liegen meist im Bereich um  $10^{-11}$  m/s (vgl. Tab. 2.4.6). Insbesondere aufgrund des hohen Tongehaltes ist durch die damit verbundene Einregelung von Tonmineralen mit einer niedrigeren, vertikalen Durchlässigkeit zu rechnen. Diese sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten sind auf die relativ hohen Tongehalte und das breite Korn-größenspektrum zurückzuführen. Beides begünstigt eine Minimierung des für bewegliches Wasser zur Verfügung stehenden Raumes. Weiterhin wird die Durchlässigkeit durch vorhandene quellfähige Tonminerale /SCH 00/ verringert.



**Abb. 2.4.25:** Porenverteilung ausgewählter Proben des Bohrkerns NA5

Deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeiten von  $2 \cdot 10^{-6}$  bis  $9,4 \cdot 10^{-10}$  m/s für den Granit an der Basis der tertiären Sedimente und von  $1 \cdot 10^{-7}$  bis  $5,6 \cdot 10^{-5}$  m/s für die vulkanoklastische Sedimentfolge, wie sie aus früheren Untersuchungen bekannt sind /NRI pers.Mitt./ beziehen sich wahrscheinlich auf Messungen in einzelnen grundwasserführenden Horizonten und sind nicht repräsentativ für den überwiegenden Teil der Schichtenfolge.

Eine Auswertung der bei den Grundwasserprobennahmen festgestellten Grundwasserspiegeländerungen in beiden grundwasserführenden Horizonten der Bohrungen NA4 und NA5 hat gegenüber den o. g. Laboruntersuchungen ebenfalls deutlich höhere hydraulische Leitfähigkeiten erbracht (Tab. 2.4.8). Diese Ergebnisse werden durch die Befunde der geophysikalischen Logs bestätigt, die ebenfalls Wasserzuläufe in 34,5 - 36,5 m und weniger ausgeprägt in ca. 19 m Teufe anzeigen. Ausserdem sind diese Werte vergleichbar mit denjenigen, die an Bohrkernmaterial der Bohrung B4 aus der Korngrößenverteilung abgeleitet wurden /BRA 98/.

**Tab. 2.4.8:** Aus Grundwasserspiegeländerungen beim Abpumpen abgeleitete hydraulische Durchlässigkeiten

Bohrung und Teufenbereich [m]	$k_f$ -Wert [m/s]
NA4 - 34,50 - 36,50	$1,8 \cdot 10^{-6}$
NA5 - 19,00 - 21,00	$1,5 \cdot 10^{-7}$



Es ist zu erwarten, dass diese Durchlässigkeiten durch geringmächtige wasserleitende Horizonte (Lignit, Sand) ermöglicht werden, die wiederum sehr inhomogen sein können. Proben dieser Horizonte konnten für Labor-Durchlässigkeitsversuche nicht eingesetzt werden. Dementsprechend sind die an Laborproben bestimmten Leitfähigkeiten um einige Größenordnungen niedriger und. Die Ergebnisse von /SCH 00/ zeigen darüber hinaus, dass Montmorillonit und andere quellfähige Tonminerale im oberen Aquifer weitgehend fehlen. Stattdessen sind hauptsächlich Kaolinit und Illit vorhanden, was auf eine stärkere Verwitterung hindeutet, die durch die hier stattfindende Wasserzirkulation verursacht worden ist.

#### **2.4.5 Chemische Analysen**

An allen Proben zur Gesteinsanalytik wurde zunächst ein Flußsäure-Aufschluss durchgeführt. Je 50 mg des in einer Kugelmühle feingemahlene, trockene Gesteinspulvers wurde in Teflondruckgefäße eingewogen. Nach Zugabe von

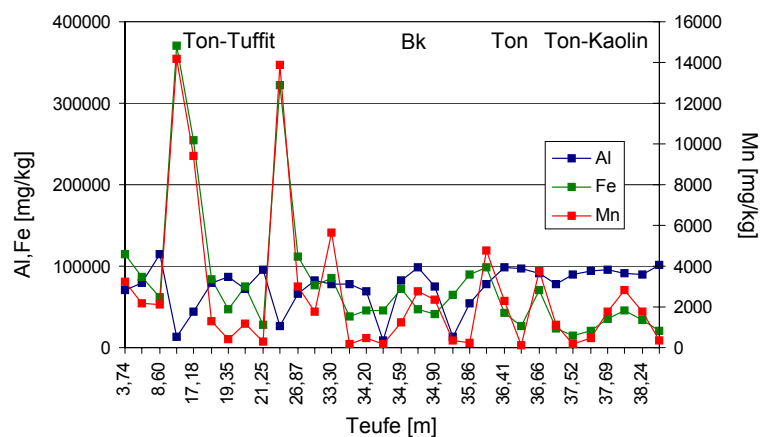
- 3 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%),
- 3 ml HCl (35%),
- 7 ml HNO<sub>3</sub> (65%) und
- 3 ml H<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (30%)

konnten die Proben in einem Mikrowellengerät komplett aufgeschlossen und nach Abkühlung in Teflonabdampfschalen überführt werden. Die Flußsäure wurde vorsichtig erhitzt und durch mehrmalige Verdrängung mit HCl vollständig abgedampft, die gelösten Proben wurden in 100 ml Meßkolben überführt und mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Die Elementkonzentrationen wurden dann mittels ICP-OES bzw. ICP-MS ermittelt (Details siehe /SCH 00/). Zur Ergänzung der Siliziumgehalte sowie zur Überprüfung ausgewählter Elementgehalte sind nahezu sämtliche Sedimentproben auch mittels Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht worden. Detaillierte Ergebnisse der chemischen Analysen von Sedimentproben der Bohrung NA4 sind im Anhang aufgeführt. Dabei werden die jeweiligen elementspezifischen Resultate dem vereinfachten geologischen Profil gegenübergestellt, um das Erkennen von Korrelationen bzw. lithologisch bedingten Gesetzmäßigkeiten zu erleichtern.

### 2.4.5.1 Konzentrationen einiger ausgewählter Elemente

Einige Elementgehalte (z. B. Fe) lassen deutliche Unterschiede der Gesteinsproben erkennen und werden im folgenden kurz dargestellt.

Aluminium ist besonders in Magmatiten (81.300 mg/kg) und Tongesteinen (80.000 mg/kg) enthalten /SCH 00/. Der durchschnittliche Aluminiumgehalt der analysierten Sedimentproben liegt bei 75.000 mg/kg. Parallel zu niedrigen Aluminiumgehalten wurden extrem hohe Eisenkonzentrationen in diesen Proben gemessen. Übliche Eisenkonzentrationen von 50.000 mg/kg in Magmatiten und 47.200 mg/kg in Tongesteinen werden in einzelnen Proben um den Faktor 7 überschritten. Die Zusammensetzung dieser Gesteinsproben weicht vom Material der vulkanoklastischen Serie stark ab und konnte durch Röntgenanalysen als Siderit identifiziert werden. Die Titankonzentrationen der vulkanoklastischen Serie sind im Vergleich zu Literaturdaten (basische Magmatite: 9.000 mg/kg) stark erhöht. Der hohe Titangehalt der Proben spricht für einen Eintrag alkalischer Magmatite und korreliert mit chemischen Untersuchungen an Proben des Doupovské hory /SHR 95/. Die von /SHR 95/ vorgenommenen chemischen Analysen der Vulkanite ergaben eine Gesteinszusammensetzung, die der von Alkalibasalten entspricht. Neben vereinzelt Trachybasalten konnten hauptsächlich Tephrite und Foidite nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen des Doupovské hory ergaben die Analysen der vulkanoklastischen Serie des Bohrkerns NA4 keine erhöhten Alkaliegehalte. Sowohl die Kalium- als auch die Natriumgehalte der analysierten Proben sind geringer als die Gehalte der in der Literatur beschriebenen Elemente (durchschnittlicher Wert für Magmatite: 25.900 mg/kg K und 28.300 mg/kg Na).



**Abb. 2.4.26:** Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Al, Fe, Mn)

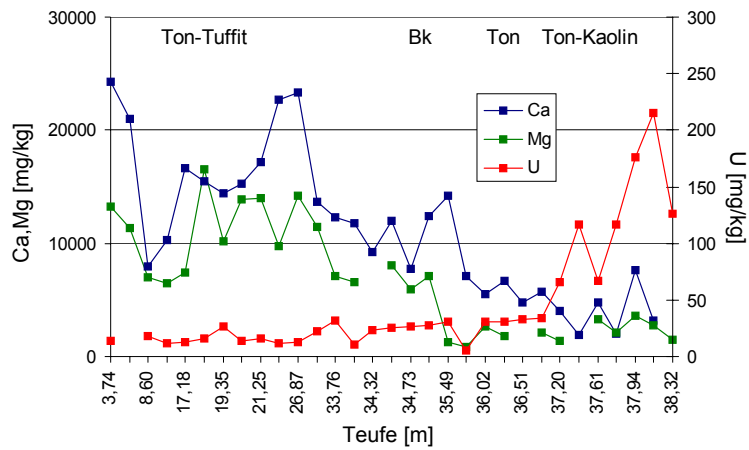


Abb. 2.4.27: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Ca, Mg, U)

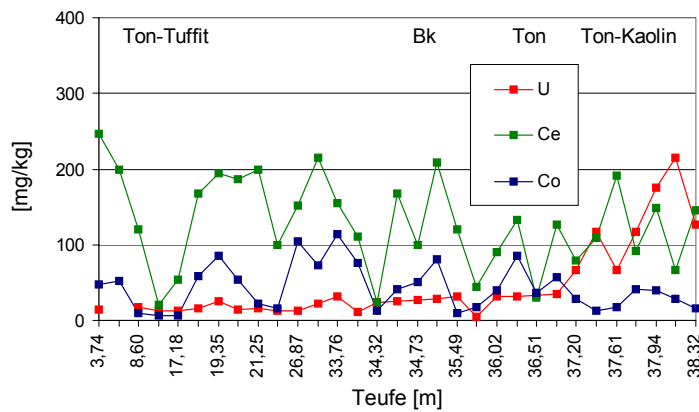


Abb. 2.4.28: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (U, Ce, Co)

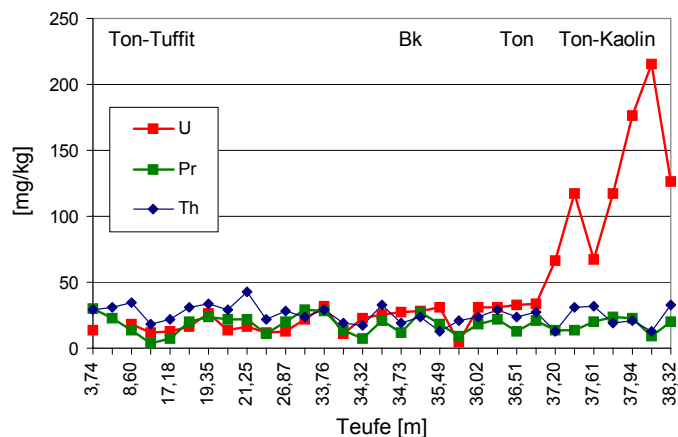
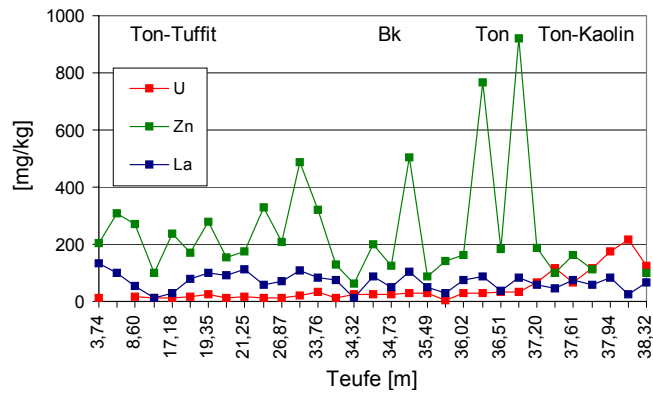


Abb. 2.4.29: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (U, Pr, Th)

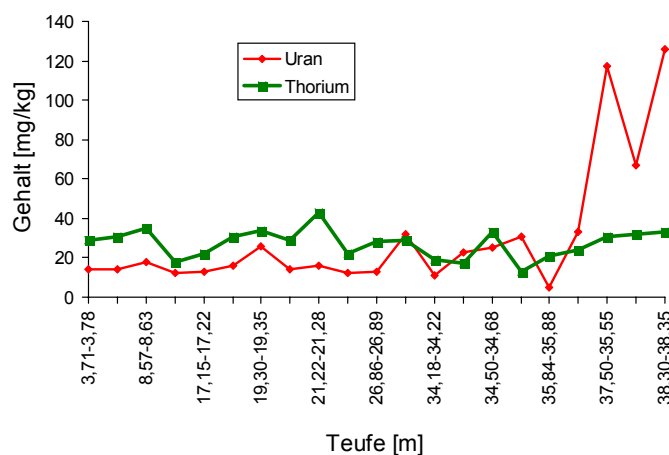


**Abb. 2.4.30:** Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Zn, La, U)

### 2.4.5.2 Radionuklidkonzentrationen

Im Rahmen der Zielsetzung dieses Vorhabens sind die Konzentrationen der Radionuklide Thorium und Uran von besonderem Interesse (Abb. 2.4.31).

Bei Uran und Thorium handelt es sich um lithophile Elemente; d. h. sie werden während der magmatischen Differentiation bevorzugt in sauren Gesteinsschmelzen angereichert und erreichen dort die höchsten Konzentrationen. Das Th/U- Verhältnis saurer Gesteine (Granit) wird in der Literatur mit 5,0 angegeben. Basische Gesteine zeigen ein deutlich geringeres Verhältnis (3,0).



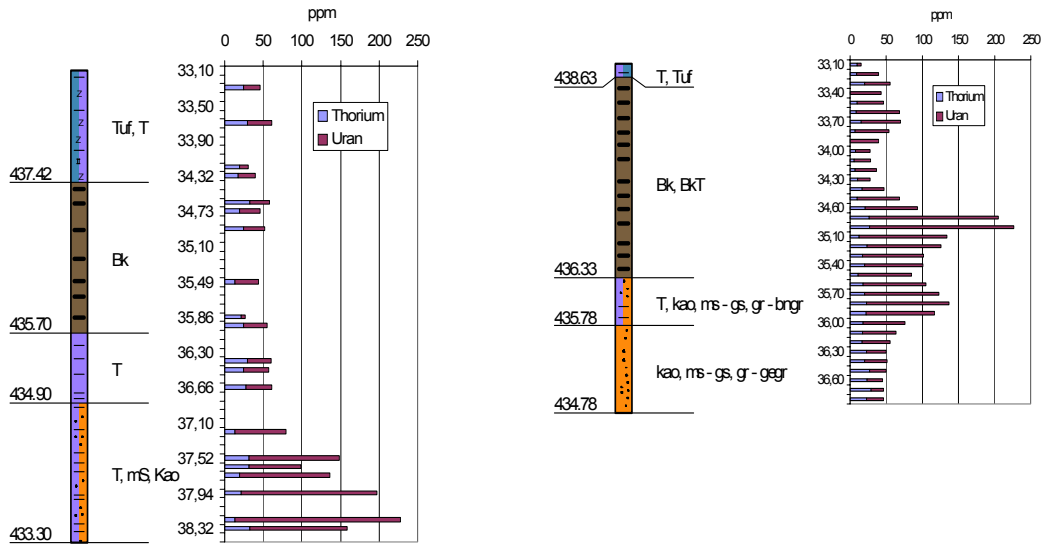
**Abb. 2.4.31:** Korrelation der U- und Th-Gehalte in Sedimentproben der Bohrung NA4

Eine Korrelation der Uran- und Thoriumgehalte der Bohrung NA4 zeigt in den oberen 33,80 m einen nahezu parallelen Verlauf. Das Th/U-Verhältnis ist mit einem Durchschnitt von 1,9 auffallend niedrig und kann auf eine generell leichte Erhöhung der Urankonzentration innerhalb des Bohrkerns NA4 zurückgeführt werden. Als Quelle hierfür können uranhaltige, leicht verwitternde, vulkanische Gläser in Betracht kommen.

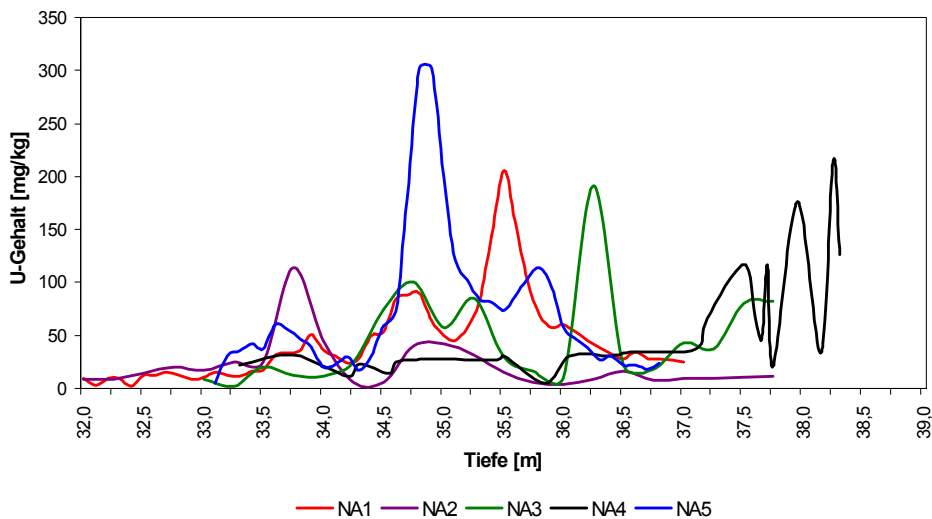
Ab 33,80 m verändert sich das Verhältnis der beiden Radionuklide zueinander. Es kommt zunächst zu einer Angleichung der Uran- und Thoriumgehalte; ab Bohrkernmeter 37,50 m weichen die Kurvenverläufe dann stark voneinander ab.

Die Thoriumgehalte der analysierten Proben variieren insgesamt nur in geringem Maße. Die Durchschnittskonzentration liegt bei 27 mg/kg. Die Urankonzentrationen dagegen steigen von durchschnittlich 18 mg/kg in den oberen 33,00 m bei 37,50 m um das sechsfache auf 120 mg/kg an. Der höchste Urangehalt von 129 mg/kg wurde in der Probe 38,30-38,35 m ermittelt.

In Abb. 2.4.32 ist exemplarisch der basale Teil der Bohrungen NA4 und NA5 mit den Elementgehalten von Thorium und Uran dargestellt. Auch diese Abbildung dokumentiert die bereits oben erwähnten Besonderheiten der Bohrung NA4: neben erkennbaren, aber nicht sehr deutlich ausgeprägten Urananreicherungen im Braunkohlenhorizont weist diese Bohrung ihr U-Konzentrationsmaximum in den unterlagernden, stark kaolinisierten Schichten auf. Gegenüber dem mittels Gammaskopie ermittelten Bild sind diese Anreicherungen zudem auf geringstmächtige Horizonte von wenigen cm Mächtigkeit beschränkt. Wie eine Konzentrationsverteilung im unterlagernden Primären Kaolin aussieht, konnte im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht geklärt werden. Die Bohrung NA5 bestätigt demgegenüber das aus den vorlaufenden Explorationsbohrungen bekannte Bild eines deutlichen Konzentrationsmaximums im Bereich der Braunkohle (Abb. 2.4.33). Allerdings zeichnet sich auch hier ein zweiter Anreicherungshorizont im Bereich der unterlagernden Schichten ab, die wahrscheinlich der Stare-Sedlo-Formation (Sekundärer Kaolin) zuzuordnen sind.



**Abb. 2.4.32:** Mittels ICP ermittelte U- und Th-Gehalte in den basalen Sedimenten der Bohrungen NA4 (links) und NA5 (rechts)



**Abb. 2.4.33:** Bedeutende Uran-Akkumulationen in den Bohrungen NA1 - NA5

### 2.4.5.3 Kohlenstoffbestimmung

In den älteren Erkundungsbohrungen NA1 - NA3 konnte unter Zugrundelegung der damaligen Analysendichte eine Korrelation zwischen Kohleflözen bzw. Gehalt an organischem Material und Urananreicherung festgestellt werden. Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wurden auch am Bohrkern NA4 Kohlenstoffmessungen durchgeführt. Die gewählte Messapparatur /SCH 00/ bietet sowohl die Möglichkeit, den Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) als auch den anorganisch gebundenen Anteil des Kohlenstoffs (TIC) zu bestimmen. Der organische Anteil an Kohlenstoff (TOC) kann

nicht direkt gemessen werden, sondern errechnet sich aus der Differenz der beiden zuvor ermittelten Parameter.

Für die Ermittlung des TIC-Gehaltes wurde der Aufbau der Messapparatur dahingehend verändert, dass anstelle des Verbrennungsofens ein Entwicklungsgefäß mit geschliffenen Wägegläschen in den Gasstrom geschaltet wurde. Die eingewogene Probe befand sich zusammen mit einem Magnetrührer im Wägeglas und wurde nach Einbau in das System vom Trägergas bis zur vollständigen Verdrängung der eingebrachten Luft gespült. Durch eine Septumkappe wurden 15 ml halbkonzentrierte Phosphorsäure (40 %) in das Wägegläschen eingespritzt, der Rührmotor auf maximale Umdrehung gestellt und das von der Phosphorsäure verdrängte CO<sub>2</sub> über das Trägergas dem Infrarotspektrometer zugeführt.

Die TIC-Gehalte der Proben TC5 und TC10 (Tab. 2.4.9) konnten aufgrund des hohen Sideritanteils dieser Proben nicht nach der herkömmlichen Meßmethode ermittelt werden. Da Eisencarbonate eine deutlich höhere Stabilität als Mg- und CaCO<sub>3</sub> aufweisen, konnte die Bestimmung des TIC-Gehalts der Siderit-Proben nur unter Verwendung von heißer Phosphorsäure (80° C) durchgeführt werden.

### **Probenauswahl und Messergebnisse**

Um Aussagen über Kohlenstoffgehalt und -verteilung der Bohrung NA4 treffen zu können, wurden insgesamt 23 Proben untersucht und dabei besonders die Braunkohlehorizonte im unteren Kernbereich zwischen 34,30 und 36,00 m berücksichtigt.

### **Auswertung**

Der Gesamtkohlenstoffgehalt der vulkanoklastischen Proben des Bohrkerns NA4 liegt zwischen 1,0 und 2,8 %. Der organische Kohlenstoffanteil dominiert dabei deutlich.

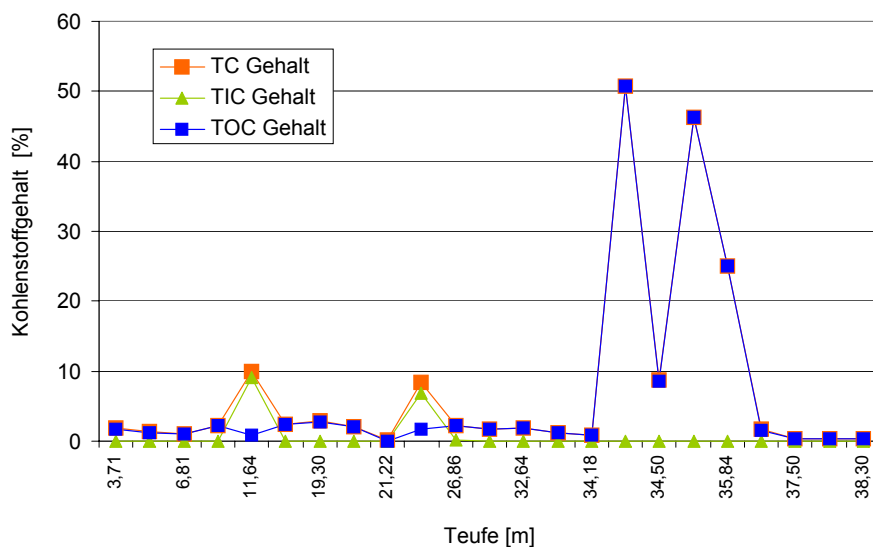
Die Proben 11,64-11,75 m und 25,00-25,08 m unterscheiden sich von den übrigen durch einen erhöhten Gehalt an anorganischem Kohlenstoff (9,10 % und 6,79 %). Dabei handelt es sich um sideritisches Material. Einzelmessungen von TOC-Gehalten dieser Proben von maximal 20 % konnten durch Dünnschliffanalysen bestätigt und mit der Bildung sehr feinkörnigen Eisencarbonats um inkohlte Pflanzenreste erklärt werden. Die TIC-Gehalte vieler Proben liegen zwar sehr niedrig, die Ergebnisse zur Mineralogie aus röntgendiffraktometrischen Messungen wie auch aus der

hochauflösenden Oberflächenspektroskopie zeigen aber, dass Siderit in vielen Proben über den gesamten Teufenbereich in geringen Konzentrationen von 1-3 % vorhanden ist.

**Tab. 2.4.9:** TC-, TIC- und TOC-Gehalte von Proben des Bohrkerns NA4

Proben-Bezeichnung	Teufe [m]	TC [%]	TIC [%]	TOC [%]	Proben-Bezeichnung	Teufe [m]	TC [%]	TIC [%]	TOC [%]
TC1	3,71-3,78	1,804	0,061	1,743	TC13	32,64-32,73	1,925	0,079	1,846
TC2	4,33-4,37	1,327	0,046	1,281	TC14	33,74-33,78	1,267	0,031	1,236
TC3	6,81-6,86	1,093	0,038	1,055	TC15	34,18-34,22	0,796	0,005	0,791
TC4	8,57-8,63	2,273	0,010	2,263	TC16	34,30-34,34	50,80	0,011	50,789
TC5	11,64-11,75	9,957	9,10	0,85	TC17	34,50-34,68	8,669	0,0492	8,620
TC6	17,15-17,22	2,387	0,055	2,332	TC18	35,47-35,51	46,36	0,025	46,335
TC7	19,30-19,35	2,840	0,028	2,812	TC19	35,84-35,88	25,06	0,007	25,053
TC8	20,26-20,35	2,142	0,078	2,065	TC20	36,49-36,54	1,631	0,006	1,625
TC9	21,22-21,28	0,145	0,069	0,076	TC21	37,50-37,55	0,336	0,008	0,329
TC10	25,00-25,10	8,484	6,79	1,694	TC22	37,55-37,67	0,322	0,021	0,301
TC11	26,86-26,89	2,304	0,111	2,193	TC23	38,30-38,35	0,338	0,009	0,329
TC12	32,45-32,55	1,688	0,030	1,658					

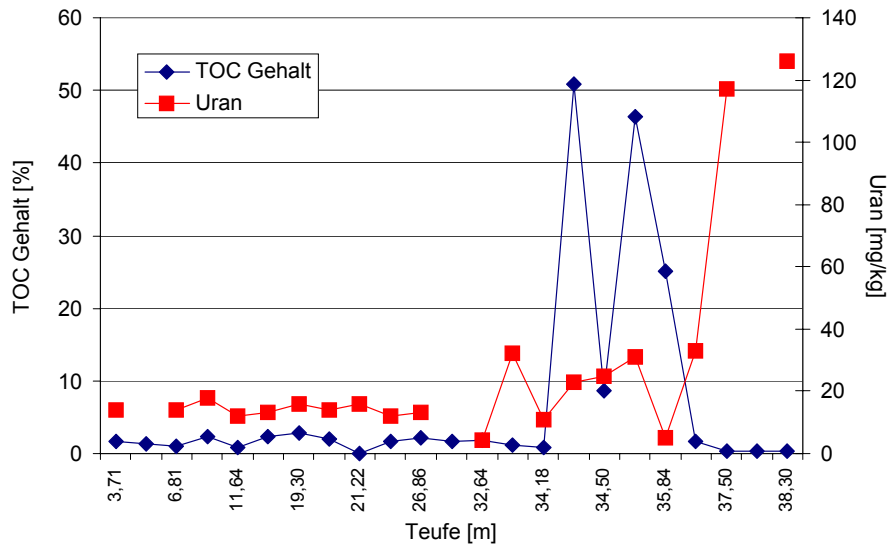
Der Braunkohle-führende Horizont des Bohrkerns NA4 erreicht einen maximalen Gesamtkohlenstoffgehalt von 50,8 %, in tonreicheren Lagen sind durchschnittlich 25 % C enthalten. Im mehr kiesig ausgebildeten Bereich von 34,50-34,68 m sinkt der Kohlenstoffanteil auf 8,7 %. Den geringsten Kohlenstoffgehalt (0,3 %) besitzen die Kaolinsande und Tone an der Bohrlochbasis. Damit unterscheiden sie sich deutlich von den vertonten tertiären Vulkanoklastika. (Abb. 2.4.34)



**Abb. 2.4.34:** TC-, TIC- und TOC- Gehalte in Sedimentproben der Bohrung NA4



Eine Korrelation kohleführender Horizonte mit erhöhten Urangelhalten konnte bei der Bohrung NA4 nur im begrenzten Umfang festgestellt werden. Der Durchschnittsgehalt an Uran in den kohleführenden Schichten des Bohrkerns liegt bei 23 mg/kg. Dies ist gegenüber der vulkanoklastischen Serie mit 15 mg/kg zwar eine leichte Erhöhung, zeichnet sich aber nicht als markante Anreicherung ab.



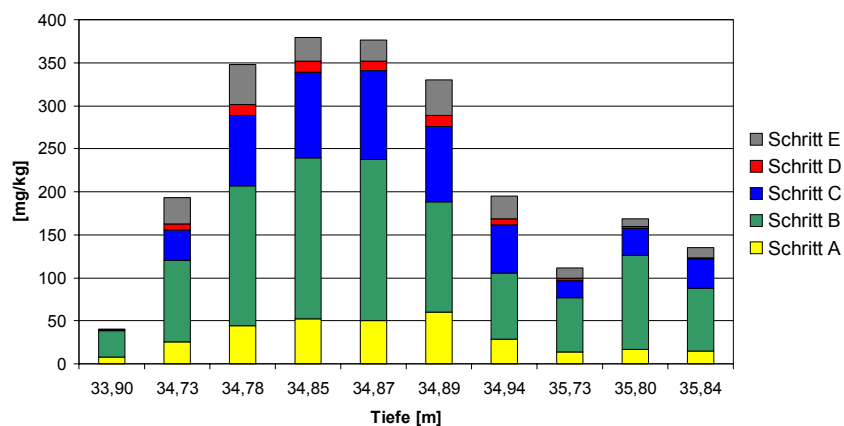
**Abb. 2.4.35:** Korrelation der Urangelhalte mit organischem Kohlenstoff in Sedimentproben der Bohrung NA4

### 2.4.6 Sequentielle Extraktion

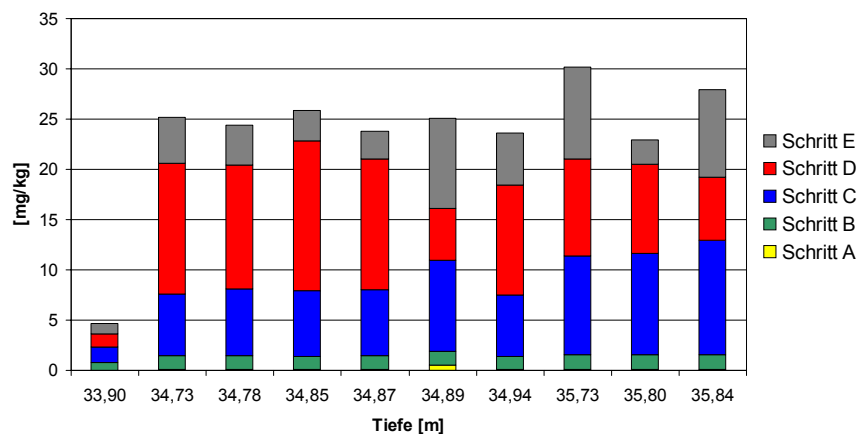
Ausgewählte Segmente der NA4- und NA5-Bohrkerne wurden mittels sequentieller Extraktion untersucht, um die unterschiedlichen Formen, in denen Uran und Thorium im Sediment auftreten, zu identifizieren. Dabei wurden zwei unterschiedliche Methoden angewandt, die bereits in den Projekten Cigar Lake /CRA 94/ und Alligator Rivers /YAN 91/ entwickelt wurden. Tab. 2.4.10 zeigt, welche Substanzen in den einzelnen Extraktionsschritten beider Verfahren verwendet werden.

**Tab. 2.4.10:** Verfahrensschritte bei zwei unterschiedlichen Sequentiellen Extraktionsmethoden

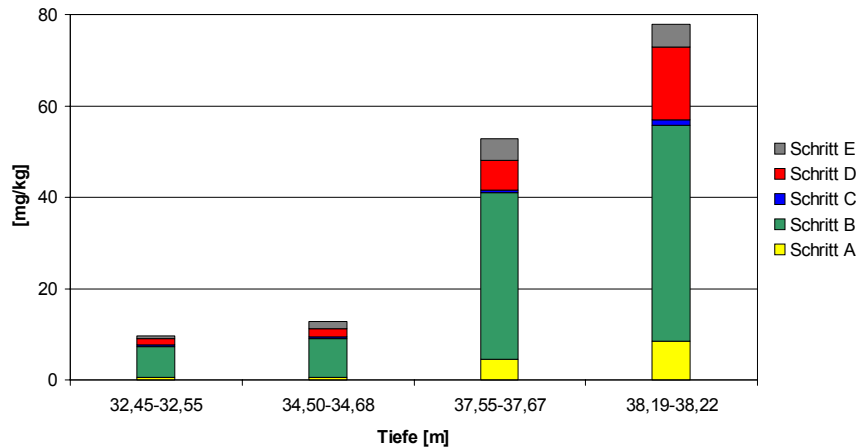
Methode A: Cigar Lake		
Schritt A	Austauschbares Uran; Carbonate	1M NaOAc, pH = 5
Schritt B	Uraninit; an organische Substanzen gebundenes Uran	30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 10 ml Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Schritt C	Amorphe Eisenoxide	NH <sub>2</sub> OH.HCl in 0.25 M HCl
Schritt D	Kristalline Eisenminerale	Na-Dithionit / Na-Citrat in 0.05M Zitronensäure
Schritt E	Residuum: Tone, Quarz	Aufschluss mit HF und HClO <sub>4</sub>
Methode B: Alligator River		
Schritt A	Sorbierte Phase	1M Na-Acetat
Schritt B	Amorphe Eisenoxide	Oxalsäure / Oxalat
Schritt C	Kristalline Eisenminerale	Na-Dithionit / Na-Citrat
Schritt D	Chlorite	6 M Salzsäure
Schritt E	Residuum: Quarz, Kaolinit	Aufschluss mit Hf, HNO <sub>3</sub> , HCl, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>



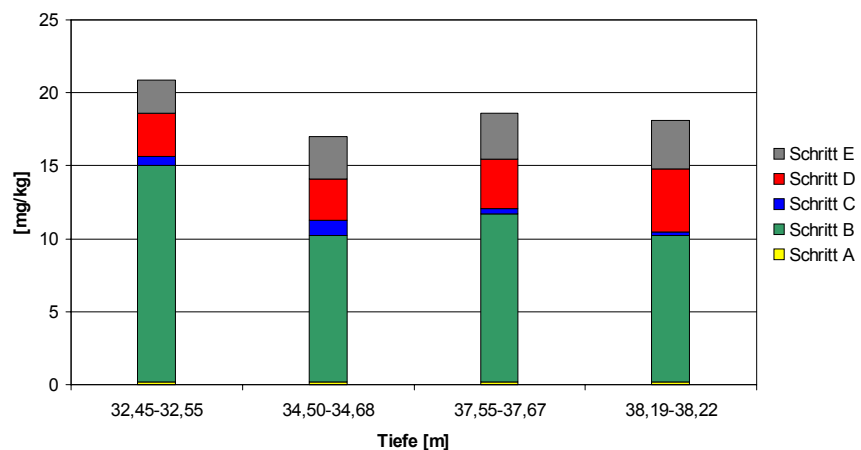
**Abb. 2.4.36:** Ergebnisse der sequentiellen Uran-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA5 nach Methode A



**Abb. 2.4.37:** Ergebnisse der sequentiellen Thorium-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA5 nach Methode A



**Abb. 2.4.38:** Ergebnisse der sequentiellen Uran-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA4 nach Methode B



**Abb. 2.4.39:** Ergebnisse der sequentiellen Thorium-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA4 nach Methode B

Die Ergebnisse der Extraktionen sind in Abb. 2.4.36 bis Abb. 2.4.39 dargestellt und in Tab. 2.4.11 als Übersicht zusammengefasst.

**Tab. 2.4.11:** Angewandte Verfahrensschritte und Ergebnisse der sequentiellen Extraktion

NA5 - Methode A		NA4 - Methode B	
Phase	Anteil [%]	Phase	Anteil [%]
Sorbierte Phase, Karbonate	5 - 20	Sorbierte Phase	5 - 10
Uraninit, org. gebunden	30 - 70	Amorphe Eisenoxide	10 - 50
Amorphe Eisenoxide	10 - 30		
Kristalline Eisenminerale	1 - 3	Kristalline Eisenminerale	1 - 3
Residuum	3 - 17	Chlorit	10 - 20
		Quarz Kaolinit	5 - 10

Die Ergebnisse zeigen, dass der sorbierte Anteil des Urans relativ gering ist. Für Uran befindet sich in allen Proben der größte Anteil von 30-70% in der in Schritt B extrahierten Fraktion. Dies entspricht Uraninit oder organisch gebundenem Uran, bzw. (bei Methode B) in amorphen Eisenoxiden gebundenem Uran. Während der Untersuchungen zeigte sich, dass die Bedingungen reduzierend sind und Eisenminerale vorwiegend in Form von Pyrit und Siderit vorliegen. Eisenoxide treten, wenn überhaupt, nur in sehr geringen Konzentrationen auf. Demnach liegt wahrscheinlich ein signifikanter Anteil des Urans in Form vierwertiger Uranminerale vor bzw. ist an organische Substanzen gebunden. Die eingesetzten Extraktionsverfahren erlauben bisher keine Unterscheidung zwischen Uranmineralphasen und Uran in organischen Phasen. Dies ist allerdings eine zentrale Frage hinsichtlich der Immobilisierung und der Verfügbarkeit des Urans. Zur genaueren Identifikation der immobilisierten Phase soll die Methode A „Cigar Lake“ insofern verfeinert werden, dass im Extraktionsschritt B eine Trennung von Mineralphase und organischer Phase über eine Sedimentation erfolgt. Diese Methode wird derzeit auf die hier vorliegenden Sedimente angepasst.

Im Fall von Thorium wird nur ein sehr geringer Anteil in den Schritten A und B extrahiert. Dies bestätigt, wie erwartet, dass Thorium gegenüber Uran signifikant weniger mobil ist.

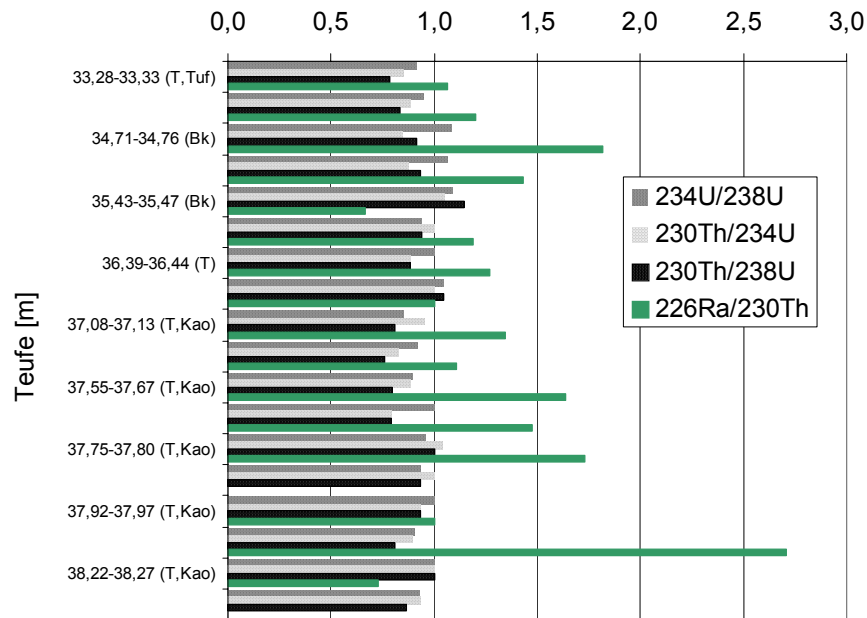
#### **2.4.7 Radiometrische Charakterisierung**

An ausgewählten Sedimentproben wurden die Gehalte der Radionuklide  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Pb}$  bestimmt. Hauptaugenmerk wurde bei der Auswertung auf die langlebigen Isotope der Uranzerfallsreihe gelegt. Die Untersuchung umfasste

- Sedimentproben aus ungestörten Bohrkernabschnitten,
- Sedimentbruchstücke nach der Porenwasserextraktion sowie
- Filtrate ausgewählter Schritte der sequentiellen Extraktion.

Es liegen Daten von vier verschiedenen Bohrkern-Abschnitten vor. Im Rahmen dieser Projektphase wurde der Kern NA4 eingehender untersucht. In Abb. 2.4.40 sind die Aktivitätsverhältnisse für die langlebigen Radionuklide  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ , und  $^{226}\text{Ra}$  dargestellt. Die Ergebnisse der radiometrischen Messung sind in Tab. 2.4.12 aufgeführt, radiometrische Daten für die Bohrkern NA1-NA3 sind in /BRA 98/

publiziert. Abb. 2.4.40 zeigt die Aktivitätsverhältnisse innerhalb der Uranzerfallsreihe. Das  $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ -Verhältnis liegt wenig unterhalb von eins. Das  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnis liegt bei fast allen Proben signifikant unterhalb von eins, wohingegen das  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ -Verhältnis bei dem überwiegenden Teil der Proben  $>1$  ist.



**Abb. 2.4.40:** Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe in den Sedimentproben aus Bohrung NA4

Zur besseren Veranschaulichung sind die Aktivitätsverhältnisse mit denjenigen aus den anderen Bohrkernen in Quadranten-Diagrammen dargestellt (Abb. 2.4.41 und Abb. 2.4.42). Der Vergleich der an Bohrkern NA4 bestimmten Aktivitätsverhältnisse mit den an den anderen Bohrungen gemessenen zeigt keine signifikanten Auffälligkeiten. Wie in Abb. 2.4.41 erkennbar, liegt auch bei den anderen Bohrkernen der Großteil der Messwerte bei  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnissen kleiner eins. Vier Messwerte weisen  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse  $> 1$  auf. Eine Aufteilung nach unterschiedlichen Sedimentschichten, wie in Abb. 2.4.42 dargestellt, zeigt eine schwache Tendenz. Die Mittelwerte der zu einer Schicht gehörigen Messwerte liegen jeweils bei  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnissen kleiner eins (Abb. 2.4.43), jedoch liegen die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse im Braunkohlehorizont im Mittel eher bei eins, wohingegen sie in den tonigen Horizonten  $< 1$  sind. Diese Tendenz könnte auf eine niedrigere Mobilität in den geringpermeablen Tonschichten gegenüber der wahrscheinlich als Aquifer fungierenden Braunkohleschicht zurückzuführen sein. Eine längere Aufenthaltszeit führt zu einer länger anhaltenden Auswirkung des  $\alpha$ -Rückstoßprozesses, und damit zu einer stärkeren Abreicherung des  $^{234}\text{U}$  aus dem Sediment.

Tab. 2.4.12: Ergebnisse der radiometrischen Messungen der Bohrkerne NA4 und NA5

Bohrung NA4: Sedimente				
Teufe [m]	<sup>238</sup> U [Bq/g]	<sup>234</sup> U [Bq/g]	<sup>230</sup> Th [Bq/g]	<sup>226</sup> Ra [Bq/g]
34,50-34,68	0,18	0,17	0,15	0,18
35,43-35,47	0,34	0,37	0,39	0,26
37,08-37,13	0,47	0,40	0,38	0,51
37,55-37,67	0,59	0,53	0,47	0,77
37,75-37,80	0,26	0,25	0,26	0,45
38,14-38,19	0,42	0,38	0,34	0,92
Bohrung NA4: Sedimentrückstände nach der Porenwasserextraktion				
Teufe [m]	<sup>238</sup> U [Bq/g]	<sup>234</sup> U [Bq/g]	<sup>230</sup> Th [Bq/g]	<sup>226</sup> Ra [Bq/g]
33,28-33,33	0,12	0,11	0,094	0,10
34,71-34,76	0,12	0,13	0,11	0,20
34,88-34,93	0,15	0,16	0,14	0,20
36,02-36,07	0,17	0,16	0,16	0,19
36,39-36,44	0,17	0,17	0,15	0,19
36,64-36,69	0,22	0,23	0,23	0,23
37,18-37,23	0,5	0,46	0,38	0,42
37,67-37,72	1,2	1,2	9,5	1,3
37,92-37,97	1,5	1,5	1,4	1,4
38,22-38,27	2,2	2,2	2,2	1,6
Bohrung NA5: Sedimente				
Teufe [m]	<sup>238</sup> U [Bq/g]	<sup>234</sup> U [Bq/g]	<sup>230</sup> Th [Bq/g]	<sup>226</sup> Ra [Bq/g]
33,90-34,10	0,62	0,59	0,62	0,53
34,87-34,89	4,8	4,4	4,0	5,2

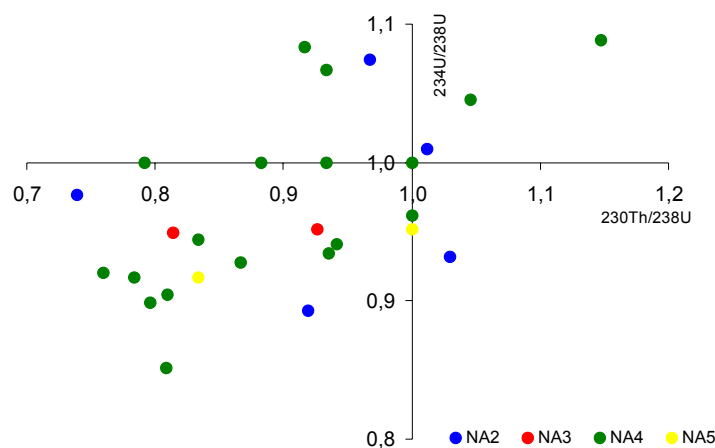
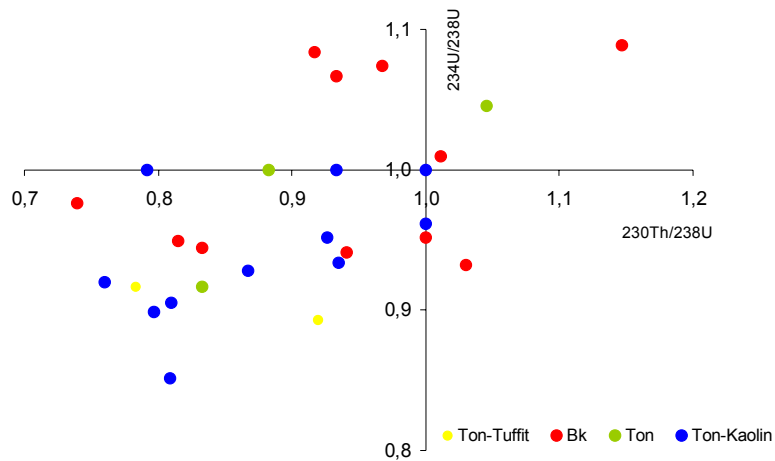
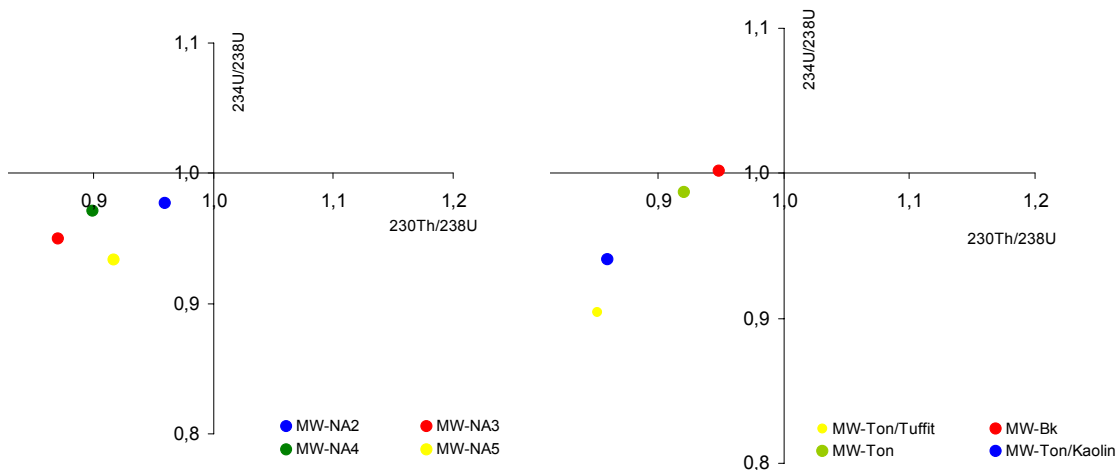


Abb. 2.4.41: Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe: Übersicht über alle Bohrkerne



**Abb. 2.4.42:** Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe: Übersicht über alle Bohrkerne unterschieden nach lithologischen Einheiten



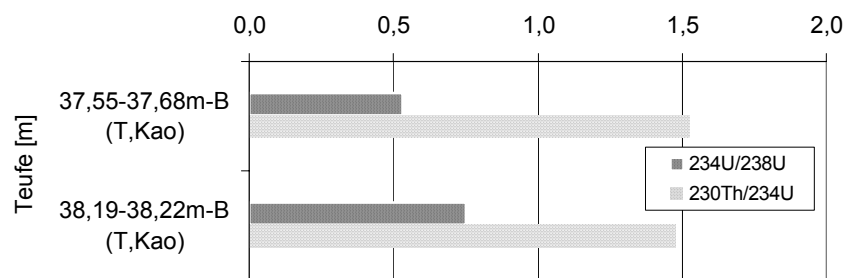
**Abb. 2.4.43:** Mittelwerte der Aktivitätsverhältnisse der Proben aus den einzelnen Bohrungen (links) und den verschiedenen lithol. Einheiten (rechts)

Die niedrigen  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse zeigen, dass in allen betrachteten Sediment-Proben eine Urananreicherung innerhalb der letzten 300 000 Jahre stattgefunden hat, auch im Kaolin-Horizont. Dies spricht sowohl dagegen, dass diese relativ undurchlässige Schicht über sehr lange Zeiträume völlig ungestört war, als auch dass sie als Uranquelle gedient hat.

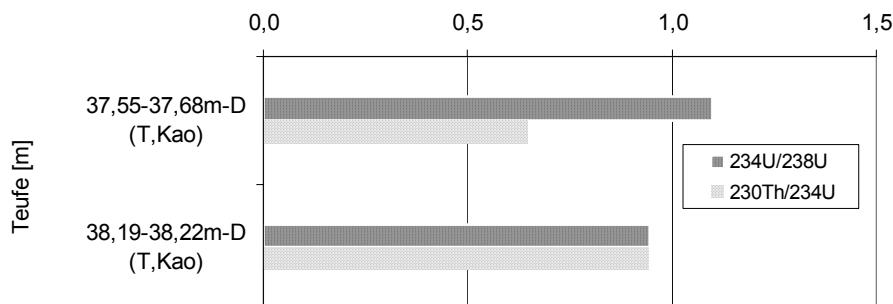
Zur genaueren Überprüfung wurden an zwei Kernsegmenten aus dem Kaolin-Horizont zusätzlich die Extrakte aus zwei unterschiedlichen Fraktionen der sequentiellen Extraktion radiometrisch untersucht. Ziel war die Überprüfung, ob einzelne

Sedimentphasen im direkten Gleichgewicht mit dem Grundwasser bzw. Porenwasser stehen. Zum anderen sollte überprüft werden, ob die Aktivitätsverhältnisse in den verschiedenen Sedimentphasen aufgrund ihres unterschiedlichen Mobilitätsverhaltens signifikante Unterschiede aufweisen. In dieser Untersuchung wurden aufgrund einer begrenzten Probenmenge ausschließlich Proben aus den Extraktionsstufen B und D, in denen sich die höchsten Urankonzentrationen befanden, verwendet.

Die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse der beiden Extraktionsstufen zweier Kaolinproben sind in Abb. 2.4.44 und Abb. 2.4.45 aufgetragen. Das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnis in Extrakt B ist signifikant niedriger als eins, wohingegen es in den Extraktionsstufen D bei eins liegt. Ebenso unterscheiden sich die  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse: In Extrakt B sind sie mit 1,5 deutlich größer als eins in Extrakt D dagegen unterhalb von eins. Die Werte für Extrakt B sind typisch für eine Abreicherung von Uran, wohingegen die Werte für Extrakt D auf eine Urananreicherung hindeuten. Es ist also möglich, dass aus der leichter mobilisierbaren Phase B eine Uranmobilisierung erfolgt, während Uran in einer zweiten, schwerer mobilisierbaren Phase unbeeinflusst ist.



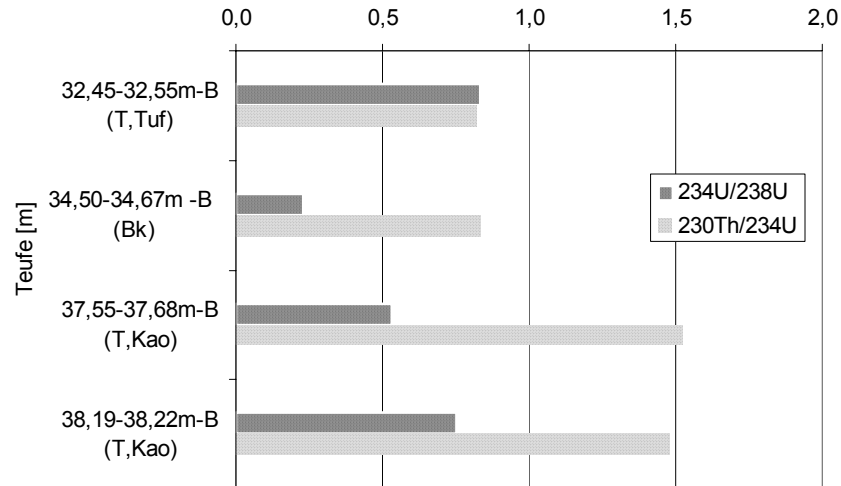
**Abb. 2.4.44:**  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt B ausgewählter Kaolin-Proben



**Abb. 2.4.45:**  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt D ausgewählter Kaolin-Proben



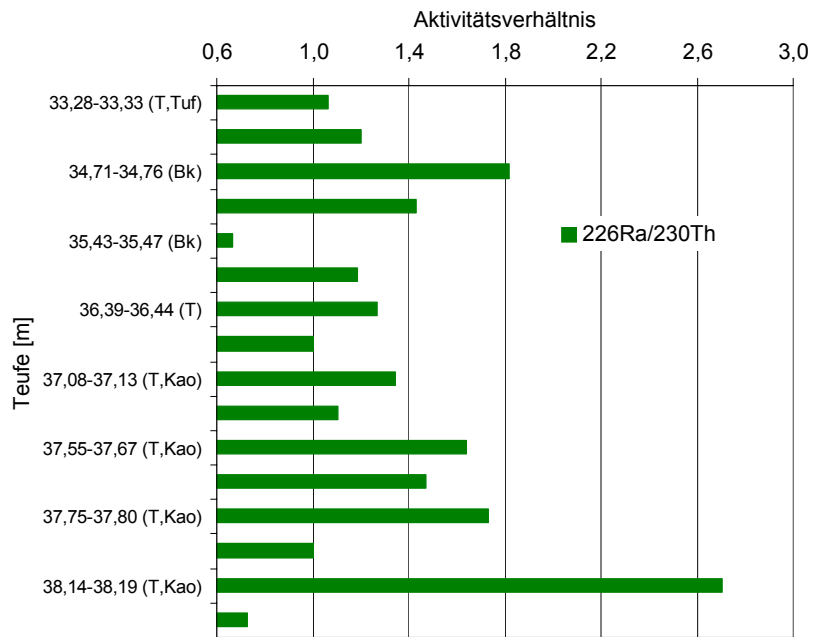
Deutlich erkennbar ist auch ein Unterschied gegenüber Extrakten des Schrittes B aus hangenden Schichten. Diese weisen, wie in Abb. 2.4.46 dargestellt  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse  $< 1$  auf.



**Abb. 2.4.46:**  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt B aus Kaolinschicht und hangenden Sedimenten

In Abb. 2.4.47 sind die  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ -Aktivitätsverhältnisse aus verschiedenen Teufen von NA4 aufgetragen.  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ -Verhältnisse  $> 1$  stehen für eine Radiumanreicherung in den entsprechenden Sedimentproben. Dies geht bei den meisten Proben einher mit einem  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnis  $< 1$ , d. h. Uran und Radium wurden gemeinsam angereichert. Vergleichbare Ergebnisse liefern z. B. radiometrische Messungen im Bereich der Kluft eines Grimsel-Bohrkerns /LAT 89/. Aus Messungen an Mineralen des anstehenden Grimsel-Granits konnte dort gezeigt werden, dass Radium bevorzugt aus Magnetit und Eisen-Magnesium-Mineralen, sowie in geringerem Maße aus Zirkon-Mineralen freigesetzt wurde. Die Rückhaltung von Radium in natürlichen Systemen erfolgt vorwiegend durch Sorption an Tonmineralen (gealterten Feldspäten), bzw. auch durch Mitfällung und Sorption an Eisen(III)-Oxyhydroxiden, Calciten und Gips, z. B. /AME 83/, /KAM 82/. Da in den Sedimenten am Standort Ruprechtov weder Fe(III)-Minerale noch Calcite nachgewiesen wurden, ist die Rückhaltung durch Sorption an Tonen wahrscheinlich.

Eine weitergehende Diskussion der radiometrischen Daten erfolgt im Rahmen der Beschreibung des „Roll-Front-Modells“ (s. u.).



**Abb. 2.4.47:**  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ -Aktivitätsverhältnisse für verschiedene Sedimentproben aus Bohrung NA4

## 2.5 Grundwasser-Untersuchungen

### 2.5.1 Chemische Analysen

Beide Bohrungen, NA4 und NA5, sind als Grundwassermessstellen ausgebaut und erlauben es, mittels fest installierter „Bladder“-Pumpen (peristaltische Pumpe „JAK GWS sampler“) diskontinuierlich Grundwasserproben zu fördern. Einzelheiten zum Ausbau der Messstellen sind in Kapitel 2.2 enthalten. Der Betrieb der Pumpen erfolgt mit einem Kompressor, der wiederum von einem Aggregat mit elektrischer Energie versorgt wird. Dieser Pumpentyp wurde gewählt, weil er sich als außerordentlich robust und zuverlässig erwiesen hat und darüber hinaus eine Kontamination des zu analysierenden Grundwassers (z. B. durch Gleit- bzw. Schmiermittel) weitestgehend vermieden wird.



**Abb. 2.5.1:** Grundwassermessstelle NA4; links: Aggregat und Kompressor zum Betrieb der Bladder-Pumpe; rechts: isolierte Durchflusszelle zur Messung der „On-site-Parameter“ Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und Redox

Der beprobbare Filterhorizont der Bohrung NA4 befindet sich in einer Tiefe von 34,50 bis 36,50 m, der Bohrung NA5 in einer Tiefe von 19,50 bis 21,50 m. Zur möglichst unbeeinflussten Messung von „On-site-Parametern“ (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential, Sauerstoffgehalt) kann die Förderleitung mit einer Temperaturisolierten Durchflusszelle verbunden werden, welche die Messsensoren der entsprechenden Messgeräte (pH-Meter etc.) aufnimmt (Abb. 2.5.1).

Neben einer Probennahme zur chemischen Analyse im Labor sind vor Ort auch ausgewählte Schnellanalysen mittels eines tragbaren Spektrophotometers (HACH

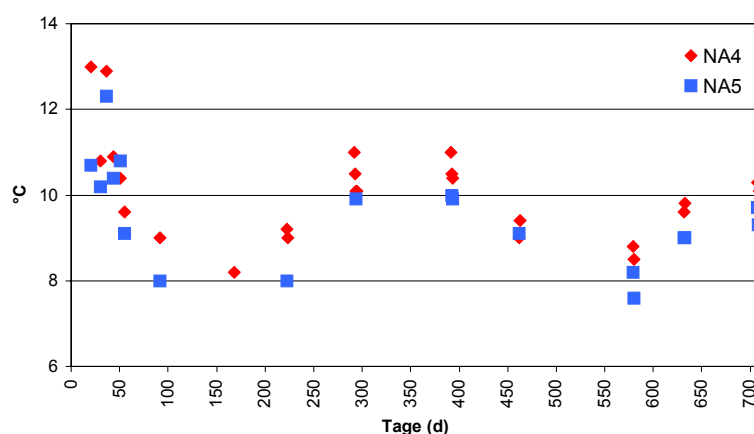
DR/2000) durchgeführt worden, um insbesondere eine unmittelbare Bestimmung redoxsensitiver Elemente wie  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{S}^{2-}$  zu ermöglichen. Diese Schnellanalytik umfasste darüber hinaus die Bestimmung von  $\text{Fe}_{\text{ges}}$ , Sulfat und Molybdän.

**Tab. 2.5.1:** Spezifikation der On-site-Messungen mit dem Spektrophotometer DR/2000

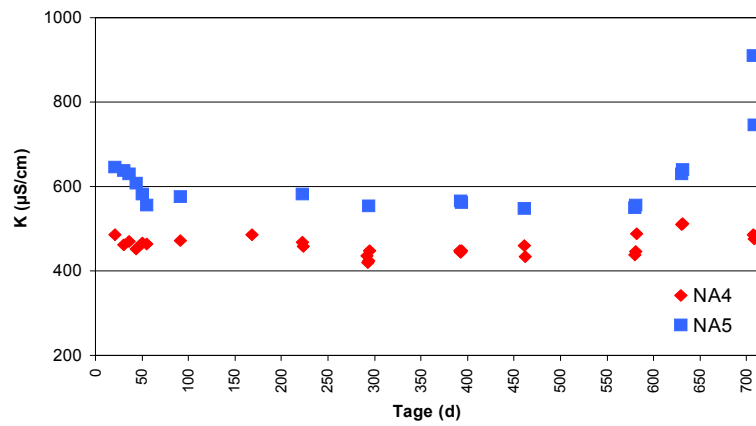
Parameter	Methode	Präzision	Messbereich	Beschreibung
Eisen, 2-wertig	1,10-Phenantrolin	1,0 mg/l +/- 0,006 mg/l	0 - 3,00 mg/l	Der 1,10-Phenantrolin-Indikator reagiert mit dem 2-wertigen Eisen in der Probe und bildet eine orange Farbe, die zur Eisenkonzentration proportional ist
Eisen, gesamt	FerroVer	1,000 mg/l +/- 0,006 mg/l	0 - 3,00 mg/l	FerroVer Eisenreagenz reagiert mit allen gelösten und den meisten unlöslichen Formen von Eisen in der Probe und erzeugt 2-wertiges Eisen. Dieses reagiert mit dem 1,10-Phenantrolin-Indikator im Reagenz und bildet orange Farbe im Verhältnis zur Eisenkonzentration
Molybdän- Molybdat	Thioglycolsäure	10,00 mg/l +/- 0,07 mg/l	0 - 35 mg/l	MolyVer1- und MolyVer2-Reagenz werden zum Puffern und Konditionieren der Probe zugesetzt. MolyVer3 enthält die Thioglycolsäure, die mit Molybdän reagiert und eine gelbe Farbe entwickelt, die proportional zur Molybdän-Konzentration ist
Sulfat	SulfaVer4	50 mg/l +/- 0,9 mg/l	0 - 70 mg/l	Sulfat-Ionen in der Probe reagieren mit Barium im SulfaVer4-Sulfatreagenz und bilden eine unlösliche Bariumsulfat-Trübung. Die Stärke der Trübung ist proportional zur Sulfat-Konzentration
Sulfid	Methylenblau	0,250 mg/l +/- 0,003 mg/l	0 - 0,600 mg/l	Schwefelwasserstoff und in Säure lösliche Metallsulfide reagieren mit N,N-dimethyl-p-phenylendiaminoxalat und bilden Methylenblau. Die Intensität der blauen Farbe ist proportional zur Sulfidkonzentration

In Abb. 2.5.2 bis Abb. 2.5.5 sind die zeitlichen Verläufe der in der Durchflusszelle erfassten Parameter dargestellt. Unterschiedliche Punkte zum gleichen Beprobungsdatum weisen auf die Schwankungsbreite der Parameter in Abhängigkeit von Pump-

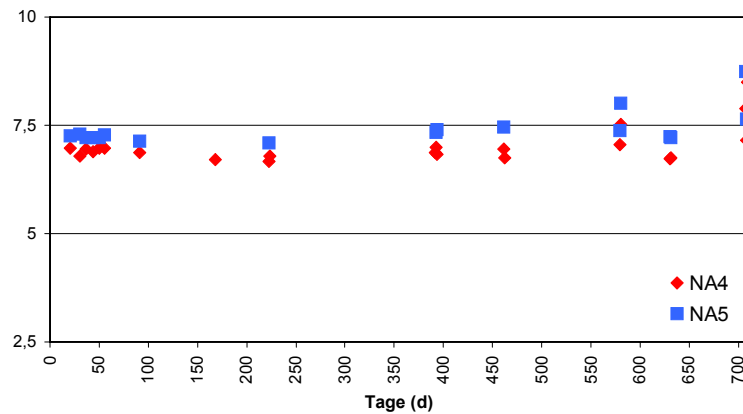
menge und -dauer sowie von Geräteeigenschaften hin. Der Temperaturverlauf (Abb. 2.5.2) zeigt eine deutliche, mit den Jahreszeiten korrelierende Variation. Unter Berücksichtigung der hohen Grundwasseralter und der Tiefe der Beprobung ist dieser Effekt wohl auf eine nicht vollständige Isolierung der Durchflusszelle zurückzuführen. „Anfangseffekte“ in unmittelbarer zeitlicher Nähe zu den Bohrarbeiten sind durch bohrbedingte Störungen des Grundwasserchemismus und -milieus verursacht. Daneben zeigen alle anderen Parameter einen mehr oder weniger kontinuierlichen Verlauf über einen Messzeitraum von ca. 2 Jahren, Abweichungen am rechten Bildrand sind durch den Einsatz eines neuen Messgerätesatzes verursacht. Diese Abweichungen verdeutlichen aber auch, dass die Parameter einer Schwankungsbreite unterliegen und die erzielten Ergebnisse in erster Linie hinsichtlich ihrer Größenordnung und ihrer relativen Schwankungen zu interpretieren sind. Bei allen Messungen der „On-site-Parameter“ werden offenbare Unterschiede in den Grundwässern der Bohrung NA4 und NA5 deutlich. NA4 weist generell geringere elektrische Leitfähigkeiten, niedrigere pH-Werte und ein deutlich negativeres Redoxpotential auf (s. auch Tab. 2.5.2 und Tab. 2.5.3). Dieses negativere Redoxpotential spiegelt sich auch in den Ergebnissen der vor Ort durchgeführten Analysen (Abb. 2.5.6, Abb. 2.5.7) mit einem Spektrophotometer wider. Im Grundwasser der Bohrung NA4 liegt praktisch das (im Rahmen der Messgenauigkeit) gesamte vorkommende Eisen als  $\text{Fe}^{2+}$  vor, während das im oberflächennaheren Horizont der Bohrung NA5 beprobte Grundwasser eine deutliche Vorrangstellung des Gesamt-Eisens gegenüber  $\text{Fe}^{2+}$  aufweist. Demgegenüber unterscheiden sich die beiden Grundwässer im Sulfat-/Sulfid-Verhältnis nicht.



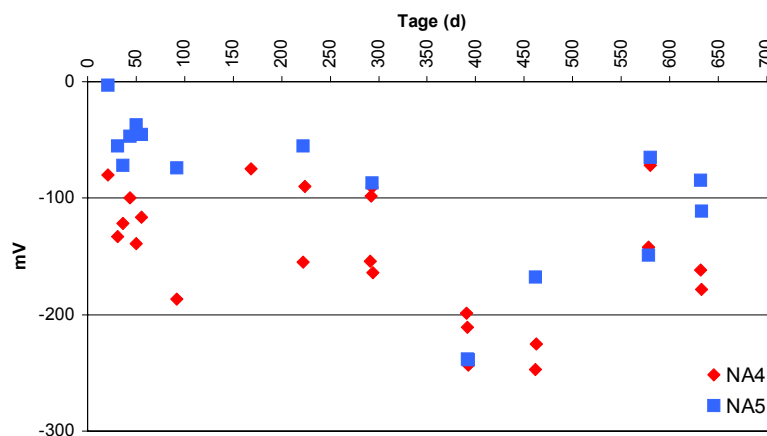
**Abb. 2.5.2:** Zeitliche Temperaturentwicklung im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5



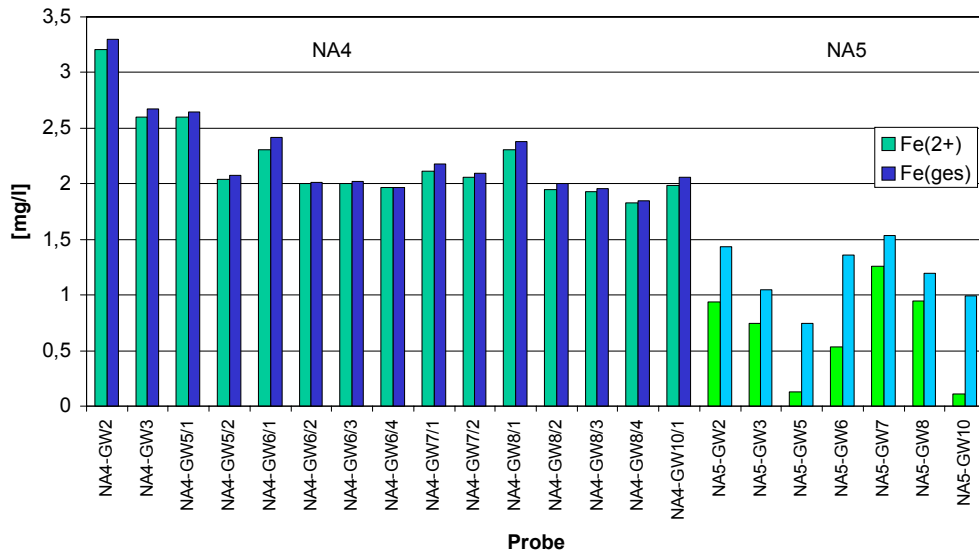
**Abb. 2.5.3:** Zeitliche Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5



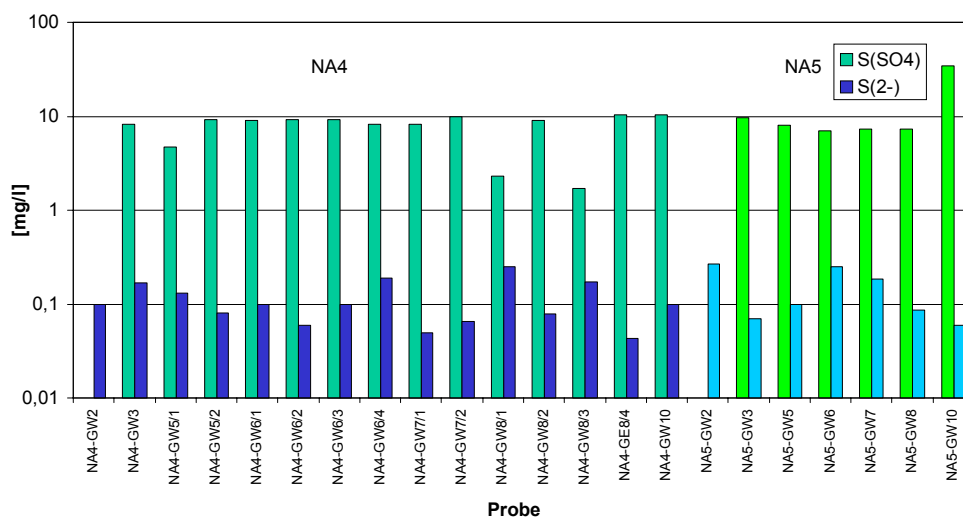
**Abb. 2.5.4:** Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5



**Abb. 2.5.5:** Zeitliche Entwicklung des Redoxpotentials im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 (bezogen auf die eingesetzte Pt-Ag/AgCl-Elektrode; zur Normierung auf Standard-Wasserstoffelektrode müssen zum angegebenen Wert 210 mV addiert werden)



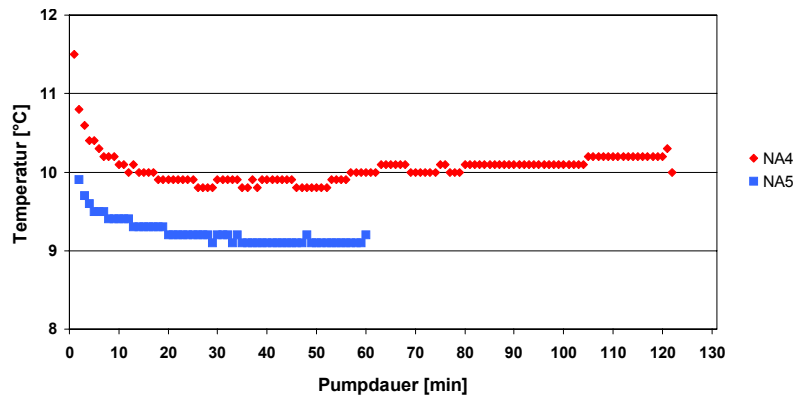
**Abb. 2.5.6:** „On-site“ gemessene Fe-Gehalte im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 (Vergleich von  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}_{\text{ges}}$ ) - zur Probenbezeichnung s. Übersichtstabelle im Anhang



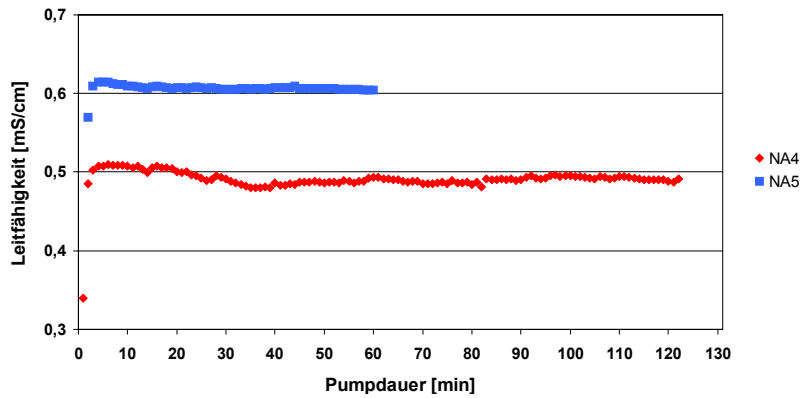
**Abb. 2.5.7:** „On-site“ gemessene S-Gehalte im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 (Vergleich von  $\text{S}(\text{SO}_4)$  und  $\text{S}^{2-}$ )

Ob die in den oben dargestellten Zeitreihen (Abb. 2.5.2 bis Abb. 2.5.5) erkennbare Schwankungsbreite der Parameter im Verlauf einer Grundwasser-beprobung auch auf den Einfluss der verwendeten Messgeräte (die immer nur eine Einzelmessung erlauben und nach Einschalten nicht unmittelbar konstante Werte anzeigen) zurückgeführt werden kann, wurde anhand von Zeitreihenmessungen überprüft, bei denen neue WinLab-Messgeräte mit integriertem Datenlogger eingesetzt worden sind.

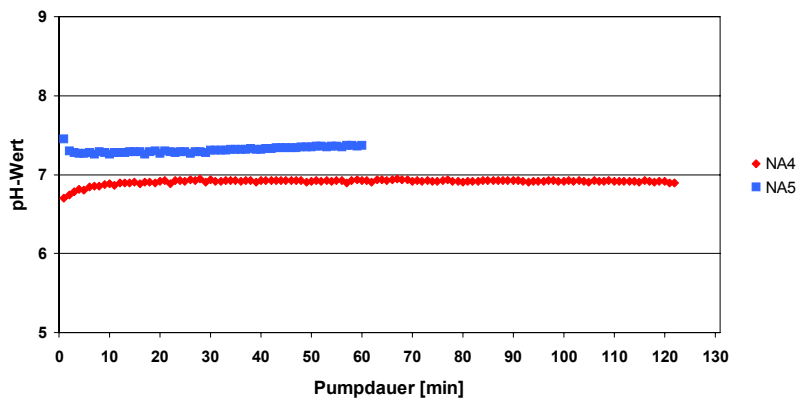
Die Ergebnisse dieser Zeitreihenmessungen in NA4 und NA5 sind in Abb. 2.5.8 bis Abb. 2.5.12 dargestellt.



**Abb. 2.5.8:** Zeitliche Entwicklung der Grundwassertemperatur während eines Pumptests



**Abb. 2.5.9:** Zeitliche Entwicklung der Grundwasser-Leitfähigkeit während eines Pumptests

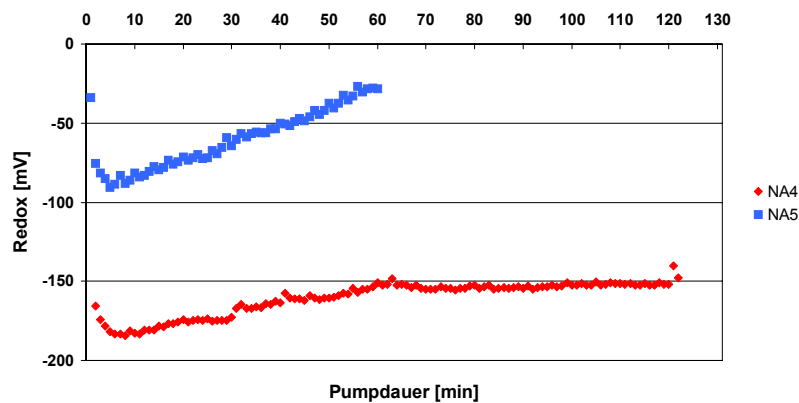


**Abb. 2.5.10:** Zeitliche Entwicklung der Grundwasser - pH-Werte während eines Pumptests

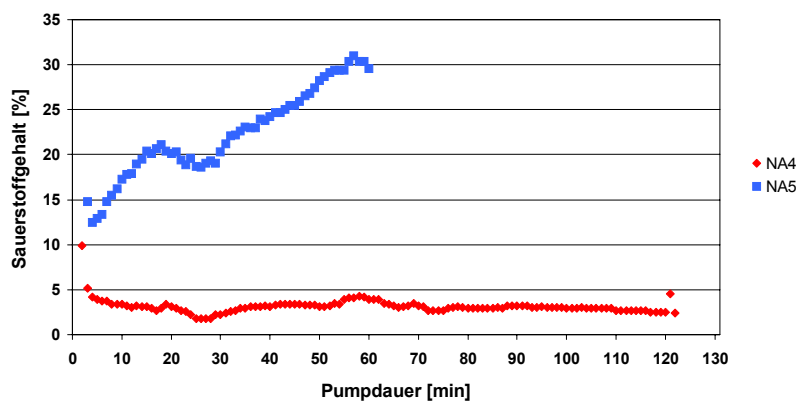


Mit Ausnahme kurzzeitiger Anfangseffekte zeigen nahezu alle Kurvenverläufe (Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert) ein +/-konstantes Verhalten, das auf eine nur geringe Beeinflussung des Grundwasserchemismus durch die Pumpaktivität hinweist. Dabei bestätigen sich auch die bereits oben dargestellten Unterschiede zwischen Grundwasser aus dem tiefen Horizont der Messstelle NA4 und dem flacheren Horizont der Messstelle NA5.

Beim Redoxpotential bzw. beim Sauerstoffgehalt (Abb. 2.5.11 und Abb. 2.5.12) werden allerdings signifikante Unterschiede zwischen NA4 und NA5 deutlich.



**Abb. 2.5.11:** Zeitliche Entwicklung der Grundwasser-Redoxwerte während eines Pumptests

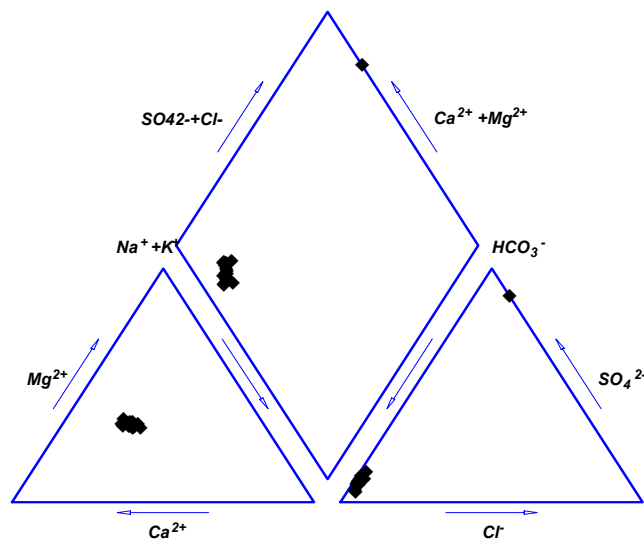


**Abb. 2.5.12:** Zeitliche Entwicklung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser während eines Pumptests

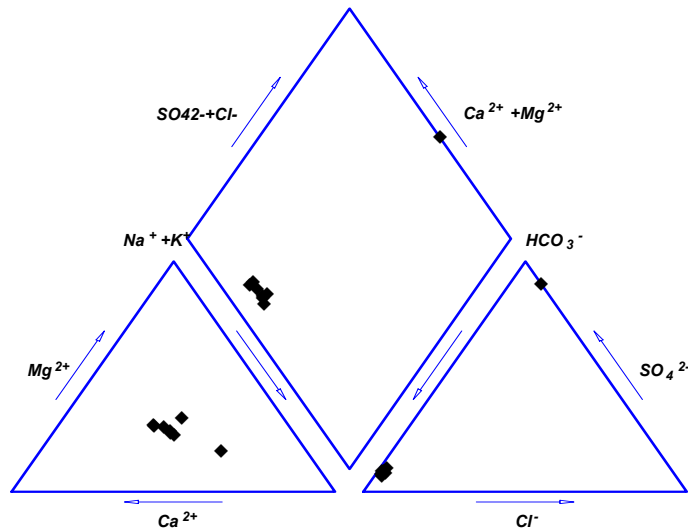
Während der in NA4 beprobte Aquifer einen Zufluss gewährleistet, der auch bei mehrstündigem Pumpen eine nur geringe Absenkung der Grundwasserspiegelhöhe (wenige cm) bewirkt, ist aufgrund der deutlich geringeren hydraulischen

Durchlässigkeit des in NA5 beprobten Horizontes kein ausreichender Zufluss festzustellen. Das hat zur Folge, dass selbst kurzzeitiges Abpumpen mit geringen Volumina hier ein drastisches Absinken der Grundwasserspiegelhöhe (bis zur Ausbausohle) bewirkt. Dieses unterschiedliche hydraulische Verhalten der beiden Grundwasser-führenden Horizonte spiegelt sich deutlich in den gemessenen Redoxwerten und Sauerstoffgehalten wider. Beide Parameter zeigen eine deutliche Korrelation untereinander. Während das in NA4 geförderte Grundwasser +/- unbeeinflusst bleibt, verursacht der nur äußerst geringe Zufluss in NA5 ein kontinuierliches und starkes Absinken der Grundwasserspiegelhöhe. Dadurch nähert sich die Luftsäule in der Messstelle immer weiter dem Filterhorizont, so dass immer sauerstoffreichereres Wasser gefördert wird, das wiederum einen Anstieg der Redoxwerte bewirkt.

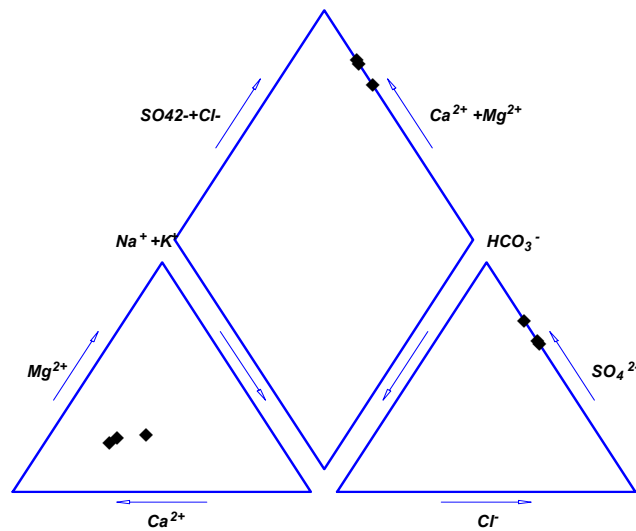
Sämtliche Beprobungskampagnen und die im Labor analysierten Elementgehalte sind im Anhang zusammengefasst. Eine Charakterisierung der Wässer erfolgt über die Konzentration der Hauptkomponenten und deren Darstellung in einem Piper-Diagramm. In Abb. 2.5.13 bis Abb. 2.5.15 sind unterschiedliche Piper-Diagramme für sämtliche Wasseranalysen (Grund- und Oberflächenwässer) dargestellt. Sowohl NA4 als auch NA5 zeigen einen ähnlichen Hauptelement-Chemismus und sind als Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer zu typisieren. Beide Grundwässer lassen sich aber auch deutlich voneinander unterscheiden und belegen in den Piper-Diagrammen unterschiedliche Feldbereiche. NA5 weist generell höhere Na- und HCO<sub>3</sub>-Gehalte auf.



**Abb. 2.5.13:** Darstellung der NA4-Grundwasseranalysen in einem modifizierten Piper-Diagramm



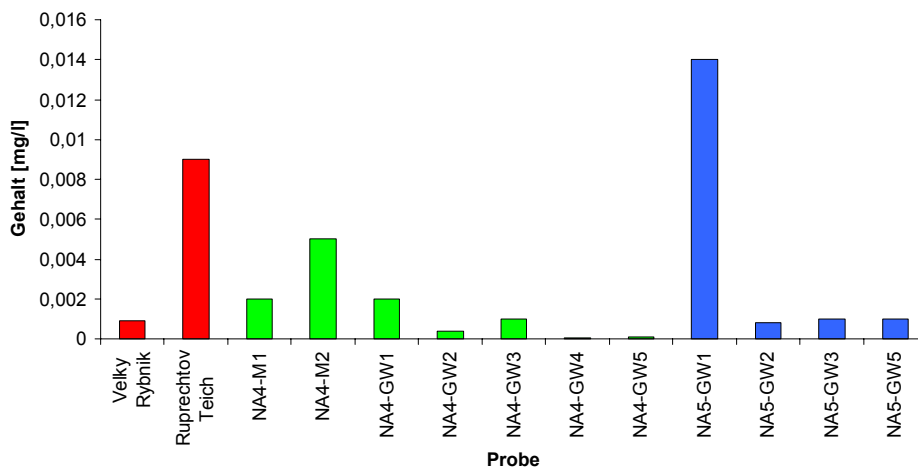
**Abb. 2.5.14:** Darstellung der NA5-Grundwasseranalysen in einem modifizierten Piper-Diagramm



**Abb. 2.5.15:** Darstellung der Oberflächenwässer im Raum Ruprechtov in einem modifizierten Piper-Diagramm (diese Abbildung lässt sich nur bedingt mit den Grundwässern aus NA4 und NA5 vergleichen, da für die Oberflächenwässer kein  $\text{HCO}_3^-$ -Wert einbezogen worden ist)

Für die Vorhabensbelange sind insbesondere auch die Urangehalte in den Grundwässern von Bedeutung (Abb. 2.5.16). Diese sind durchweg sehr gering, wobei die gemessenen U-Konzentrationen in NA5 deutlich über denen in NA4 liegen,

insgesamt im Laufe des Beprobungszeitraums (Sommer 1999 bis Sommer 2001) zurückgehen.



**Abb. 2.5.16:** Typische Urangehalte in Grund- und Oberflächenwasser. Hohe Anfangsgehalte im Grundwasser sind vermutlich durch auf die Bohrarbeiten zurückzuführende Milieustörungen verursacht. Der „Ruprechtov-Teich“ stellt einen ehemaligen Uranschurf dar

## 2.5.2 Kolloide

An jeweils einer Grundwasserprobe aus den Horizonten in 35 m und 19 m Teufe wurden Kolloidkonzentrationen und Größenverteilungen gemessen. Die Messung wurde mittels der Laser-induzierten Breakdown-Detektion (LIBD) beim Institut für Nukleare Entsorgung (INE) in Karlsruhe durchgeführt. Die Wasserproben wurden bis zur Messung unter Argon-Atmosphäre gehalten.

Die gemessenen Daten sind in Tab. 2.5.4 aufgeführt. Die Bestimmung der Massenkonzentrationen erfolgte unter Annahme einer Partikeldichte von  $2.700 \text{ kg/m}^3$ . Bei den Proben ergeben sich deutliche Unterschiede beim mittleren Partikeldurchmesser bzw. der Partikel-Konzentration. So enthält Probe 1 Partikel mit einem Durchmesser von ca. 200 nm und einer Konzentration von 15 ppb. Bei Probe 2 sind mittlerer Partikeldurchmesser und Konzentration wesentlich höher. Dies kann dadurch bedingt sein, dass sich Probe 1 zum Messzeitpunkt offensichtlich noch unter Inertgas-Atmosphäre befand, während bei Probe 2 schon ein Sauerstoff-Zutritt und damit ein Ausfällen größerer Partikel stattgefunden haben muss. Es ist anzunehmen, dass diese Partikel im wesentlichen aus Eisen(III)oxidhydrat-Spezies bestehen, die aus dem gelösten Fe(II) in Lösung bei Sauerstoffzutritt entstehen.

Tab. 2.5.2: On-Site gemessene Parameter im Grundwasser der Messstelle NA4

Bohrung	Datum	T [°C]	C [µS/cm]	pH	Redox <sup>1)</sup> [mV]	O <sub>2</sub> [mg/l]	Fe <sup>2+</sup> [mg/l]	Fe <sub>ges</sub> [mg/l]	Mo [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	S <sup>2-</sup> [mg/l]
NA4-GW1	04.08.99										
NA4-ZM	24.08.99	13,0	487	6,98	-80	0,7					
NA4-ZM	03.09.99	10,2	462	6,78	-133						
NA4-ZM	09.09.99	12,9	470	6,95	-122	0,7					
NA4-ZM	16.09.99	10,9	452	6,90	-100	0,3					
NA4-ZM	23.09.99	10,4	467	6,97	-139	4,1					
NA4-GW2	28.09.99	9,6	465	6,97	-115	0,1	3,21	3,30	1,3	n.g.	0,10
NA4-GW3	04.11.99	9,0	472	6,86	-187	10,7	2,60	2,67	0,8	25	0,17
NA4-GW4	20.01.00	8,2	486	6,70	-75	8,3					
NA4-GW5	14.03.00-a	9,1	468	6,67	-155	0,1	2,60	2,65	1,6	14	0,13
NA4-GW5	14.03.00-b	9,0	458	6,78	-90	0,0	2,04	2,08	0,2	28	0,08
NA4-GW6	23.05.00-a	11,0	436	n.g.	-154	5,2	2,31	2,42	0,8	27	0,10
NA4-GW6	23.05.00-b	10,5	421	n.g.	-98	0,2	2,00	2,01	0,8	28	0,06
NA4-GW6	23.05.00-c	10,1	424	n.g.	-91	0,2	2,00	2,02	0,1	28	0,10
NA4-GW6	24.05.00-d	10,1	448	n.g.	-164	0,2	1,97	1,97	0,8	25	0,19
NA4-GW7	29.08.00-a	11,0	448	6,86	-199	0,1	2,11	2,18	0,8	25	0,05
NA4-GW7	29.08.00-b	10,5	445	7,00	-211	0,2	2,06	2,09	0,6	30	0,07
NA4-GW7	29.08.00-c	10,4	448	6,82	-243	0,4					
NA4-GW8	07.11.00-a	9,0	461	6,96	-247	0,4	2,31	2,38	--	7	0,251
NA4-GW8	07.11.00-b	9,1	429	6,70	-239	0,1	1,95	2,00	--	27	0,079
NA4-GW8	08.11.00-a	8,8	457	6,95	-222	0,1	1,93	1,96	0,1	5	0,173
NA4-GW8	08.11.00-b	9,4	434	6,75	-225	0,0	1,83	1,85	0,4	31	0,043
NA4-GW9	06.03.01-a	8,8	439	7,05?	-142	-	-	-	-	-	-
NA4-GW9	06.03.01-b	8,5	447	7,52?	-72?	-	-	-	-	-	-
NA4-GW9	06.03.01-c	(15,4)	488	(6,87)	(-67)	(2,23)	(1,54)	(1,88)	(0,7)	(26)	(0,03)
NA4-GW10	26.04.01-a	9,6	511	6,73	-162	-	1,98	2,06	0,6	31	0,1
NA4-GW10	26.04.01-b	9,8	512	6,75	-178	-	-	-	-	-	-
NA4-GW11	11.07.01-a	10,3	487	7,89?	-140	-	-	-	-	-	-
NA4-GW11	11.07.01-b	9,7	476	7,15?	-142	-	-	-	-	-	-
NA4-GW11	11.07.01-c	10,1	482	8,50?	-116	-	-	-	-	-	-

(xx) = Nachmessung am Folgetag; n.g. = nicht gemessen

<sup>1)</sup> Werte bezogen auf Pt-Ag/AgCl-Elektrode, zur Normierung auf Standard-Wasserstoffelektrode muss zum angegebenen Wert 210 mV addiert werden

Tab. 2.5.3: On-Site gemessene Parameter im Grundwasser der Messstelle NA5

Bohrung	Datum	T [°C]	C [µS/cm]	pH	Redox <sup>1)</sup> [mV]	O <sub>2</sub> [mg/l]	Fe <sup>2+</sup> [mg/l]	Fe <sub>ges</sub> [mg/l]	Mo [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	S <sup>2-</sup> [mg/l]
NA5-GW1	04.08.99										
NA5-ZM	24.08.99	10,7	647	7,26	-3	0,6					
NA5-ZM	03.09.99	10,2	639	7,30	-55						
NA5-ZM	09.09.99	12,3	631	7,21	-72	0,6					
NA5-ZM	16.09.99	10,4	609	7,22	-47	0,3					
NA5-ZM	23.09.99	10,8	583	7,22	-37	0,4					
NA5-GW2	28.09.99	9,1	560	7,27	-45	0,2	0,94	1,43	0,1	n.g.	0,27
NA5-GW3	04.11.99	8,0	577	7,14	-74	0,2	0,74	1,05	1,0	29	0,07
NA5-GW4	20.01.00	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
NA5-GW5	14.03.00	8,0	582	7,10	-55	4,8	0,13	0,74	0,0	24	0,10
NA5-GW6	24.05.00	9,9	555	n.g.	-87	8,5	0,53	1,36	1,6	21	0,25
NA5-GW7	29.08.00-a	10,0	567	7,33	-238	1,4	1,26	1,53	0,2	22	0,19
NA5-GW7	29.08.00-b	9,9	563	7,40	-239	1,8					
NA5-GW8	07.11.00	9,1	548	7,45	-168	4,3	0,95	1,19	--	22	0,086
NA5-GW9	06.03.01-a	8,2	551	7,37?	-149	-	-	-	-	-	-
NA5-GW9	06.03.01-b	7,6	556	8,00?	-65	-	-	-	-	-	-
NA5-GW9	06.03.01-c	(12,6)	(599)	(7,25)	(+55)	(3,68)	(0,09)	(0,39)	(0,1)	(17)	(0,02)
NA5-GW10	26.04.01-a	9,0	630	7,23	-85	-	0,11	0,99	0,5	104	0,06
NA5-GW10	26.04.01-b	9,0	640	7,22	-111	-	-	-	-	-	-
NA5-GW11	11.07.01-a	9,7	910	8,75?	-164	-	-	-	-	-	-
NA5-GW11	11.07.01-b	9,3	747	7,65?	-154	-	-	-	-	-	-

(xx) = Nachmessung am Folgetag; n.g. = nicht gemessen

<sup>1)</sup> Werte bezogen auf Pt-Ag/AgCl-Elektrode, zur Normierung auf Standard-Wasserstoffelektrode muss zum angegebenen Wert 210 mV addiert werden

**Tab. 2.5.4:** Ergebnisse der Kolloidmessung an Grundwässern aus den Messstellen NA4 (Probe 1) und NA5 (Probe 2)

	Mittlerer Partikeldurchmesser [nm]	Partikelkonzentration [ $\mu\text{g/l}$ ]	Partikelkonzentration [Partikel/ml]
Probe 1 (34,5 - 36,5 m)	208	15	$1,2 \cdot 10^6$
Probe 2 (18,0 - 20 m)	364	82	$1,2 \cdot 10^6$

Die bei Probe 1 ermittelte Kolloid-Konzentration von 15 ppb liegt im Rahmen der Konzentration natürlicher Wasser in kristallinen Gesteinsformationen. So wurden z. B. unter in-situ-Bedingungen im Felslabor Grimsel/Schweiz Untergrund-Partikel-Konzentrationen in Gebirgswässern im Bereich von einigen ppb gemessen.

Die hier untersuchten Grundwässer stammen aber aus Wasserleitern, die sich in direkter Umgebung von Ligniten befinden. Daher ist verwunderlich, dass trotz der hohen Gehalte an organischem Kohlenstoff in den Sedimenten derart geringe Kolloidkonzentrationen gemessen wurden. Tiefenwässer in Gorleben, die sich im Bereich von Lignitlinsen befinden, weisen Huminkolloid-Konzentrationen von bis zu 200 mg C/l auf (z. B. /BUC 00/).

### 2.5.3 Radiometrische Untersuchungen

Aufgrund der sehr niedrigen Urankonzentrationen im Grundwasser wurde bisher nur an einer Probe das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis bestimmt. Dafür wurde eine Wasserprobe von 80 l auf einen Liter eingedampft. Die Aktivität von  $^{230}\text{Th}$  konnte aufgrund dessen geringer Konzentration nicht bestimmt werden. Die Aktivitätsverhältnisse sind vergleichend mit Werten aus zwei Fraktionen einer Porenwasserextraktion in Tab. 2.5.5 aufgelistet. Der Wert für das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis ist mit 3,5 sehr hoch. Er stimmt aber im Rahmen der Fehlergrenzen mit den Werten der zwei Fraktionen aus der Porenwasserfraktion überein. Das spricht dafür, dass sich Porenwasser und Grundwasser im Gleichgewicht befinden.

Derartig hohe  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse von 1,5 bis 4 sind typisch für viele Grundwässer (s. z. B. /GEL 94/, /CRA 94/, /GEL 84/). Insbesondere treten im Bereich der Urananreicherung von so genannten „Roll-Front-Systemen“ entsprechend hohe

Werte auf. Dies ist auf eine erhöhte Mobilisierbarkeit des  $^{234}\text{U}$  zurückzuführen, die als Folge des radioaktiven Zerfalls des Mutternuklids  $^{238}\text{U}$  über  $^{234}\text{Th}$  und  $^{234}\text{Pa}$  auftritt. Die bei der radioaktiven Umwandlung freigesetzte Energie wirkt sich vor allem durch Rückstoßeffekte auf das Lösungsverhalten von  $^{234}\text{U}$  aus. In der Beschreibung des Roll-Front-Modells (s. u.) wird dieser Effekt eingehend diskutiert.

**Tab. 2.5.5:** Aktivitätsverhältnisse in Grundwasser- und Porenwasserproben

	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$
Grundwasser	$3,5 \pm 0,52$	n.b.
Porenwasser, 1. Fraktion	$2.48 \pm 0,4$	0.18
Porenwasser, 2. Fraktion	$2.93 \pm 0,45$	< 0.07

Die sehr geringen  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse sind typisch für viele Grundwässer und auf die geringere Löslichkeit von Thorium gegenüber Uran zurückzuführen.

#### 2.5.4 Porenwasser-Untersuchungen

In Ergänzung zu den „normalen“ Grundwasserproben sind insgesamt 10 Proben ausgewählt worden, an denen eine Porenwasserextraktion vorgenommen worden ist. Die Probenauswahl erfolgte an den noch in PVC-Rohren befindlichen und mit Paraffin versiegelten Kernabschnitten auf der Grundlage der mittels Gamma-Messungen ermittelten Bereiche vermuteter Urananreicherungen. Zu Vergleichszwecken ist auch eine Probe mit geringer Gamma-Aktivität (NA4-PW1) in das Untersuchungsprogramm einbezogen worden. Die Porenwasserextraktion selbst erfolgte in einer Druckzelle, die schematisch in Abb. 2.5.17 dargestellt ist. Einzelheiten zur Methodik und deren Grundlagen sind ausführlich in /REE 00/ dargestellt. Im Ergebnis konnten Porenwässer aus allen 10 ausgewählten Proben (Tab. 2.5.6) und in einer für die chemische Charakterisierung ausreichenden Menge gewonnen werden.

Aufgrund des relativ hohen Wassergehaltes der Tone (21,8 bis 43,7 %, bezogen auf das Trockengewicht) ist die Extraktion von Porenwasser durch Auspressen für alle Proben erfolgreich gewesen. Die Gesamt-Volumina der ausgepressten Porenwässer variieren zwischen 48,5 und 79,9 ml. Um ausreichende Probenmengen für die chemische Analytik der einzelnen Fraktionen zu erhalten, sind Versuchsdauern



zwischen 549 und 1118 Stunden und Drücke bis 45 MPa erforderlich gewesen. (Tab. 2.5.7).

Die Ionenbilanzen liegen grundsätzlich unter 10 % Fehler (meistens sogar unter 5 %) und dokumentieren eine akzeptable Datenqualität der Analysendaten. Die Zusammensetzung der Porenwässer unterscheidet sich von Probe zu Probe, obwohl alle Wässer dem Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>-Typ - bei vernachlässigbarem Cl- und NO<sub>3</sub>-Gehalt - zuzuordnen sind. Porenwässer der Proben NA4-PW1 und NA4-PW6 zeigen eine ähnliche Zusammensetzung untereinander, weisen aber - im Vergleich zu den meisten anderen Proben - einen signifikant höheren Gehalt an gelösten Feststoffen auf (ca. Faktor 10), der in erster Linie durch erhöhte Ca- und SO<sub>4</sub>-Gehalte verursacht ist. Auch Probe NA4-PW4 weist einen erhöhten Gehalt an gelösten Feststoffen auf (Faktor 5). Im Vergleich zu vorangegangenen Porenwasseruntersuchungen an Sedimenten vom Standort Ruprechtov /BRA 98/ sind die ermittelten Spurenelementkonzentrationen sehr niedrig. Dies gilt auch für die Uran-Konzentrationen, die mit max. 80 µg/l deutlich niedriger liegen als die vormals gemessenen Konzentrationen im unteren mg/l-Bereich. (Abb. 2.5.18, Abb. 2.5.19).

**Tab. 2.5.6:** Übersicht der zur Porenwasserextraktion eingesetzten Proben

Bezeichnung	Tiefe [m]	Gamma-Aktivität [counts/600 s]	Testvariante
NA4-PW1	33,28 - 33,33	60 - 90	anaerob
NA4-PW2	34,71 - 34,76	120 - 140	aerob
NA4-PW3	34,88 - 34,93	120 - 140	anaerob
NA4-PW4	36,02 - 36,07	160 - 220	aerob
NA4-PW5	36,39 - 36,44	150 - 190	anaerob
NA4-PW6	36,64 - 36,69	210 - 220	aerob
NA4-PW7	37,18 - 37,23	320 - 340	aerob
NA4-PW8	37,67 - 37,72	570 - 625	aerob
NA4-PW9	37,92 - 37,97	920 - 960	anaerob
NA4-PW10	38,22 - 38,27	910 - 920	aerob

Die Proben der Testvariante „anaerob“ sind unter Sauerstoffausschluss sowohl vorbehandelt als auch extrahiert worden, die übrigen Proben sind zwar unter anaeroben Bedingungen vorbehandelt worden, die eigentliche Extraktion erfolgte aber außerhalb der Anaerob-Kammer

Generell nimmt die Ionenstärke der einzelnen Extraktions-Fractionen mit zunehmendem Druck ab. Ungewöhnlich, aber durch eine vorangegangene Probenserie bestätigt, zeigen alle Elemente (mit Ausnahme des Bicarbonats und des Siliziums) eine Tendenz zur Konzentrationsabnahme mit zunehmender Porenwasserextraktion, während normalerweise ein Anstieg der Ca- und Mg-Konzentrationen zu beobachten

ist. Da nicht die selben Proben sowohl unter aeroben wie auch anaeroben Versuchsbedingungen extrahiert worden sind, lassen sich direkte Aussagen über den Einfluss einer möglichen Oxidation nicht ableiten. Bei der Probenvorbereitung haben alle Proben randlich leichte Oxidationsspuren aufgewiesen. Obwohl dieses Material verworfen worden ist, lässt sich ein genereller Oxidationseinfluss nicht vollständig ausschließen.

**Tab. 2.5.7:** Versuchsparameter der Porenwasserextraktion

<b>NA4-PW1</b>		<b>Einheit</b>				
Ausgangsgewicht	g	504,06				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	187	168	121	169	
Gesamt-Zeit	h	187	355	476	645	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	10	15	20	
Druck <sub>max</sub>	MPa	5	10	20	30	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	42,3	38,5	34,3	30,3	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	38,5	34,3	30,3	26,7	
Extrahiertes Volumen	ml	12,42	13,91	14,17	16,93	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	12,42	26,33	40,50	57,43	
<b>NA4-PW2</b>		<b>Einheit</b>				
Ausgangsgewicht	g	567,66				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	139	104	128	262	190
Gesamt-Zeit	h	139	243	371	633	823
Druck <sub>min</sub>	MPa	4	10	15	20	30
Druck <sub>max</sub>	MPa	8	12	18	20	35
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	43,7	37,7	33,4	29,1	24,7
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	37,7	33,4	29,1	24,7	20,1
Extrahiertes Volumen	ml	21,79	15,18	15,12	15,76	12,05
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	21,79	36,97	52,09	67,85	79,90
<b>NA4-PW3</b>		<b>Einheit</b>				
Ausgangsgewicht	g	422,10				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	78	255	247	283	
Gesamt-Zeit	h	78	333	580	863	
Druck <sub>min</sub>	MPa	2	10	18	30	
Druck <sub>max</sub>	MPa	8	12	23	35	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	39,2	34,3	29,0	23,7	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	34,3	29,0	23,7	19,6	
Extrahiertes Volumen	ml	14,47	15,18	14,97	12,14	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	14,47	29,65	44,62	56,76	

<b>NA4-PW4</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	476,03				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	28	47	138	195	421
Gesamt-Zeit	h	28	75	213	408	829
Stress <sub>min</sub>	MPa	4	6	10	15	24
Stress <sub>max</sub>	MPa	4	8	12	18	30
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	40,8	37,0	32,4	26,7	22,2
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	37,0	32,4	26,7	22,2	17,0
Extrahiertes Volumen	ml	12,59	13,87	17,85	13,81	16,10
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	12,59	26,46	44,31	58,12	74,22

<b>NA4-PW5</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	469,86				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	206	128	425	359	
Gesamt-Zeit	h	206	334	759	1118	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	15	20	30	
Druck <sub>max</sub>	MPa	10	15	27	40	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	32,1	26,8	21,3	16,5	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	26,8	21,3	16,5	11,8	
Extrahiertes Volumen	ml	15,11	14,71	11,71	11,60	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	15,11	29,82	41,53	53,13	

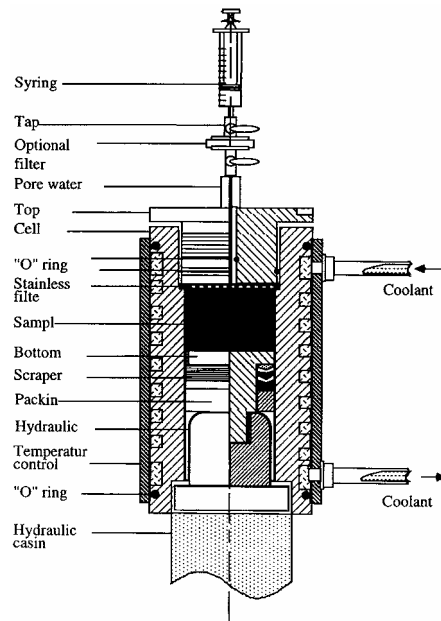
<b>NA4-PW6</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	506,62				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	125	66	337	433	
Gesamt-Zeit	h	125	191	528	961	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	8	15	20	
Druck <sub>max</sub>	MPa	6	12	18	40	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	27,7	24,5	19,9	16,1	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	24,5	19,9	16,1	11,5	
Extrahiertes Volumen	ml	11,93	14,44	11,86	16,25	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	11,93	26,37	38,23	54,48	

<b>NA4-PW7</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	501,47				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	70	192	785	360	
Gesamt-Zeit	h	70	262	747	1107	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	8	18	30	
Druck <sub>max</sub>	MPa	5	12	27	45	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	22,8	18,9	14,9	11,2	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	18,9	14,9	11,2	8,8	
Extrahiertes Volumen	ml	14,16	15,28	10,78	8,33	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	14,16	29,44	40,22	48,55	

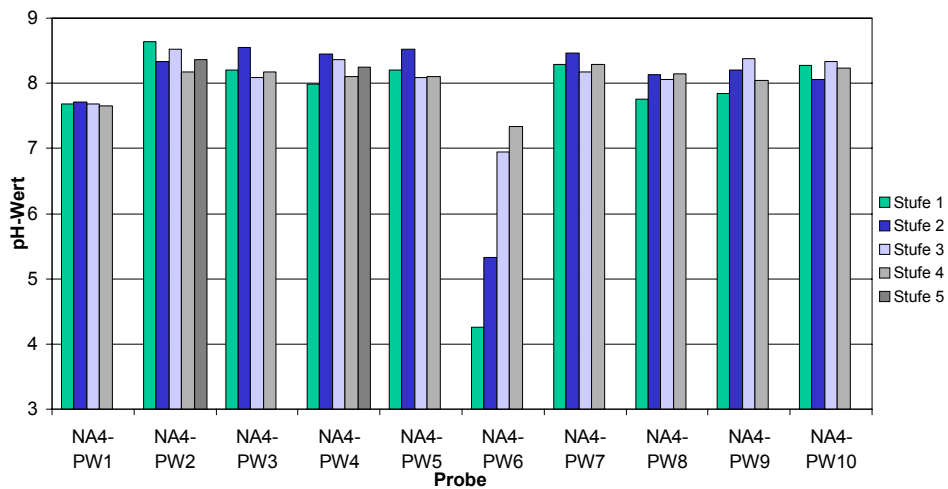
<b>NA4-PW8</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	551,14				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	102	168	161	385	
Gesamt-Zeit	h	102	270	431	816	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	7	15	25	
Druck <sub>max</sub>	MPa	5	10	20	40	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	26,0	22,0	18,9	15,4	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	22,0	18,9	15,4	11,1	
Extrahiertes Volumen	ml	12,9	11,58	14,24	14,83	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	12,9	24,48	38,72	53,55	

<b>NA4-PW9</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	540,20				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	94	122	145	194	48
Gesamt-Zeit	h	94	216	361	555	603
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	10	15	25	40
Druck <sub>max</sub>	MPa	5	10	20	35	40
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	36,1	32,7	28,5	23,6	19,2
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	32,7	28,5	23,6	19,2	18,8
Extrahiertes Volumen	ml	12,06	15,67	17,81	17,74	1,25
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	12,06	27,73	45,54	63,28	64,53

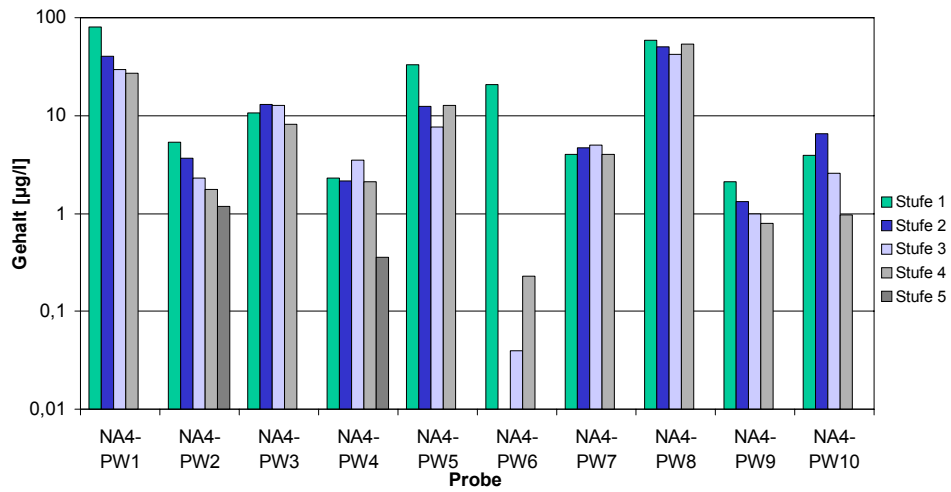
<b>NA4-PW10</b>	<b>Einheit</b>					
Ausgangsgewicht	g	611,61				
<b>Extraktions-Stufe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Test-Zeit	h	93	122	168	166	
Gesamt-Zeit	h	93	215	383	549	
Druck <sub>min</sub>	MPa	3	10	15	30	
Druck <sub>max</sub>	MPa	5	10	25	35	
Wassergehalt <sub>Anf</sub>	%	21,8	19,0	16,3	13,5	
Wassergehalt <sub>End</sub>	%	19,0	16,3	13,5	10,9	
Extrahiertes Volumen	ml	13,97	13,46	11,77	12,43	
Extrahiertes Gesamt-Volumen	ml	13,97	27,43	39,20	51,63	



**Abb. 2.5.17:** Schemazeichnung der bei Porenwasserextraktion eingesetzten Druckzelle



**Abb. 2.5.18:** pH-Wert - Entwicklung im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



**Abb. 2.5.19:** Entwicklung der Uran-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)

## 2.6 Geochemische Modellierung

### 2.6.1 Einleitung

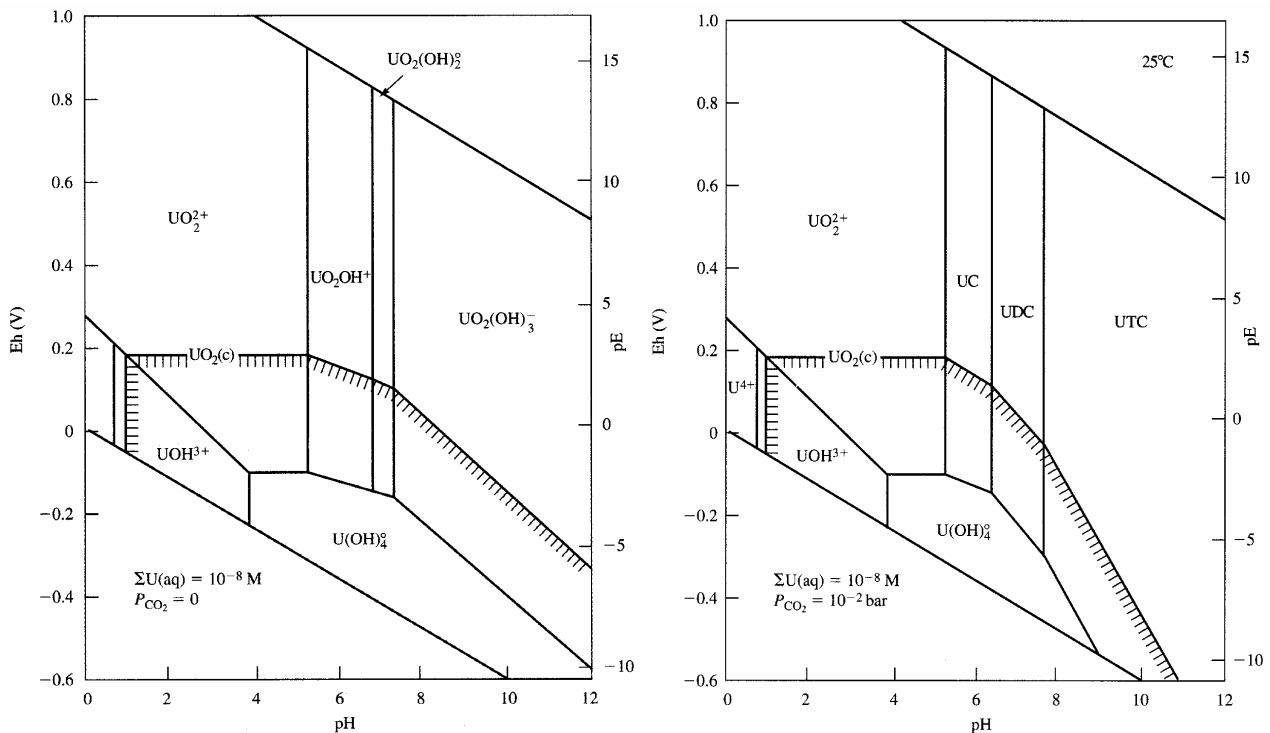
In diesem Kapitel werden die Speziation des Urans im Grundwasser führenden Horizont der Bohrung NA4 und Einflüsse des chemischen Milieus diskutiert. Dazu wurden geochemische Modellrechnungen mit den Codes EQ3/6 und PHREEQC durchgeführt und dabei die Datenbasen NEA-TDB /GRE 92a/, bzw. WATEQ4.0, die weitgehend auf der NEA-TDB basiert, verwendet.

Hinsichtlich der Uranchemie sind als Einflussgrößen insbesondere der Eh- und pH-Wert sowie Komplexbildnerkonzentrationen (hauptsächlich Carbonat und Phosphat) wichtig. Dies wird in Abb. 2.6.1 verdeutlicht, die die Stabilitätsfelder von gelösten Uran-Spezies in den Systemen U-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O und U-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O zeigt /LAN 97/. Unter stark reduzierenden Bedingungen liegt Uran hauptsächlich vierwertig, bei höheren Eh-Werten dagegen sechswertig vor. Uran(IV) ist sehr viel weniger mobil als Uran(VI). Der pH-Wert bestimmt nun maßgeblich, in welcher Spezies Uran vorliegt. In Systemen ohne CO<sub>2</sub> bestimmen oberhalb pH 5 Hydroxo-Komplexe die Speziation des sechswertigen Uranylions UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>. In carbonathaltigen Systemen überwiegen im neutralen und basischen Bereich die Carbonato-Komplexe. Phosphatkomplexe können in Systemen mit sehr hohen Phosphatkonzentrationen eine Rolle spielen. Die Speziation des vierwertigen Urans in Lösung wird im wesentlichen durch UOH<sup>3+</sup> und U(OH)<sub>4</sub><sup>0</sup> bestimmt.

Abb. 2.6.1 zeigt, dass der Übergang von U(IV) zu U(VI) in neutralen, carbonathaltigen Wässern mit pH-Werten zwischen 6 und 8 (wie sie in NA4 zu beobachten sind) - in Abhängigkeit vom pH-Wert - in einem Eh-Bereich zwischen -100 und -300 mV liegt.

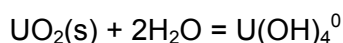
### 2.6.2 Datenbasis für Uran

Die verwendeten thermodynamischen Datenbasen basieren auf der von der OECD-NEA zusammengestellten Datenbasis /GRE 92a/ unter Berücksichtigung der Korrekturen aus /GRE 95b/. Dies betrifft beispielsweise die Stabilitätskonstante für U(OH)<sub>4</sub><sup>0</sup>.



**Abb. 2.6.1:** Uran-Speziation in den Systemen U-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (links) und U-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (rechts, P<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 10<sup>-2</sup> bar) nach /LAN 97/. Die Urankonzentration beträgt 10<sup>-8</sup> mol/l. UC, UDC und UTC bezeichnen die Komplexe UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub><sup>0</sup>, UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup> und UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>4-</sup>

Die Arbeiten verschiedener Autoren an amorphem als auch kristallinem Uraninit zeigen oberhalb von pH 4,5 keine Abhängigkeit der Löslichkeit vom pH-Wert, was darauf hindeutet, dass die Auflösung in diesem pH-Bereich durch die Reaktion

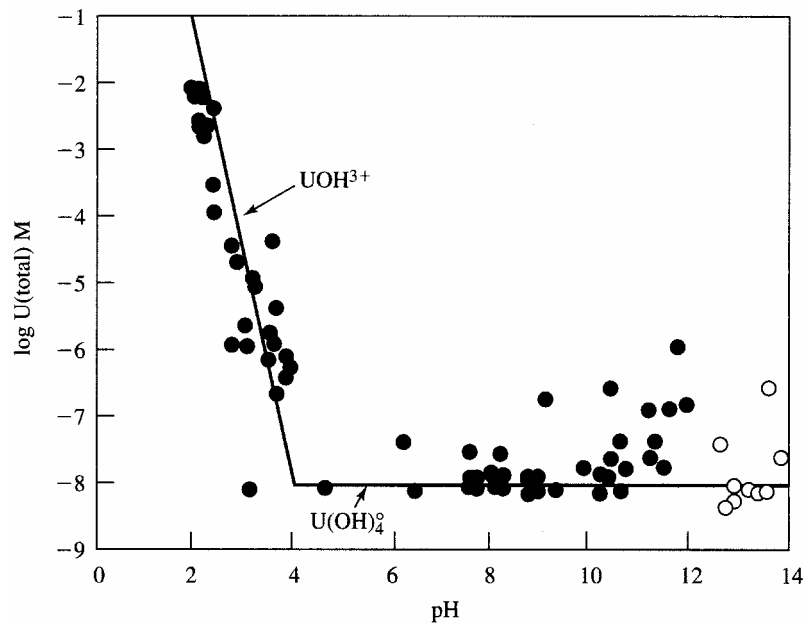


bestimmt wird /LAN 97/. In /GRE 92a/ wird auch diskutiert, dass die gemessene Löslichkeit von Uraninit unter reduzierenden Bedingungen akkurat durch die Spezies U(OH)<sub>3</sub><sup>+</sup> und U(OH)<sub>4</sub><sup>0</sup> beschrieben werden kann. Experimentell bestimmte Löslichkeiten sind in Abb. 2.6.2 dargestellt.

Hinsichtlich des sechswertigen Urans ist zu bemerken, dass eine Bildung der Hydrogenphosphatkomplexe UO<sub>2</sub>(HPO<sub>4</sub>)<sub>aq</sub> und UO<sub>2</sub>(HPO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup> angezweifelt wird (/GRE 92b/, /DUE 92/), was von großer Bedeutung für die Modellierung ist. Bei Berücksichtigung der Phosphatkomplexe mit Stabilitätskonstanten aus der Datenbasis



Wateq4f würden auch bei Phosphat-Konzentrationen von 0,1 mg/l und Bicarbonat-Konzentrationen von 340 mg/l die Phosphatkomplexe überwiegen.



**Abb. 2.6.2:** Gemessene Löslichkeiten für Uraninit nach /RYA 83/ und /RAI 90/

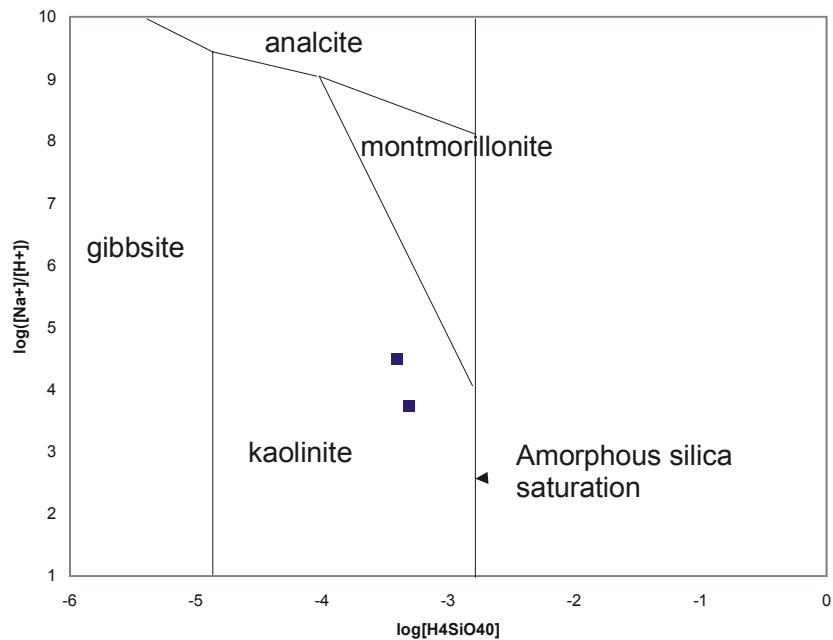
Rechnungen für Eh-Werte von 0 mV ergeben, dass dann mehr als 90% des Uran(VI) als  $\text{UO}_2(\text{HPO}_4)_2^{2-}$  vorliegen. Werden die beiden genannten Komplexe nicht berücksichtigt, ergibt die Rechnung, dass der überwiegende Anteil des U(VI) (>90 %) in Form von Carbonatkomplexen vorliegt. Die Daten für die Löslichkeit von Ningyovit entstammen /LAN 78/.

### 2.6.3 Wechselwirkung Grundwasser Sediment

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, handelt es sich bei den Grundwässern um Wasser vom Ca-Na- $\text{HCO}_3$ -Typ mit neutralem pH-Wert und niedrigen Eh-Werten. Dabei unterscheiden sich die Wässer aus den beiden Horizonten geringfügig, insbesondere im Eh-Wert sowie Na- und Ca-Konzentrationen.

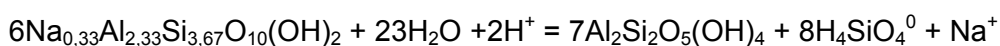
Die Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Sediment ist z. T. bereits in Kapitel 2.5 beschrieben worden. Das Grundwasser befindet sich im Gleichgewicht mit Kaolinit (Abb. 2.6.3). Die Grundwässer aus beiden Horizonten befinden sich im Stabilitätsfeld des Kaolinit. Für die Berechnung des Diagramms wurde ein idealisierter Na-

Montmorillonite mit der chemischen Formel  $\text{Na}_{0,33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  angenommen. Die Daten für die Berechnung der Stabilitätsgrenzen wurden /LAN 97/ entnommen.



**Abb. 2.6.3:** Stabilitätsdiagramm  $\log[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$  gegen  $\log[\text{H}_4\text{SiO}_4^0]$  bei 25°C und 1 bar Druck (nach /LAN 97/)

In der Umgebung der Aquifere wurden besonders hohe Kaolinitanteile in den Tonen nachgewiesen. In den übrigen Bereichen sind auch signifikante Mengen an Montmorillonit vorhanden. Montmorillonit kann durch Verwitterung in Kaolinit umgewandelt werden nach der Gleichung



Dieser Prozess findet bevorzugt in Bereichen mit starkem Grundwasserfluss statt. In Bereichen sehr niedriger Durchlässigkeit ist Montmorillonit beständiger und deshalb noch nicht verwittert.

Wie bereits erläutert, stellt der Eh-Wert für die Uranspeziation eine sehr wichtige Einflussgröße dar. Die gemessenen Eh-Werte im 35 m-Horizont liegen im Bereich von -50 bis +100 mV. Die Eh-Messungen erfolgten nach Pumpen des Wassers aus dem jeweiligen Horizont in einer abgeschlossenen Durchflussskammer. Durch die Verwendung von Bladder-Pumpen sollte Sauerstoffzutritt verhindert werden. Trotzdem

scheinen die so gemessenen Eh-Werte zu hoch zu liegen. In vielen Proben der Sedimente in 34 - 38 m Teufe wurden sowohl Pyrit als auch Siderit als Nebenminerale nachgewiesen. Geochemische Rechnungen zeigen, dass eine Sättigung der Minerale Pyrit und Siderit erst bei Eh-Werten unterhalb von -130 mV auftritt. Außerdem kann der Eh-Wert aus den gemessenen Konzentrationen des Redoxpaares  $S^{2-}/SO_4^{2+}$  abgeleitet werden. Die on-site gemessenen Parameter sind in Tab. 2.5.1 aufgeführt. Der Anteil von  $S^{2-}$  (in mol/l) an der Gesamtkonzentration des Schwefels liegt zwischen 0,5 und 2,5 %. Dies entspricht unter den gegebenen Bedingungen einem Eh-Wert zwischen -165 und -170 mV. In diesem Eh-Wert-Bereich sollte Eisen quantitativ als Fe(2) vorliegen, was im Rahmen der Fehlergrenzen auch der Fall ist.

/GRE 92b/ haben die Problematik aufgezeigt, dass Redoxpotentialmessungen in Durchflussskammern extrem empfindlich gegenüber auch nur geringstem Sauerstoffzutritt sind. In-situ-Messungen im Bohrloch liefern stabilere Werte. Im Nachfolgeprojekt soll deshalb durch sehr präzise Messung weiterer Redox-Paare und insbesondere durch den Einsatz von In-situ-Sonden unter möglichst ungestörten Bedingungen direkt im Bohrloch die Eh-Bestimmung optimiert werden. Bei der Modellierung der Uran-speziation wird derzeit von einem Referenz-Eh-Wert von -165 mV ausgegangen. Die Auswirkungen des Eh-Wertes werden anhand von Parametervariationen untersucht.

#### **2.6.4 Speziation von Uran**

Der Nachweis von Uran-Festphasen erfolgte bisher ausschließlich über Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit Mikrosonde. Ein Nachweis mittels XRD ist problematisch, da die mittleren Urankonzentrationen von einigen 100 ppm unterhalb der Nachweisgrenze der Röntgendiffraktometrie liegen. Als wichtigstes Mineral konnte im Bohrkern NA5 das phosphathaltige Mineral Ningyokit,  $CaU(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  mittels REM und Mikrosonde identifiziert werden (vgl. Kapitel 2.4).

Es wurden Gleichgewichtsrechnungen für das Grundwasser aus dem tieferen Aquifer (35 m-Horizont) der Bohrung NA4 durchgeführt und eine mittlere Zusammensetzung entsprechend Tabelle 6.2.7 angenommen. Bei dem Referenz-Eh-Wert von -165 mV liegt mehr als 96% des Urans in vierwertiger Form vor. Die dominierende Spezies ist  $U(OH)_4$ . Der geringe Anteil sechswertigen Urans liegt in Form der beiden Carbonatkomplexe  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$  und  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$  mit knapp 2 und 0,8 % vor.

Die berechneten Sättigungsindices für Uran(IV)-Minerale sind in Tab. 2.6.1 aufgelistet. Unter den Referenzbedingungen erreichen sowohl Uraninit als auch Coffinit die Sättigung, Ningyoit ist demgegenüber gering untersättigt. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Phosphatkonzentration um einen Faktor 2,5 zu einer Ningyoit-Sättigung führt (vgl. Tab. 2.6.2). Mineralphasen des sechswertigen Urans sind weit von der Sättigung entfernt.

**Tab. 2.6.1:** Sättigungsindices von Uran(IV)-Mineralen

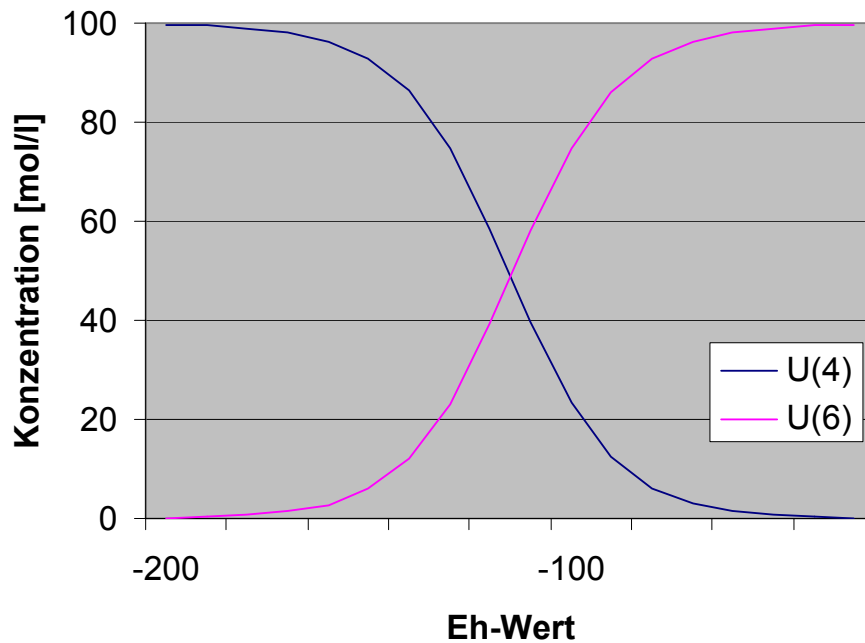
Eh-Wert [mV]	Uraninit (am.)	Ningyoit	Coffinit
-165 (Referenzfall)	0,04	-0,81	4,02
-230	0,05	-0,74	4,02
-130	-0,12	-0,97	3,85

**Tab. 2.6.2:** Sättigungsindex von Ningyoit in Abhängigkeit der Phosphat-konzentration

Konzentration P [mg/l]	Ningyoit
0,05 (Referenzfall)	-0,81
0,10	-0,21
0,125	-0,01
0,15	+0,15

Variationsrechnungen zeigen, dass sich das System nicht in einem stabilen Bereich befindet, sondern dass sich die Uranspeziation bei Änderung wesentlicher Parameter signifikant verändert. Eine Erhöhung des Eh-Werts führt zu einem Anstieg von U(VI), und damit natürlich zu einer Abnahme der Sättigung der Uran(IV)-Minerale wie in Abb. 2.6.4 und Tab. 2.6.1 dargestellt. Bei einem Eh-Wert von -115 mV beträgt der Anteil an U(IV) und U(VI) jeweils 50 %. Die wichtigsten U(VI)-Komplexe bleiben die Carbonatkomplexe  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  und  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ . Der pH-Wert des NA4-Horizonts ist über die meisten Messungen sehr stabil im Bereich von 6,9. Abweichungen des pH-Wertes haben (wie schon in Abb. 2.6.1, rechts zu sehen) in diesem Bereich ebenfalls Einfluss auf die Uranspeziation. Eine Erhöhung des Eh-Werts führt zu einer Zunahme der U(VI)- gegenüber den U(IV)-Spezies, eine Erniedrigung zu einer Abnahme. So liegen bei pH 7,3 nur noch knapp 65 %, bei pH 6,5 dagegen 99 % des Urans als U(IV)-Spezies vor.

Bei diesen Berechnungen wurden keine Komplexe mit organischen Liganden, insbesondere nicht mit Kolloiden wie Humin- oder Fulvinstoffen berücksichtigt, da bisher noch keine belastbaren Daten vorliegen. Eine erste Messung von Kolloiden im tieferliegenden Aquifer deutet auf niedrige Kolloidgehalte hin (vgl. Kapitel 2.5). Hier sind weitere Messungen von DOC und Kolloiden, insbesondere auch deren genaue Charakterisierung notwendig. Die Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit einer optimierten Eh-Wert-Bestimmung.



**Abb. 2.6.4:** Konzentration von vierwertigen und sechswertigen Uranspezies in Abhängigkeit des Eh-Wertes für Grundwasser NA4

### 2.6.5 Vergleich mit Uran-Konzentrationen anderer Arbeiten

Von /CAS 98/ wurden Löslichkeitsexperimente an künstlichen und natürlichen Uraninit-Proben in synthetischen Grundwässern mit geringer Ionenstärke unter reduzierenden Bedingungen durchgeführt. Die in Lösung gemessenen Urankonzentrationen liegen bei neutralen pH-Werten für die natürlichen Proben aus Oklo, Jachymov und Cigar Lake im Bereich von  $5 \cdot 10^{-9}$  bis  $10^{-7}$  mol/l. Die Eh-Werte lagen zwischen -150 und -275 mV. Die niedrigsten Konzentrationen wurden für die Sedimente vom Standort Cigar-Lake bestimmt und stimmen gut mit den im Bereich der Uranvererzung im natürlichen System ermittelten Urankonzentrationen. Dort treten Eh-Werte bis herab zu -245 mV auf, was die Charakterisierung des Bereichs der Uranvererzung hat gezeigt hat.

Weitere Laborarbeiten zur Löslichkeit von amorphem, bzw. kristallinem  $\text{UO}_2$  wurden u. a. von /RAI 90/ und /PAR 88/ durchgeführt. Die von /RAI 90/ gemessenen Werte in Abb. 2.6.2 liegen oberhalb von pH 4,5 bei  $10^{-8}$  mol/l ( $2,4 \cdot 10^{-3}$  mg/l). Die Werte von /PAR 88/ liegen über den pH-Bereich von 2-10 bei etwa  $10^{-9}$  mol/l, also in der gleichen Größenordnung. Möglicherweise werden also auch die Löslichkeiten an den kristallinen Proben durch amorphe Oberflächenschichten bestimmt. Die Löslichkeitsprodukte für kristallines  $\text{UO}_2$  nach /GRE 92a/ lassen um Größenordnungen niedrigere Konzentrationen erwarten.

Die im Grundwasser des 34,5-36,5 m-Horizonts ermittelten Urankonzentrationen liegen im Bereich von  $10^{-8}$  bis  $10^{-10}$  mol/l. Bisher sind zwar erst Spuren von Uraninit in den umgebenden Sedimenten nachgewiesen worden, die gemessenen Urankonzentrationen stimmen aber mit mobilen Urankonzentrationen, die in Gegenwart von amorphem Uraninit unter reduzierenden Bedingungen gemessen wurden, gut überein. Ebenso zeigen die Speziationsrechnungen, dass, wenn die Eh-Werte tatsächlich im Bereich von -165 mV liegen, bei einer Urankonzentration von  $10^{-4}$  mg/l eine Sättigung von Uraninit zu erwarten ist. Die Bedeutung des Minerals Ningyoit hinsichtlich der Urankonzentration hängt stark von der Phosphatkonzentration ab. Die höchste gemessene Konzentration liegt bei 0,082 mg P/l. Nach den Speziationsrechnungen sollte bei Werten von 0,125 mg P/l eine Sättigung des Minerals auftreten.

## 2.7 Sorption / Desorption

Zur Untersuchung des Einflusses von Sorption auf die Uranrückhaltung wurden von der Ecole des Mines, Nantes (EMN) an zwei ausgewählten Proben des Bohrkerns NA4 Batchversuche zur Sorption und Desorption von Uran durchgeführt. Verwendet wurden die Kernsegmente aus 33,16 - 33,28 m (Probe 1) und 36,24 - 36,36 m (Probe 2) Teufe.

### 2.7.1 Experimentelle Vorgehensweise

Die Gehalte der wichtigsten Elemente in beiden Sedimentproben wurden mittels Röntgenfluoreszenz ermittelt. In einer ersten Phase wurden Desorptionsexperimente an den natürlichen Sedimentproben durchgeführt. In einem zweiten Zyklus wurden zuerst Sorptionsexperimente unter Zugabe von Uran und anschließend an den gleichen Sedimentproben Desorptionsexperimente durchgeführt. Die V/M-Verhältnisse betragen jeweils 10 ml/g, in den Desorptionsexperimenten von Phase II 50 ml/g. Die Untersuchungen wurden jeweils mit deionisiertem Wasser (DW) und Grundwasser (GW) aus dem 35,5 m-Horizont bei Raumtemperatur (22°C) durchgeführt. Die Gefäße wurden mit Stickstoff gespült, verschlossen und in eine Glove-Box mit Stickstoffatmosphäre überführt. Nach Beendigung der jeweiligen Versuche erfolgten die Wasseranalysen nach Filtration durch einen 0,2 µm Filter und Ansäuern mit HNO<sub>3</sub>.

### 2.7.2 Charakterisierung der Sedimente

Beide Sedimente sind hinsichtlich ihrer Elementzusammensetzung ähnlich. Sie enthalten ca. 22 % Si, 7-12 % Al, 6-8 % Fe, 1-2 % Ca, 1 % Mg und 3-5 % Ti. Die Urangehalte betragen in Probe 1 U = 9 mg/kg und in Probe 2 U = 40 mg/kg bei etwa gleichen Th-Gehalten von rund 18 mg/kg.

Die gemessenen Kationenaustauschkapazitäten sind in Tab. 2.7.1 dargestellt. Die Werte betragen für Probe 1 30,8 und für Probe 2 27,3 meq/100g Trockenmasse Sediment. Diese Werte sind niedrig im Vergleich zu bekannten Tonmineralen wie Montmorilloniten, die ungefähr 70-80 meq/100 g betragen (/MAD 98/, /SAY 77/). Unter der Annahme, dass der Austausch mit Montmorillonit maßgebend ist, würde das einem Montmorillonitgehalt der Probe von 39 - 44 % entsprechen, was relativ gut mit den Daten aus semiquantitativen Mineralbestimmungen übereinstimmt. Mg und Ca sind die wichtigsten austauschbaren Kationen in beiden Sedimentproben. Für Probe 1 ist die

KAK zum größten Teil von Mg (21,9 meq/100 g) dominiert, während für Probe 2 Ca (16,3 meq/100 g) die KAK bestimmt. Na und K tragen nur zu einem geringen Teil mit 3,3 meq/100 g, bzw. 2,7 meq/100 g bei.

**Tab. 2.7.1:** Vergleich der Kationenaustauschkapazitäten (KAK) mit den mittels HCl extrahierten Kationen (NA<sub>4</sub>, 33,16 - 33,28 m [Probe 1] bzw. 36,24 - 36,36 m [Probe 2]) [meq/100g]

Probe	Messung	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	C.E.C.
1	KAK	5,6	21,9	0,26	2,5	0,8	30,8
	HCl-Extraktion, 1 Tag	6,8	20,1	0,34	-	-	-
	HCl-Extraktion, 31 Tage	7,6	36,4	0,21	-	-	-
2	KAK	16,3	8,3	1,96	2,1	0,6	27,3
	HCl-Extraktion, 1 Tag	10,6	5,1	2,10	-	-	-
	HCl-Extraktion, 31 Tage	15,6	9,7	1,60	-	-	-

Zusätzlich wurden an beiden Proben Extraktionsexperimente mit HCl durchgeführt. Die Extraktion mit HCl setzt austauschbare und in leicht löslichen Mineralen gebundene Spurenelemente frei. Die Ergebnisse sind in Tab. 2.7.2 dargestellt. Die Eh-Werte sind schwach oxidierend. Die Elementkonzentrationen von Mg, Ca, U, Th, Si, Fe und Mn steigen schnell innerhalb eines Tages an und bleiben dann konstant bzw. steigen langsam weiter an. Der schnelle Anstieg ist auf Ionenaustauschreaktionen, ein langsamer Weiteranstieg auf Mineralauflösung zurückzuführen. Ein Indiz dafür ist das Verhalten von Ca und Mg, wie der Vergleich in Tab. 2.7.1 zeigt. Für Probe 1 wird der Wert der KAK nach einem Tag erreicht.

Die letztendlich mobilisierten Uranmengen, umgerechnet auf die Sedimentgehalte, liegen bei 4 mg/g für Probe 1 und 10 mg/g für Probe 2. Diese Konzentrationen sind deutlich niedriger als die mittels Gamma-Spektroskopie gemessenen Gehalte, was darauf hindeutet, dass ein Uran-Anteil von 60-80 % in schwer löslichen Mineralen fixiert ist.



**Tab. 2.7.2:** Chemische Zusammensetzung, pH- und Eh-Werte der 1N HCl-Extraktionslösung von Probe 1 und Probe 2 (in [mg/l]; U und Th: [µg/l])

	Probe 1		Probe 2	
	1 Tag	31 Tage	1 Tag	31 Tage
pH	0,1	0,14	0,10	0,14
Eh [mV]	285,0	165,0	356,0	383,0
U	70,0	400,0	329,0	1140,0
Th	219,0	711,0	594,0	1880,0
Fe	43,9	130,2	2,7	15,9
Mn	4,7	6,40	0,94	1,99
Zn	0,261	0,437	1,51	10,3
Ce	4,9	7,27	4,12	11,2
Si	52,9	86,50	30,7	83,5
Ca	146,8	152,0	212,0	312,0
Mg	261,6	436,7	60,9	117,0

### 2.7.3 Ergebnisse

#### 2.7.3.1 Desorptionsexperimente (Phase 1)

Die Ergebnisse der Desorptionsexperimente sind in Tab. 2.7.3 zusammengefasst. Der pH-Wert von 7,4 des reinen Grundwassers liegt wenig höher als die in-situ im 35 m-Horizont gemessenen Werte. In Probe 1 steigt der pH-Wert während des Experiments auf 7,98, während er in Probe 2 nahezu konstant bleibt. Die Eh-Messungen deuten mit Werten zwischen 50 und 250 mV auf - im Vergleich zu den im Feld gemessenen Werten - relativ oxidierende Bedingungen hin. Das Grundwasser NA4 weist niedrige Uran-Konzentrationen in der Größenordnung von wenigen µg/l auf. Die Desorptionsexperimente in Phase 1 zeigen, dass die U-Konzentrationen trotz der relativ oxidierenden Bedingungen, die in den Experimenten herrschten, auch sehr niedrig bleiben. Die höheren Mangankonzentrationen in Probe 2 sind auf den niedrigeren pH-Wert des Grundwassers zurückzuführen.

Die Konzentrationen der Alkali- und Erdalkalitionen verändern sich nicht signifikant, was darauf hindeutet, dass das Grundwasser einen Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Der größte Teil des gelösten Kohlenstoffs liegt in anorganischer Form vor, wobei die Konzentrationen in Probe 1 mit 50-60 mg/l deutlich höher liegen als die in Probe 2.

**Tab. 2.7.3:** Chemische Zusammensetzung, pH- und Eh-Wert für Grundwasser (GW) und Deionisiertes Wasser (DW) nach Reaktion mit Probe 1 bzw. Probe 2 (in [mg/l]; U, Fe und Mn: [ $\mu\text{g/l}$ ]) - IC = anorganischer Kohlenstoff; OC = organischer Kohlenstoff

	<b>GW</b>	<b>Probe 1 - GW</b>	<b>Probe 2 - GW</b>	<b>Probe 1 - DW</b>	<b>Probe 2 - DW</b>
	0 Tage	31 Tage	31 Tage	31 Tage	31 Tage
pH	7,40	7,98	7,31	7,97	6,87
Eh (mV)	n.m.	198,0	111,0	157,0	130,0
U	0,57	1,8	0,81	0,68	0,58
Fe	667,3	79,7	31,1	22,9	5690,0
Mn	66,7	23,9	153,6	61,4	328,0
Si	3,5	2,0	1,3	0,4	0,3
Ca	32,3	55,0	34,7	20,2	30,6
Mg	24,4	43,8	23,6	14,0	18,5
Na	22,0	37,6	20,6	8,4	2,7
K	13,3	39,5	17,4	18,5	11,1
IC	52,5	57,7	24,8	19,7	15,5
OC	0,7	1,7	3,3	0,6	2,7
SO <sub>4</sub>	20,5	35,7	203,0	14,5	193,0

Die Experimente mit deionisiertem Wasser zeigen vergleichbare Ergebnisse. Es stellen sich ähnliche Elementkonzentrationen wie im Grundwasser ein, was die starke Pufferkapazität der Sedimente zeigt. Die Urankonzentrationen liegen wiederum sehr niedrig unterhalb von 1  $\mu\text{g/l}$ .

### 2.7.3.2 Sorptions- und Desorptionsexperimente (Phase 2)

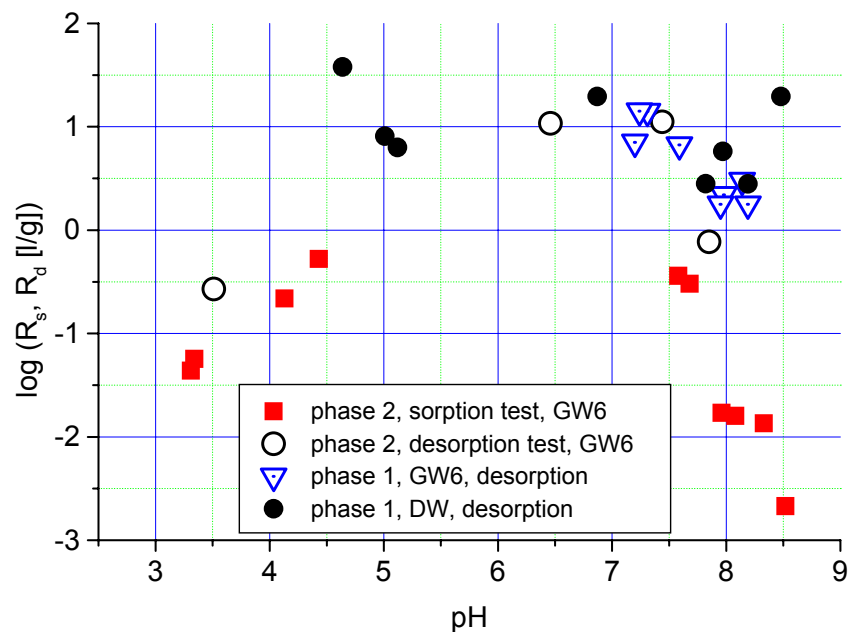
Die Sorptionsexperimente wurden in analoger Weise zu den Desorptionsexperimenten durchgeführt. Zu jeder Probe wurde zusätzlich 450  $\mu\text{g/l}$  Uran zugefügt. Auffällig ist, dass sich mit 4,3 bzw. 3,3 relativ niedrige pH-Werte in den Lösungen mit Probe 2 einstellen. Die Urankonzentrationen, die sich nach 28 Tagen eingestellt haben, und die errechneten Rs-Werte sind in Tab. 2.7.4 dargestellt, wobei sich der Rs- Wert wie folgt ergibt:

$$R_s = [(U_{\text{anfang}} - U_{\text{end}}) / U_{\text{end}}] \times v/m.$$

**Tab. 2.7.4:** Uran-Konzentration, pH-Wert, Anorganischer Kohlenstoff (IC) sowie Gesamter Organischer Kohlenstoff (TOC) nach 28 Tagen in GW und DW nach Reaktion mit Probe 1 und Probe 2

	U [ $\mu\text{g/l}$ ]	pH	IC [ $\text{mg/l}$ ]	TOC [ $\text{mg/l}$ ]	Rs [ $\text{ml/g}$ ]
Probe 1 - GW	170,0	8,0	47,380	71,72	16
Probe 1 - DW	13,6	7,6	24,780	51,77	320
Probe 2 - GW	13,7	4,3	1,032	45,33	320
Probe 2 - DW	73,6	3,3	0,663	160,90	51

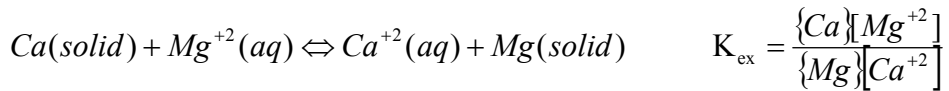
Die Experimente mit den niedrigsten Rs-Werten zeigen die höchsten TOC-Konzentrationen. Um die Reversibilität der Sorption zu überprüfen, wurden auch Desorptionsexperimente durchgeführt. Alle Rs- und Rd-Werte aus Sorptions- und Desorptionsexperimenten sind in Abb. 2.7.1 dargestellt. Die z.T. niedrigen pH-Werte sind durch Pyritoxidation unter den experimentellen Bedingungen bedingt.



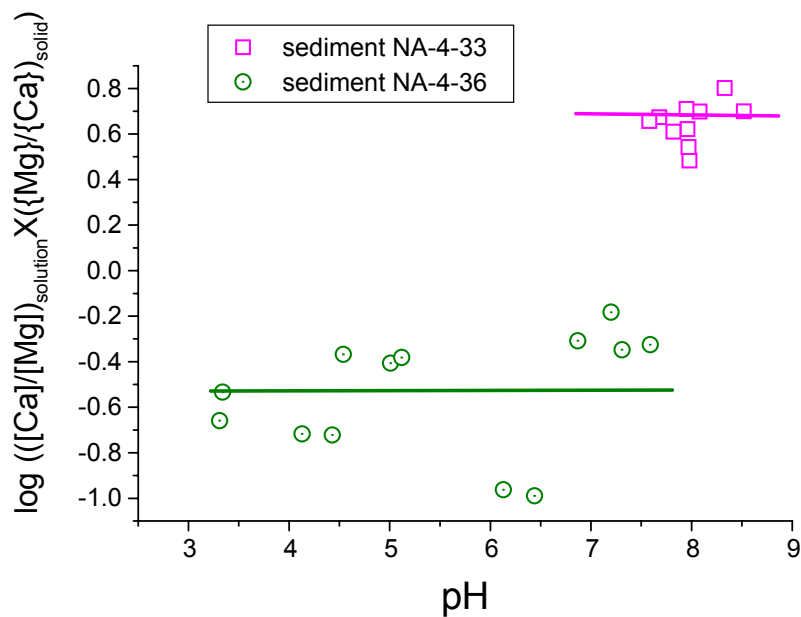
**Abb. 2.7.1:** Experimentell bestimmte Rs- und Rd-Werte in Abhängigkeit des pH-Wertes

## 2.7.4 Modellierung und Interpretation

Die wichtigsten Kationen der Grundwässer sind Mg und Ca. Ihre Konzentration ist in vielen natürlichen Wässern durch Ionenaustauschprozesse bestimmt. Zur Überprüfung, ob das auch für die hier untersuchten Systeme gilt, wurde die Austauschkonstante für die Reaktion



für verschiedene Gleichgewichtslösungen aus den Desorptionsexperimenten bestimmt. Dabei wurden für die ursprünglich in der festen Phase vorhandenen austauschbaren Mengen die Werte aus den Kationenaustauschexperimenten eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.7.2 als Funktion des pH-Wertes dargestellt.



**Abb. 2.7.2:** Berechnete Kationenaustauschkonstanten für Probe 1 (NA4-33) und Probe 2 (NA4-36) in Abhängigkeit des pH-Wertes

Es zeigt sich, dass zwei Gruppen von Austauschkonstanten  $K_{ex}$  existieren: eine für Probe 1 und eine für Probe 2, wobei Probe 1 eine höhere Affinität zu Mg und eine geringere Affinität zu Ca besitzt. Es wurde keine Abhängigkeit vom pH-Wert beobachtet. Dieser Befund zeigt, dass die Konzentrationen von Ca und Mg mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Ionenaustausch an Tonmineralen kontrolliert sind.

Die wichtigsten Anionen sind Bicarbonat und Sulfat. Unter den experimentellen Bedingungen wird die Sulfatkonzentration durch Pyritoxidation kontrolliert. Dies belegen die entsprechend niedrigen pH-Werte bei gleichzeitig hohen  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen. Die Karbonatkonzentrationen werden nicht durch die Gasatmosphäre kontrolliert, da alle Experimente unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt wurden. Da keine anderen Karbonat-Quellen vorliegen, ist anzunehmen, dass Karbonatminerale eine Rolle spielen. Außer Siderit konnten keine karbonathaltigen Minerale nachgewiesen werden, so dass unter Laborbedingungen die Auflösung von Siderit wahrscheinlich den Bicarbonatgehalt bestimmt. Unter natürlichen Bedingungen im Aquifer hat aber zusätzlich die Bildung von  $\text{CO}_2$  aus organischen Materialien Einfluss auf die Bicarbonatkonzentration.

Unter Berücksichtigung der in den Desorptionsexperimenten gemessenen Urankonzentrationen von wenigen  $\mu\text{g/l}$  und Eh-Werten von 100-200 mV ergibt sich aus geochemischen Rechnungen mit PHREEQC, dass kein relevantes Uranmineral gesättigt ist. Das heißt, dass unter den experimentellen Bedingungen Uranphasen wie Uraninit aufgelöst werden. Allerdings sind Auflösungsraten von Uraninit extrem langsam. Auch eine Ausfällung sekundärer U(VI)-Mineralphasen kann nach geochemischen Rechnungen ausgeschlossen werden. Unter diesen Bedingungen ist es also unwahrscheinlich, dass die Urankonzentrationen durch reine Uranmineralphasen bestimmt werden.

### **Mitfällung**

Neben Ausfällungsreaktionen können Sorptionsreaktionen von Uranylspezies an Tonen bzw. organischen Materialien eine Rolle spielen. Der Logarithmus des Verteilungskoeffizienten als Funktion des pH-Werts zeigt, dass die höchsten Verteilungskoeffizienten im pH-Bereich von 5 bis 7,5 erhalten werden. Dieses Verhalten wird in vielen natürlichen Sediment-Grundwassersystemen beobachtet. Bei höheren pH-Werten führt die Bildung stabiler Uran-Carbonato-Komplexe zu einer Reduktion des sorbierten Uran-Anteils. In den Sorptions-/Desorptionsexperimenten liegen bei gleichem pH die mittels Desorption gemessenen Verteilungskoeffizienten,  $R_d$ , höher als die bei Sorption gemessenen Werte  $R_s$ . Erklärungen dafür könnten:

- eine irreversible Sorption,
- eine langsame Sorptionskinetik oder

- ein immobil gebundener Urananteil, der sich sehr langsam gegenüber der Beobachtungszeit löst

sein. Wenn irreversible Sorption eine Rolle spielt, kann man annehmen, dass sich die sorbierte Uranmenge additiv aus zwei Anteilen zusammensetzt, einem reversibel  $U_{rev}$  und einem irreversibel gebundenen  $U_{irr}$ . Der Verteilungskoeffizient ergibt sich dann als

$$R_s = \frac{U_{rev} + U_{irr}}{[U(VI)]} = \frac{U_{irr}}{[U(VI)]} + K_d$$

wobei  $[U(VI)]$  die Konzentration des gelösten U(VI) und  $K_d$  den Verteilungskoeffizient für reversible Sorption beschreiben. Unter der Annahme, dass  $U_{irr}$  und  $U(VI)$  in einem darauffolgenden Desorptionsschritt konstant bleiben, kann für die reversibel sorbierte Uranmenge folgende Formel abgeleitet werden:

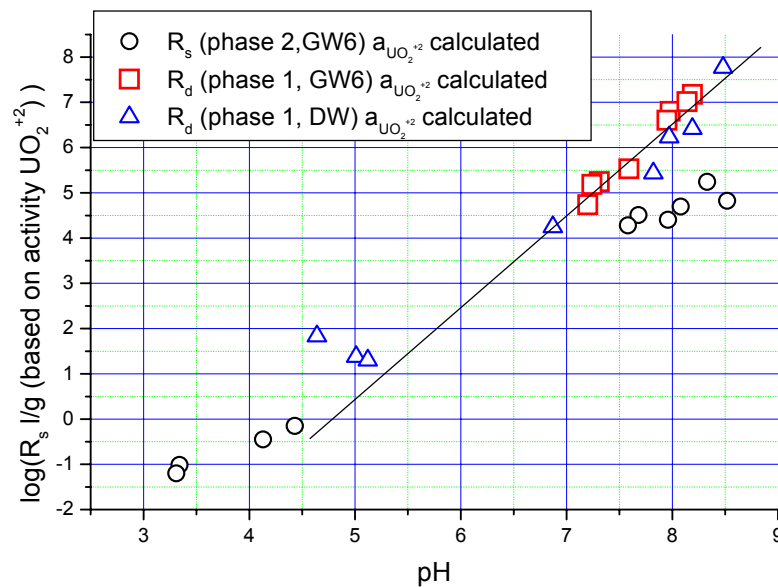
$$U_{rev, desorption\_step} = \frac{[U(VI)]_{desorption\_step}^2 \cdot V}{([U(VI)]_{sorption\_step} - [U(VI)]_{desorption\_step}) \cdot m}$$

Die Anwendung der Gleichung auf die in einem Sorptions- / Desorptionszyklus gemessenen  $R_s$ - und  $R_d$ -Werte zeigt, dass nur ein sehr geringer Anteil von <1 % reversibel sorbiert wäre. In diesem Fall würde der  $K_d$ -Wert nur geringfügig vom pH-Wert abhängen.

Nimmt man den zweiten Fall an, dass die Sorption zwar reversibel ist, die Sorptionsreaktion aber z. B. aufgrund eines langsamen Diffusionsprozesses in die Zwischenschichten der Tonminerale langsam verläuft, so würde der  $K_d$ -Wert den gemessenen  $R_d$ -Werten entsprechen. In diesem Fall wären die Sorptionswerte um einen Faktor 1000 höher als im Falle einer irreversiblen Sorption. Diese Werte sind für die Sorption an Tonmineralen ungewöhnlich hoch. Für diesen Fall wäre auch die starke pH-Abhängigkeit zu erklären. Die Sorption wird generell stark durch die Lösungschemie, wie Ionenstärke, Hydrolyse, Carbonat-Komplexierung beeinflusst. Um diese Effekte zu berücksichtigen und unter der Annahme, dass ausschließlich  $UO_2^{2+}$  sorbiert, wurde eine Sorptionskonstante  $R_{d,free}^o$  für die Aktivität des freien Uranyl-Ions berechnet. Die Beziehung zwischen  $R_{d,free}^o$  und  $R_d$  ist gegeben durch

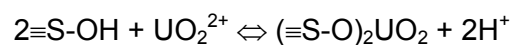
$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{R_{d,free}^o \cdot \gamma_{UO_2^{2+}}} + \frac{\sum_{n,m} [(UO_2)_m (OH)_n^{2m-n}] + \sum_l [UO_2(CO_3)_l^{2-2l}] + \sum_s UO_2(Komplex)_s}{\{U(VI)\}_{solid}}$$

wobei „Komplex“ für Sulfat und Chlorid-Komplexe steht, { } bezeichnet die Konzentrationen in der festen Phase. Die Aktivitäten des freien Uranyl-Ions  $R_{d,free}^{\circ} = \{U(VI)\}/a_{UO_2^{+2}}$  wurden direkt aus den geochemischen Modellrechnungen mit den in den jeweiligen Experimenten gemessenen Konzentrationen erhalten. Die Ergebnisse der Rechnungen sind in Abb. 2.7.3 dargestellt. In erster Näherung kann die pH-Abhängigkeit der Sorptionswerte durch eine Gerade mit der Steigung 2 beschrieben werden.



**Abb. 2.7.3:**  $R_d$ -Werte in logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit des pH-Wertes

Trotz der relativ einfachen Beziehung ist die Identifikation der relevanten Oberflächenreaktion schwierig. Aufgrund der hohen Gehalte an organischer Materie ist folgende Reaktion vorstellbar:



Die genannte Beziehung wäre unter natürlichen Bedingungen nur dann gültig, wenn  $\text{UO}_2^{2+}$  tatsächlich die dominierende Spezies darstellt. Dies ist bisher eine kritische Frage, da die im Feld gemessenen Eh-Werte, zwar bei 0-50 mV liegen, die vorhandenen Minerale Siderit und Pyrit aber auf einen niedrigeren Eh-Wert hindeuten.

### **2.7.5     Schlußfolgerungen zur Sorption**

Obwohl die Experimente unter Ausschluss von Luft durchgeführt wurden, haben sich in allen Versuchen schwach oxidierende Verhältnisse eingestellt. Trotzdem bleiben die Urankonzentrationen in Desorptionsversuchen sehr niedrig.

Die geochemischen Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Sediment sind durch Mg/Ca-Ionenaustausch - wahrscheinlich an Tonmineralen - bestimmt. In den Experimenten wird der Sulfatgehalt durch Pyritoxidation bestimmt, wobei die dadurch bedingte Abnahme des pH-Werts zu einer erhöhten Urankonzentration führt. Die Karbonatkonzentration in den Laborexperimenten wird wahrscheinlich durch das Gleichgewicht mit Siderit bestimmt. Unter natürlichen Bedingungen ist noch zu klären, welchen Einfluss der Abbau von organischem Kohlenstoff.

Die Urankonzentrationen in den Laborexperimenten können durch Sorptionsprozesse beschrieben werden. Die großen Unterschiede zwischen Sorptions- und Desorptionskonstanten können durch irreversible Sorption oder langsame Adsorption erklärt werden. Unter den reduzierenden Bedingungen des Aquifers am Standort Ruprechtov ist aber eine Kontrolle durch schwerlösliche Uran-Mineralen wahrscheinlich.

Zur weiteren Klärung des Mechanismus der Uran-Rückhaltung sind deshalb auch vergleichende Experimente unter definierten reduzierenden Bedingungen notwendig.



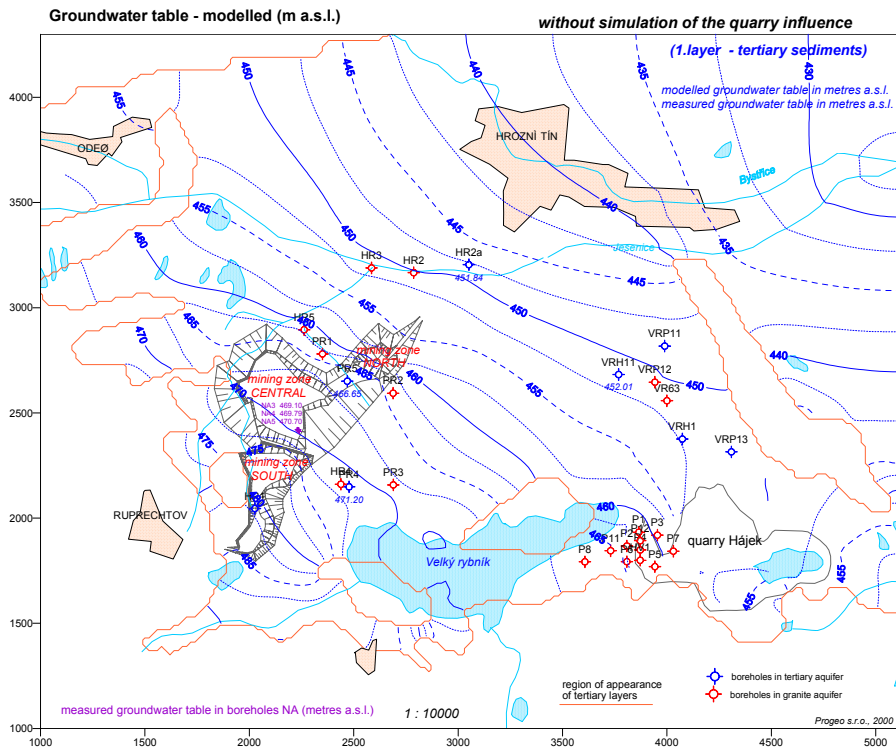
## 2.8 Hydrogeologisches Modell

### 2.8.1 Literaturlauswertung

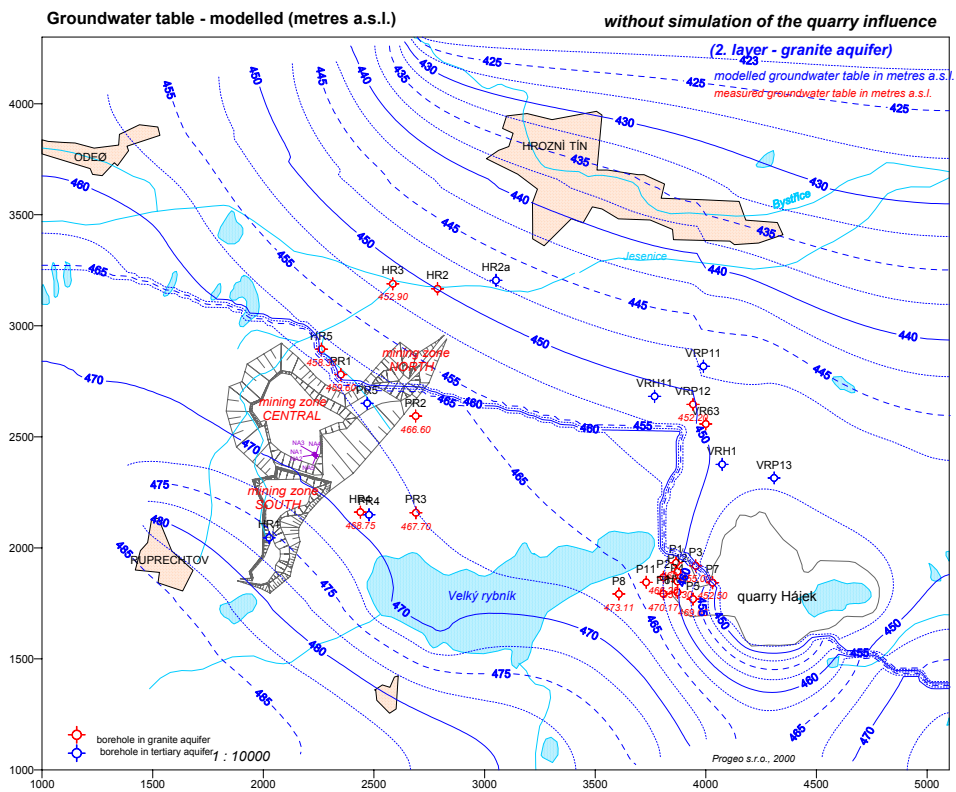
Im Projektgebiet und den angrenzenden Bereichen ist seitens einer tschechischen Betreiberfirma geplant, den die tertiären Sedimente unterlagernden Kaolin in einem Tagebau abzubauen und zu vermarkten. Auf diesbezügliche Explorationstätigkeiten in den vergangenen Jahren und deren Ergebnisse kann im Rahmen dieses Vorhabens partiell zurückgegriffen werden. Von besonderem Interesse sind dabei hydrogeologische Untersuchungen sowie ein - für die Belange der Kaolinindustrie (Beeinflussung der GW-Verhältnisse durch den geplanten Tagebau) erstelltes - hydrogeologisches Modell, da die bisher zur Verfügung stehenden Bohrungen NA4 und NA5 nur einen lokal eng begrenzten Kenntnisstand vermitteln können. Die hydrogeologische Situation im Raum Ruprechtov wird demnach folgendermaßen charakterisiert und dabei zwischen zwei unterschiedlichen Grundwassersystemen unterschieden:

1. Ein „flaches“ Grundwassersystem ist an das Poren-/Kluftsystem der tertiären vulkano-deditischen sowie der quartären Gesteine gebunden und wird durch infiltrierende Niederschläge im Gesamtgebiet gespeist. Die Entwässerung erfolgt in regionale Vorfluter, wie Jesenice, Bystrice, Sadovsky potok sowie in den See Velký rybník.
2. Ein tieferes Grundwassersystem wird im Kluftsystem des unterlagernden Granitmassivs angetroffen, das durch Infiltration von Niederschlägen im Bereich ausstreichender Granite (im S und SW des Untersuchungsgebietes) gespeist wird. Eine lokale Drainage erfolgt ebenfalls in den See Velký rybník hinein (an dessen Grund Granite ausstreichen).

Der zwischen flachem und tiefem Grundwassersystem befindliche Kaolin-Horizont wird als relativ impermeabel angesehen, wobei eine Kommunikation beider Grundwassersysteme nicht gänzlich ausgeschlossen wird. Als generelle Grundwasserfließrichtung in beiden Grundwassersystemen wird S → N angenommen, wie an den Grundwasserspiegelhöhen in Abb. 2.8.1 und Abb. 2.8.2 zu sehen ist. Dieses Ergebnis, ist in das konzeptuelle Modell der Uranherkunft und möglicher Transportwege ein-gelassen.



**Abb. 2.8.1:** Modellierung des Grundwasserspiegels in den tertiären Sedimenten am Standort Ruprechtov (nach Unterlagen der Kaolin-Industrie)



**Abb. 2.8.2:** Modellierung des Grundwasserspiegels im Granit-Aquifer am Standort Ruprechtov (nach Unterlagen der Kaolin-Industrie)

Da der Schwerpunkt der Explorationstätigkeit im Bereich des Kaolin-Horizontes gelegen hat, wurde in den tertiären Sedimenten nicht nach unterschiedlichen wasserführenden Horizonten unterschieden, sondern die Gesamtheit aller tertiären und quartären Sedimente als *ein* Aquifer angesehen. Diese Vereinfachung kann allerdings der Fragestellung des Urantransportes im Projektgebiet nicht gerecht werden, wie die Ergebnisse aus den Bohrungen NA4 und NA5 gezeigt haben. Auch alle weiteren hydrogeologischen Informationen, die das engere oder auch weitere Projektgebiet betreffen, können aufgrund ähnlicher Vereinfachungen nur ansatzweise für Projektbelange ausgewertet und verwendet werden. Die in Abb. 2.8.1 abgeleiteten Grundwasserspiegelhöhen stehen dennoch in relativ guter Übereinstimmung mit den in NA4 und NA5 gemessenen Werten.

## 2.8.2 Grundwassergeschwindigkeiten

Eine einfache Abschätzung der Grundwassertransportgeschwindigkeiten in beiden verfilterten Grundwasser-Horizonten ist auf Basis der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten und der Grundwasserspiegelhöhen möglich. Die Abstandsgeschwindigkeit  $v_A$  ergibt sich nach dem Darcy'schen Gesetz zu

$$v_A = \frac{v_f}{n_e} = \frac{k_f}{n_e} i$$

mit der Darcy-Geschwindigkeit  $v_f$ , der effektiven Porosität  $n_e$ , der hydraulischen Leitfähigkeit  $k_f$  und dem hydraulischen Gradienten  $i$ . Die in Pumpversuchen ermittelten hydraulischen Leitfähigkeiten betragen für den oberen Grundwasser-Horizont in NA5  $1,5 \cdot 10^{-7}$  m/s und für den unteren Aquifer in NA4  $1,8 \cdot 10^{-6}$  m/s (s. o.). Aus den Daten in Abb. 2.8.1 lässt sich ein hydraulischer Gradient von 10 m / 500 m im Modellgebiet ableiten. Bei einer Porosität von 40 % ergeben sich daraus Grundwassergeschwindigkeiten von 2,8 m/a für den unteren und 0,24 m/a für den oberen Aquifer.

Diese Daten basieren auf dem vereinfachten Modell des flachen Grundwassersystems und stellen nur erste Abschätzungen dar. Sie sollen durch weitere Pump-Tests, die Messung weiterer Grundwasserspiegelhöhen an neuen Probennahmestellen und Messungen nach der Einbohrlochmethode an ausgewählten Brunnen abgesichert werden.

### 2.8.3 Grundwasseralter

Zur Identifizierung möglicher Grundwasserfließ- und Urantransportwege ist die Kenntnis des jeweiligen Grundwasseralters ein weiterer wichtiger Parameter. Aus diesem Grunde sind an ausgewählten Proben folgende Untersuchungen vorgenommen worden:

- $^2\text{H}/^1\text{H}$  und  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  - Isotopenverhältnisse an flachen Grundwässern und den Wässern der beiden wasserführenden Horizonte aus NA4 und NA5

Zusätzlich wurde an beiden wasserführenden Horizonten in NA4 bzw. NA5 folgende Isotope bestimmt:

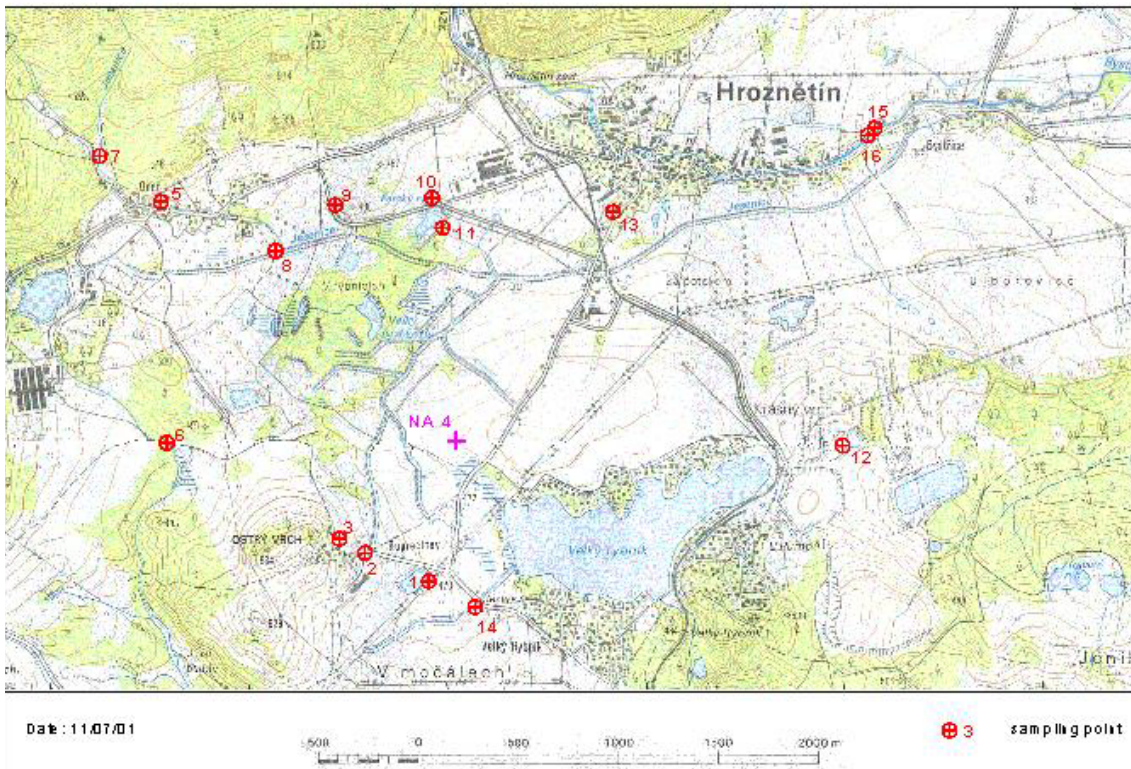
- Tritium- ( $^3\text{H}$ ) Gehalt
- Radiocarbon- ( $^{14}\text{C}$ ) Gehalt im TDIC (Total Dissolved Inorganic Carbon)
- $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  Isotopenverhältnis des TDIC
- im Wasser gelöste Edelgasmengen

Die  $^2\text{H}/^1\text{H}$  und  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse werden im folgenden mit dem dafür gebräuchlichen Begriff „stabile Isotope“ bezeichnet. Die Konzentrationen der stabilen Isotope und auch das  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnis werden als Promille Abweichung  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  bzw.  $\delta^{13}\text{C}$  des jeweiligen Isotopenverhältnisses R der Probe von demjenigen eines internationalen Standards angegeben. Die analytische Unsicherheit der Isotopenverhältnismessungen belaufen sich dabei auf 0,1 ‰ für  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^{13}\text{C}$  sowie 1,0 ‰ für  $\delta^2\text{H}$ . Die Tritiumkonzentration wird durch das Verhältnis von  $^3\text{H}$  zu  $^1\text{H}$  ausgedrückt. Dabei wird das Verhältnis von  $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$  als eine Tritiumeinheit (TU) bezeichnet. Die im Wasser gelösten Edelgasmengen werden in Normalmilliliter gelöstes Gas pro Gramm Wasser angegeben und haben einen analytischen Fehler von  $\pm 1\%$ .

#### 2.8.3.1 Flache Grundwässer

Um die in den Grundwässern ermittelte Isotopenzusammensetzung besser interpretieren zu können, sind eine Reihe von jüngeren, flachen Grundwässern aus der näheren Umgebung des Standortes beprobt und auf  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  hin analysiert

worden. Die entsprechenden Probennahmestellen sind in Abb. 2.8.3 bzw. Tab. 2.8.1 dargestellt.



**Abb. 2.8.3:** Probennahmestellen (Punkte) für flache Grund- und Oberflächenwässer in der Umgebung von Ruprechtov

Bei meteorischen, d.h. durch Niederschlag gebildeten Wässern besteht zwischen  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  der Zusammenhang

$$\delta^{18}\text{O} = 8 \cdot \delta^2\text{H} + 10, (1)$$

welcher auch als „World Meteoric Waterline“ (WMWL) bezeichnet wird. Die Darstellung der Isotopendaten erfolgt üblicherweise in einem  $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ -Diagramm.

Unterschiede in der Zusammensetzung in den stabilen Isotopen von natürlichen Wässern werden im wesentlichen durch folgende drei Prozesse verursacht:

- *Temperatureffekt:* Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Isotopentrennung haben meteorische Grundwässer, die unter kälteren klimatischen Bedingungen gebildet werden eine isotopisch leichtere Zusammensetzung. Die isotopische

Abreicherung liegt dabei zwischen -0,15 ‰ und -1,0 ‰ für das  $\delta^{18}\text{O}$  pro Grad Celsius, mit einem Mittelwert von -0,7 ‰. Die Verschiebung der Datenpunkte aufgrund des Temperatureffektes im  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm erfolgt entlang der WMWL.

**Tab. 2.8.1:** Zusammensetzung stabiler Isotope in flachen Grund- und Oberflächenwässern in der Umgebung von Ruprechtov

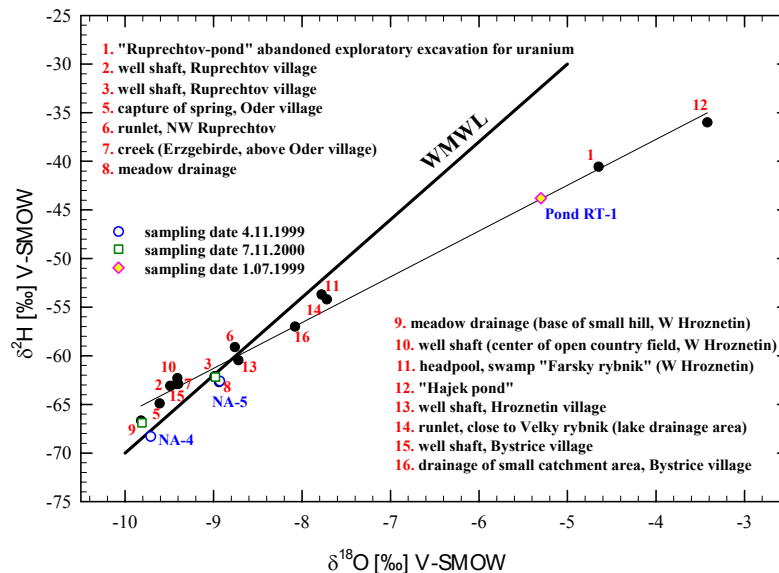
Nr.	Beschreibung	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
		[‰] V-SMOW	[‰] V-SMOW
1	„Ruprechtov-Teich“, aufgel.Uranschurf	-4,65	-40,6
2	Brunnenschacht, Ort Ruprechtov	-9,49	-63,1
3	Brunnenschacht, Ort Ruprechtov	-8,99	-62,1
5	Quellfassung, Ort Oder	-9,61	-64,9
6	Entwässerungsgraben, NW Ruprechtov	-8,76	-59,1
7	Bachlauf, Erzgebirge, oberhalb Oder	-9,40	-62,9
8	Weiden-Drainage	-8,94	-62,7
9	Weiden-Drainage, W Hroznetin	-9,83	-66,7
10	Brunnenschacht, Weide W Hroznetin	-9,41	-62,3
11	Quellsumof „Farsky rybnik“, W Hroznetin	-7,78	-53,7
12	„Hajek-Teich“	-3,42	-36,0
13	Brunnenschacht, Ort Hroznetin	-8,72	-60,5
14	Entwässerungsgraben, nahe Velky rybnik	-7,72	-54,2
15	Brunnenschacht, Ort Bystrice	-9,42	-62,9
16	Drainage, Ort Bystrice	-8,08	-57,0

- *Höheneffekt:* Grundwässer, die in verschiedenen topographischen Höhen infiltrieren, zeigen aufgrund der mit der Höhe abnehmenden Temperatur auch unterschiedliche Gehalte an stabilen Isotopen. Bei einer Zunahme der Höhe von 100 m variiert die Abreicherung im  $\delta^{18}\text{O}$  zwischen -0,15‰ und -0,5‰ entlang der WMWL.
- *Evaporationsanreicherung:* Bei der Verdunstung werden die natürlichen Wässer an schweren Isotopen angereichert. Dabei hängt die Anreicherung vom Verdunstungsgrad ab. Die durch die Evaporationsanreicherung bedingte Verschiebung der Datenpunkte erfolgt im  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm auf so genannten Evaporationsgeraden, rechts von der WMWL, wobei die Steigung der Geraden in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit zwischen 3 und 5 variiert.

In Abb. 2.8.4 sind die Werte aller untersuchten Wasserproben im  $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ -Diagramm dargestellt. Sechs der gemessenen Proben (1, 11, 12, 14, 16, RT-1) zeigen einen deutlichen Einfluß durch Evaporationsanreicherung, wobei die Proben 1, 12 und RT-1 aus offenen Gewässern (See, Teich) stammen und den stärksten Anreicherungsgrad aufweisen.

Die Probe Nr. 3 entstammt einem für Verbrauchswasser viel genutzten flachen Brunnen aus dem Ort Ruprechtov und sollte einen guten Referenzwert für rezentes Grundwasser am Standort darstellen. Diese Probe liegt genau auf der WMWL. Die Werte der übrigen Oberflächenwässer liegen ebenfalls im Bereich der WMWL. Die leichte Verschiebung einiger Werte links der WMWL ist auf die gegebene Unsicherheit der Methodik zurückzuführen, wie z. B. die Abweichung zwischen den Doppelmessungen der Messstelle NA4 am 04.11.1999 und am 07.11.2000 zeigt.

Fast alle der gegenüber der Probe 3 isotopisch abgereicherten Oberflächenwässer liegen im nördlichen Teil des Modellgebietes (5, 7, 9, 10, 15) und wurden vermutlich in höheren Lagen des nördlich angrenzenden Berggebiets gebildet und zeigen deshalb einen Einfluss des Höheneffekts. Aus den genannten Gründen wird nach bisherigem Kenntnisstand der Bereich um die Proben 3, 6, 8, 13 als repräsentativ für das rezente Grundwasser am Untersuchungsort angesehen.



**Abb. 2.8.4:** Zusammensetzung an stabilen Isotopen verschiedener Wasserproben im Raum Ruprechtov

### 2.8.3.2 Grundwasserleiter NA4 und NA5

Die Ergebnisse aller Isotopenanalysen an den Grundwässern der Horizonte NA4 und NA5 sind in Tab. 2.8.2 zusammengefasst.

Die sehr geringen Radiocarbon-Konzentrationen in den Grundwässern der Messstellen NA4 und NA5 deuten auf ein glaziales Alter der Wässer hin. Das Grundwasseralter berechnet sich nach

$$T = \tau \cdot \ln\left(\frac{-4 \cdot \delta^{13}C}{[^{14}C]}\right) \quad (2)$$

zu etwa 20.000 Jahren für den Horizont NA5 und 21.200 Jahren für den Horizont NA4. Dabei ist  $\tau = 8.270$  Jahre die Lebensdauer von  $^{14}C$  und  $[^{14}C]$  die gemessene  $^{14}C$ -Konzentration.

Ein derart hohes  $^{14}C$ -Alter ist im Hinblick auf die Modellvorstellung der horizontalen Ausdehnung des Aquifers von wenigen Kilometern eher unwahrscheinlich. Ohne weitere Messungen kann diese Diskrepanz nicht zweifelsfrei aufgeklärt werden. Ein möglicher Erklärungsansatz hängt mit der Anwesenheit organischen Materials (Ligniten) und deren reduzierenden Eigenschaft innerhalb des Aquifers zusammen.

Der Abbau von organischem Material sollte, wenn er tatsächlich stattfindet, „toten“ Kohlenstoff produzieren, der das im Grundwasser befindliche  $^{14}C$  verdünnt. Dadurch würden zu hohe Grundwasseralter vorgetäuscht. Dieser Prozess führt allerdings auch zu wesentlich niedrigeren  $\delta^{13}C_{TDC}$  als beobachtet, da typische  $\delta^{13}C$ -Werte für  $CO_2$  aus organischer Materie zwischen -20 und -30 ‰ liegen /DRE 88/. Die in NA4 und NA5 gemessenen  $\delta^{13}C_{TDC}$ -Werte liegen bei etwa -10,5 ‰. Ein ähnliches Phänomen konnte z. B. in Polen beobachtet werden; in diesem Fall lagen die gemessenen  $\delta^{13}C_{TDC}$ -Werte allerdings bei etwa -19 ‰.

Das Gebiet Ruprechtov / Hroznetin liegt nahe der Erzgebirgsstörung im östlichen Teil des Ohre-Grabens. In diesem Gebiet ist eine Vielzahl von  $CO_2$ -Exhalationen bekannt. Die  $CO_2$ -Freisetzung aus den bedeutendsten Quellen in Karlovy Vary beläuft sich auf etwa  $360 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einem  $\delta^{13}C$ -Wert von -3,5 ‰. Obwohl die Gasexhalationen im Ohre-Graben auf relativ engräumige Zentren begrenzt sind, kann ein Einfluss auf die Grundwässer im Raum Ruprechtov / Hroznetin nicht ausgeschlossen werden. Eine



derartige Gasfreisetzung würde wiederum zur Erhöhung von  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDC}}$  führen und damit die beobachteten  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von -10,4 - -10,6 ‰ erklären.

Auf der Basis der chemischen Daten und einer angenommenen Wassertemperatur von 10°C kann der partielle  $\text{CO}_2$ -Druck berechnet werden, der sich im Gleichgewicht mit der gemessenen Konzentration von  $\text{HCO}_3^-$  - Ionen befindet. Dieser beläuft sich auf 5,9 kPa (NA4) bzw. 3,8 kPa (NA5). Bei Vernachlässigung möglicher Entgasungseffekte liegen diese Werte höher als typische  $\text{CO}_2$ -Partialdrücke in der Bodenluft, was wiederum einen Hinweis auf (eine) zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Quelle(n) liefert. Aus diesem Grund sind die scheinbaren  $^{14}\text{C}$ -Grundwasseralter in den Messstellen NA4 und NA5 wahrscheinlich deutlich überschätzt.

**Tab. 2.8.2:** Isotopenzusammensetzung von Grundwässern und einem der Oberflächenwässer im Raum Ruprechtov

Spurenstoff	Einheit	Datum	NA4	NA5	RT-1
$\delta^{18}\text{O}$	[‰ <sub>ov-SMOW</sub> ]	01.07.1999			-5,30
		04.11.1999	-9,71	-8,93	
		07.11.2000	-9,81	-8,98	
$\delta^2\text{H}$	[‰ <sub>ov-SMOW</sub> ]	01.07.1999			-43,8
		04.11.1999	-68,3	-62,6	
		07.11.2000	-66,9	-62,2	
Tritium $^3\text{H}$	[TU]	01.07.1999			12,1 ± 0,7
		04.11.1999	0,0 ± 0,5	0,0 ± 0,5	
		07.11.2000	0,0 ± 0,5	0,9 ± 0,5	
$^{14}\text{C}$	[pmc]	07.11.2000	3,2 ± 0,5	4,3 ± 0,5	
$\delta^{13}\text{C}$	[‰ <sub>ov-PDB</sub> ]		-10,4	-10,6	
He	[Nml·g <sup>-1</sup> ]	11.06.2001	2,162·10 <sup>-7</sup>	9,599·10 <sup>-8</sup>	
Ne			3,738·10 <sup>-4</sup>	3,438·10 <sup>-7</sup>	
Ar			5,492·10 <sup>-4</sup>	4,974·10 <sup>-4</sup>	
Kr			1,262·10 <sup>-7</sup>	1,127·10 <sup>-7</sup>	
Xe			1,875·10 <sup>-8</sup>	1,638·10 <sup>-8</sup>	
$^3\text{He}/^4\text{He}$			5,60·10 <sup>-7</sup>	9,93·10 <sup>-7</sup>	
$\delta\text{Ne}$			[‰]		77,6
T	[°C]		0,1	3,5	

Die Zusammensetzung der stabilen Isotope in den untersuchten Wässern ist zusätzlich in Abb. 2.8.4 im Vergleich zu den oberflächennahen Wässern dargestellt. Bei NA4 und NA5 handelt es sich um Grundwässer aus dem jeweiligen Filterhorizont der

betreffenden Grundwassermeßstelle, bei RT-1 um einen Teich (aufgelassener Uranschurf) unmittelbar östlich des Ortsrandes Ruprechtov. Die Anzahl der bislang analysierten Proben ist sehr begrenzt, so dass die daraus gezogenen Schlussfolgerungen einen mehr vorläufigen Charakter aufweisen und bei Vorliegen umfassenderer Analysen ggf. geändert werden müssen. Auf der Basis der bislang vorgenommenen Untersuchungen lassen sich folgende Resultate festhalten:

- Das Grundwasser der beprobten Messstellen NA4 und NA5 enthält kein Tritium (innerhalb der o. g. Messungenauigkeiten). Das bedeutet, dass die Neubildung dieser Wässer vor der Zeitspanne thermonuklearer Explosionen in der Atmosphäre („Kernwaffentests“), also vor den späten 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts erfolgt ist. Das beprobte Oberflächenwasser (RT-1) zeigt demgegenüber einen für heutige Niederschläge und die betreffende Region Europas typischen Tritiumgehalt.
- Die Zusammensetzung stabiler Isotope in den Grundwässern der Meßstellen NA4 und NA5 bestätigt deren meteorischen Ursprung: beide Wässer liegen nahe der *WMWL*. Es sind aber auch deutliche Unterschiede zwischen beiden Wässern festzustellen: das Grundwasser der Messstelle NA5 ist isotopisch schwerer als das der Messstelle NA4, obwohl beide Horizonte nur wenige Meter voneinander entfernt liegen. Die Differenz der Isotopengehalte beträgt 0.78 ‰ in  $\delta^{18}\text{O}$  und 5.7 ‰ in  $\delta^2\text{H}$ . Auch die chemische Zusammensetzung beider Wässer zeigt moderate Unterschiede; möglicherweise stammen sie aus unterschiedlichen Horizonten eines Aquifers.

Mögliche Erklärungen für die Unterschiede zwischen beiden Grundwässern sind der Temperatur- und der Höheneffekt: Für die beobachteten Werte wäre eine Höhendifferenz zwischen den Infiltrationsgebieten des NA4- bzw. NA5-Grundwassers von ca. 250 m erforderlich, wobei das Wasser von NA4 in einem höherem Niveau infiltriert sein müsste. Das Grundwasser aus der Messstelle NA5 weist Gehalte an natürlichen Isotopen vergleichbar mit denen von Probe 3 auf, die ein typisches rezentes Grundwasser an dem Standort darstellt.

Eine Überprüfung dieser These ist mittels Edelgasmessungen möglich. Die gemessenen Konzentrationen an gelösten atmosphärischen Edelgasen im Grundwasser erlauben eine Berechnung der Edelgastemperatur, die der mittleren

jährlichen Bodentemperatur entspricht. Unter der Annahme einer Bildungshöhe von 520 m (topographische Höhe des ausstreichenden Granits, der bislang als Infiltrationsgebiet angenommen wird) errechnen sich aus den Daten der Tab. 2.8.2 Temperaturen von 0,1°C für die Messstelle NA4 und 3,5°C für die Messstelle NA5. Wie bei den stabilen Isotopen kann der Unterschied in den Edelgasgehalten nicht nur durch einen Unterschied in der Temperatur bei der Infiltration, sondern auch durch einen Unterschied in der Bildungshöhe erklärt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß mit zunehmender Höhe nicht nur die Temperatur, sondern auch der Partialdruck der Edelgase in der Luft abnimmt. Legt man die aus den stabilen Isotopendaten gezogene Annahme zugrunde, dass der Unterschied in den Messwerten aus einem um 250 Meter höher liegenden Infiltrationsgebiet des Wassers von Messstelle NA4 resultiert, so müssten die Edelgaskonzentrationen in Messstelle NA4 niedrigere Werte als die tatsächlich gemessenen zeigen, bzw. bei den gemessenen Konzentrationen würde dies auf eine noch niedrigere als die genannten 0,1°C Bildungstemperatur hindeuten, was unrealistisch ist. Aufgrund der Edelgasdaten erscheint eine unterschiedliche Bildungstemperatur wahrscheinlicher geeignet die Messwerte zu erklären, als eine unterschiedliche Bildungshöhe.

Nimmt man eine Differenz der Infiltrationstemperatur von mindestens 3,5°C an, lässt dies darauf schließen, dass das Grundwasser aus der Messstelle NA4 glazialen Ursprungs ist, während jenes aus Messstelle NA5 holozänen Ursprungs ist. Unter der Annahme glazialen Alters für das Grundwasser aus NA4 und holozänen Alters für das Wasser aus NA5 wäre eine etwas höhere Differenz in den Gehalten der stabilen Isotope und in der Edelgastemperatur zu erwarten. Übliche Werte liegen bei 5°C /STU 95/. Daher ist es wahrscheinlich, dass das Wasser aus der Grundwassermessstelle NA4 eine Mischung zwischen holozänem Wasser mit einer Komponente glazialen Wassers darstellt. Dies kann z. B. durch diffusiven Austausch des Wassers im NA4-Horizont mit Porenwasser in den hangenden und liegenden (geringdurchlässigen) Schichten erfolgen, für die eine glaziale Herkunft erwartet wird.

Die gemessenen gelösten Heliumkonzentrationen übersteigen die aufgrund des Lösungsgleichgewichts erwarteten. Dieser „Heliumexcess“ ist auf eine radiogene Bildung aufgrund des Zerfalls von Uran- und Thoriummineralien in der Formation zurückzuführen, wie sich aufgrund des  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnisses schließen lässt. Der Heliumexcess ergibt sich zu  $1,232 \cdot 10^{-7} \text{Nml}^4\text{He} \cdot \text{g}^{-1}$  für das Wasser aus Messstelle NA4 und zu  $1,023 \cdot 10^{-8} \text{Nml}^4\text{He} \cdot \text{g}^{-1}$  für das Wasser aus Messstelle NA5. Die im Wasser

akkumulierte Heliummenge ergibt sich aus dem Produkt des Grundwasseralters mit der Akkumulationsrate  $A_{is}$ . Letztere lässt sich berechnen nach /AND 93/:

$$A_{is} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1,19 \cdot 10^{-13} [U] + 2,88 \cdot 10^{-14} [Th] \right) \frac{1-n}{n} \quad (3)$$

Dabei sind  $\rho_s = 2.7 \text{ g cm}^{-3}$  und  $\rho_w = 1 \text{ g cm}^{-3}$  die Dichten des Gesteins und des Wassers, [U] und [Th] die Uran- bzw. Thoriumkonzentrationen im Gestein in ppm und  $n = 0,4$  die Porosität des Gesteins. Bei Annahme eines glazialen Alter des Wassers von mindestens 10.000 Jahren errechnet sich eine maximale Akkumulationsrate von Helium im Wasser des Horizonts NA4 von  $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^4 \text{ He g}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Bei Vernachlässigung der Thoriumkonzentration ergibt sich daraus wiederum eine maximale mittlere Urankonzentration entlang des Fließwegs des Wassers von etwa 25 ppm.

#### 2.8.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen am Standort Ruprechtov ergeben noch kein einstimmiges Bild. Unterschiede in den Gehalten an stabilen Isotopen können durch einen Höheneffekt oder einen Temperatureffekt erklärt werden. Der in den Grundwässern aus den Messstellen NA4 und NA5 gemessene Unterschied im  $^{18}\text{O}$ -Gehalt beläuft sich auf etwa 0,8 - 0,9 ‰, wobei NA4 den negativeren Wert aufweist. Dies weist auf eine höhere Lage des Einzugs-/Infiltrationsgebietes für den in NA4 erschlossenen, tieferen Aquifer, oder auf eine niedrigere Bildungstemperatur hin. Auf der Basis entsprechender Literaturwerte lässt sich ein Höhenunterschied der Infiltrationsgebiete für den oberen (NA5) und unteren (NA4) Aquifer von ca. 250 m, bzw. ein Temperaturunterschied von 1,5°C ableiten. Mögliche starke Differenzen in den lokalen, höhenbezogenen Isotopengradienten müssen aber noch ermittelt und ggf. korrigierend eingefügt werden.

Aufgrund der Edelgas-Daten erscheint eine unterschiedliche Bildungstemperatur wahrscheinlicher geeignet, die Messwerte zu erklären, als eine unterschiedliche Bildungshöhe. Sie weisen allerdings auf eine größere Differenz in den Infiltrationstemperaturen von ca. 3,5°C hin. Demnach könnte das Wasser aus NA4 zumindest eine Komponente glazialen Wassers enthalten. Dafür sprechen auch die

geringen C-14-Gehalte, wobei diese Werte aufgrund von Abbauprozessen organischen Materials und Gasexhalationen ein zu hohes Grundwasseralter widerspiegeln können.

Für eine weiterführende Interpretation sind allerdings zusätzliche Daten erforderlich, insbesondere auch zur Isotopenzusammensetzung heutiger Niederschlagswässer in der Region. Weiterhin sollen Isotopenmessungen an Wässern des Aquifers sehr viel näher im Bereich der vermuteten Quelle weiteren Aufschluss über das hydrologische Modell bringen. Diese Untersuchungen sowie eine Analyse der Paläogeographie können zur Aufklärung der offenen Fragen beitragen.

## 2.9 Integration und Interpretation aller Ergebnisse

### 2.9.1 Einleitung

Der Standort Ruprechtov befindet sich im Nordwest-Teil der Tschechischen Republik, etwa 8 km nördlich Karlovy Vary, geologisch in einem tertiären Becken innerhalb eines Grabensystems (Ohre-Graben), das sich im Vorland des Erzgebirges entwickelt hat. Der basale Granit ist an seiner Oberfläche bis zu mehreren 10er m Mächtigkeit kaolinisiert und wird von ca. 35 m mächtigen tertiären Sedimenten überlagert: zuunterst finden sich stellenweise die basalen Sedimente (Kaolinsande und Tone) der Stare-Sedlo-Formation; darüber folgt die „Vulkanodedritische Formation“ mit meist vertonten Pyroklatika und Kohle- bzw. Kohleton-Horizonten. Alle tonmineralogisch untersuchten Proben des Bohrkerns NA4 enthalten unregelmäßige Illit-Smektit-Wechselagerungen, Kaolinit dominiert in Zonen autochthoner Anreicherung (Abfuhr von Mg-, Ca-, Fe- und Na-Ionen durch Grundwasser) bzw. im Übergangsbereich zum kaolinisierten Granit (+/- allochthon). Das verbreitete Auftreten von Siderit und Pyrit weist auf grundsätzlich reduzierende Verhältnisse in den Sedimenten hin.

Aus den geophysikalischen Logs und den hydrogeologischen Untersuchungen geht hervor, dass sich ein Aquifer in etwa 35 m Teufe mit einer Mächtigkeit von ca. 2 m und einer hydraulischen Leitfähigkeit von ca.  $10^{-6}$  m/s befindet. Ein zweiter, geringer leitender Aquifer mit einer hydraulischen Leitfähigkeit von etwa  $10^{-7}$  m/s befindet in ca. 20 m Teufe. Beide Aquifere sind durch geringdurchlässige Tonschichten mit einer hydraulischen Leitfähigkeit in der Größenordnung von  $10^{-11}$  m/s voneinander getrennt. Aufgrund existierender hydrogeologischer Informationen zum Standort ist die zu erwartende Haupt-Grundwasserfließrichtung von Südwest nach Nordost. Die Infiltration wird im Bereich des austretenden Granits südlich der bisherigen Bohrungen erwartet. Die Isotopenmessungen zeigen, dass die Wässer auf jeden Fall älter als 50 Jahre sind. Aufgrund der bisher bekannten hydrogeologischen Situation am Standort werden Grundwasseralter von einigen hundert bis wenigen tausend Jahren erwartet. Die geringe Anzahl an Messpunkten gestattet bisher noch keine genauere Aussage zum Grundwasseralter. Die geringen  $^{14}\text{C}$ -Gehalte sind wahrscheinlich auf Abbaureaktionen organischen Materials und  $\text{CO}_2$ -Exhalationen zurückzuführen. Es ist möglich, dass im tiefer liegenden Aquifer glaziale Wasser-Komponenten enthalten sind. Zur Absicherung sind Messungen an weiteren Brunnen notwendig.

Die Geochemie der Wässer ist bestimmt durch eine hohe Pufferkapazität der Sedimente. Experimente mit destilliertem Wasser zeigen, dass sich die Zusammensetzung der Wässer den natürlichen Bedingungen annähert. Die Konzentration der wichtigsten Kationen Ca und Mg wird durch Kationenaustausch an Tonmineralen bestimmt. Aus Stabilitätsdiagrammen geht hervor, dass das Grundwasser-System im Gleichgewicht mit Kaolinit steht. Wichtigstes Anion stellt das Bikarbonat dar. Die relativ hohen Konzentrationen sind wahrscheinlich durch Zersetzung der am Standort vorliegenden organischen Materie bedingt. Die Messungen an natürlichen Isotopen geben hier aber noch kein abgesichertes Bild. Das System ist stark reduzierend. Dies geht sowohl aus dem Vorhandensein von Siderit und Pyrit als auch relativ hohen Gehalten an  $S^{2-}$ -Ionen im Grundwasser hervor.

Ein wesentlicher Aspekt dieses Vorhabens war die detaillierte Charakterisierung der mobilen und immobilen Uranphasen, wobei das Hauptinteresse auf dem 35 m Horizont in der unmittelbaren Umgebung des Haupt-Aquifers lag. Eine genaue Charakterisierung der Uranphasen ist notwendig, um die Rückhalteprozesse in einem später anzuwendenden Transportmodell möglichst realitätsnah beschreiben zu können.

Aufgrund der relativ geringen Konzentrationen von Uran in den meisten Proben gestaltet sich der mineralogische Nachweis von Uranfestphasen mittels Röntgendiffraktometrie schwierig. Einzelne im Bohrkern NA4 nachgewiesene Peaks deuten auf das Vorliegen von Uraninit in Sedimentproben aus einer Teufe von 33 bis 36,5 m hin. Aufgrund der zu erwartenden geringen Signalstärke und Überschneidungen mit Pyrit-Peaks sind diese Aussagen allerdings unsicher. Dagegen konnten im Bohrkern NA5 in einzelnen Proben mit sehr hohen Urankonzentrationen die Uran(IV)-Minerale Ningyoit und Uraninit mittels REM/Mikrosonde nachgewiesen werden. Ebenso zeigen Autoradiografie-Messungen, dass zumindest in einzelnen Proben Uran lokal an kleinen Sedimentkörnern stark angereichert ist. Dies ist ebenfalls ein Hinweis auf das Vorliegen von Uran-Mineralphasen.

Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion zeigen, dass der überwiegende Teil des Urans in Form vierwertiger Uranminerale vorliegt, bzw. an organisches Material gebunden ist. Eine Unterscheidung zwischen beiden Phasen wird erst in Kürze nach Modifikation des Verfahrens möglich sein. Da in der Umgebung des Aquifers zum Teil sehr hohe Gehalte an organischem Kohlenstoff gemessen wurden, ist dessen Einfluss auf jeden Fall zu berücksichtigen.

Eine Anreicherung von Uran in kohlehaltigen Sedimenten findet häufig unter reduzierenden Milieubedingungen statt. Kohlenwasserstoffverbindungen können das in sechswertiger Form ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) transportierte Uran zu vierwertigem Uran reduzieren, welches dann in sekundären Uranmineralen (z. B. Uraninit, Coffinit, Ningyoit) fixiert und ausgefällt wird. Neben der direkten enzymatischen Reduktion, die auf Bakterien zurückgeführt werden kann, sind auch spätere Reduktionsvorgänge des Uranyl-Ions im Laufe der Diagenese bekannt /DAH 93/. Erhöhte Urangehalte innerhalb organischen, kohligen Materials werden auch durch Sorption des Urans aus uranhaltigen Wässern erzielt. Die organische Substanz weist einen geringen Inkohlungsgrad auf und besteht zum überwiegenden Teil aus Humusstoffen (Humine und Huminsäuren), deren starkes Adsorptionsvermögen für eine Urananreicherung verantwortlich sein kann.

In ausgewählten Proben wurde die Korrelation von Uran mit dem gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) untersucht. In einzelnen Bereichen korreliert die Urankonzentration mit dem TOC-Gehalt, einige Sedimente mit hohen Urankonzentrationen weisen allerdings nur sehr geringe TOC-Konzentrationen auf. Bisher ist eine Unterscheidung des dominierenden Immobilisierungsprozesses - Sorption an Huminstoffen oder Reduktion und Ausfällung von Uran(IV)-Phasen - nicht möglich; ein Einfluss der organischen Materie ist allerdings sehr wahrscheinlich.

Das Auftreten von Siderit und Pyrit neben organischem Kohlenstoff in der Umgebung des Aquifers in 35 m Teufe zeigt, dass dort stark reduzierende Bedingungen vorliegen. Die in den Anreicherungshorizonten erfassten Grundwässer weisen insgesamt sehr geringe Uran-Konzentrationen von  $<10^{-9}$  mol/l auf. Derart geringe Uran-Konzentration im Grundwasser wurden auch an anderen Standorten, an denen reduzierende Bedingungen herrschen und Uraninit vorhanden ist, gemessen. Erste Laboruntersuchungen an ungestörtem Grundwasser zeigen das Vorhandensein von Kolloiden. Die gemessenen Kolloidkonzentrationen sind trotz der Lignitschichten in unmittelbarer Umgebung mit 10-90 ppb aber verhältnismäßig gering. Wenn diese geringen Kolloidkonzentrationen an weiteren Proben nachgewiesen werden, ist, wenn überhaupt, nur ein geringer Einfluss von Kolloiden auf die Uran-Mobilität zu erwarten.

Aus den begleitenden geochemischen Modellrechnungen wird deutlich, dass unter den gegebenen geochemischen Bedingungen vierwertiges Uran thermodynamisch stabil ist. Die gemessenen, gelösten Uran-Konzentrationen können über ein thermodynamisches Gleichgewicht mit Uraninit - bei hohen Phosphatkonzentrationen auch mit Ningyoit - erklärt werden. Zur Absicherung der geochemischen Modellrechnungen ist



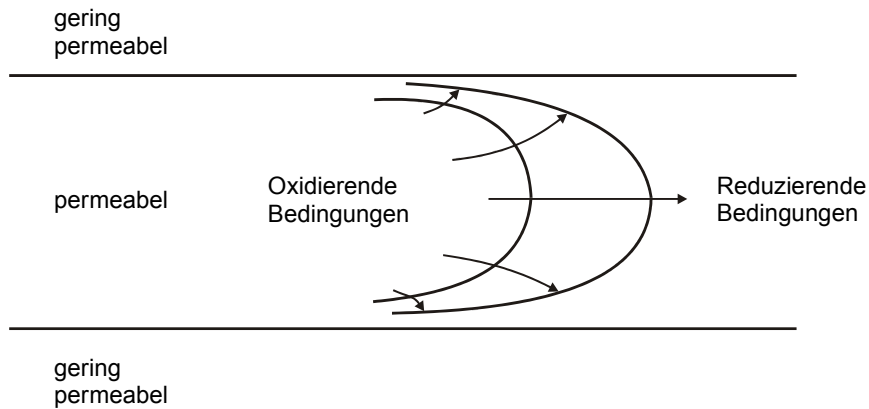
aber eine exaktere Bestimmung des Eh-Werts unter ungestörten Bedingungen notwendig. Dies soll zukünftig mit einer in-situ - Eh-Sonde realisiert werden.

Die Ergebnisse aus Sorptions-/Desorptionsexperimenten, in denen sechswertiges Uran eingesetzt wurde, deuten zusätzlich darauf hin, dass nur ein geringer Anteil des Urans reversibel gebunden (sorbiert) wird.

Ein weiteres Indiz für die geringe chemische Mobilität ist das hohe  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitäts-Verhältnis im Grundwasser mit Werten zwischen 2,5 und 4, und einem gleichzeitig niedrigen Wert  $<1$  im Sediment. Diese Werte sind typisch für die Bildung von Uranlagerstätten nach dem Roll-Front-Modell. Deshalb wird dieses Modell im folgenden Abschnitt ausführlich diskutiert.

### **2.9.2 Das „Roll-Front Modell“**

Uranlagerstätten haben sich unter zum Teil sehr unterschiedlichen Bedingungen gebildet. Eine wichtige Art der Lagerstättenbildung in Sedimentgesteinen ist die so genannte „Roll-Front-Anreicherung“ (OSM 83/, LAN 97/). Ein solcher Urankörper bildet sich, wenn Uran unter geeigneten Bedingungen (z. B. hoher Eh-Wert, hohe  $\text{HCO}_3^-$ -Konzentration) aus Graniten oder Rhyolithen gelöst wird und entlang eines Aquifers in tiefer liegende Schichten, in denen reduzierende Substanzen, wie organische Materie oder sulfidische Minerale vorhanden sind, transportiert wird. Gelangt das Wasser in diese reduzierenden Bereiche, kommt es zur Reduktion des sechswertigen Urans und zu dessen Immobilisierung. Auf diese Weise bildet sich eine Urananreicherung im Sediment aus. Nachfließendes, „oxidierendes“ Wasser führt aber auch zur Oxidation der reduzierenden Substanzen in den Sedimenten. Dies hat zur Folge, dass sich eine Redoxgrenze (Front) ausbildet, die sich durch stetig nachfließendes oxidierendes Wasser in Fließrichtung bewegt (Abb. 2.9.1). In der Umgebung dieser Grenze befindet sich die Urananreicherung, die abstrom durch Uranreduktion neu gebildet und aufstrom durch Oxidation wieder abgebaut wird. Das heißt, die Urananreicherung „rollt“ in Fließrichtung.



**Abb. 2.9.1:** Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Roll Front

Die Ausdehnung solcher Roll-Fronts kann in der Länge bis zu einigen Kilometer betragen /BAR 86/ und hängt von

- der Uranmenge, die mit dem Grundwasser transportiert wird,
- der Effizienz der Uran-Immobilisierung und
- der Zeitspanne, seit der die Front existiert

ab. Typische Bewegungsgeschwindigkeiten solcher Roll-Fronts betragen Zentimeter bis Meter pro 100.000 Jahre. Die Geschwindigkeiten wiederum werden bestimmt durch

- die Fließrate des Grundwassers,
- Eh-Wert und Karbonat-Konzentration des zufließenden Grundwassers sowie
- die Redoxkapazität des Sediments.

Roll-Front-Lagerstätten liegen beispielsweise in den U.S.A. (intrakratone Sedimentbecken Wyomings, wie z. B. Powder River, Shirley, Gas Hills sowie texanische Golfküste /DAH 93/). Beide sind tertiären Alters. Die Mächtigkeiten dieser Lagerstätten können bis zu 15 m erreichen, sich in ihren Hangend- und Liegendbändern aber bis auf wenige Zentimeter reduzieren /BAR 86/. Hauptminerale in diesen Lagerstätten sind Uraninit und Coffinit. Häufig weisen As, P und Cu positive Korrelation mit Uran auf. Ebenso werden typischerweise Mo, Se und V mit Uran in oxidierenden Grundwässern transportiert.

Ein Modell zur Beschreibung der Auswirkungen einer Roll-Front auf die Urankonzentrationen und die Aktivitätsverhältnisse von Radionukliden der Uranzerfallsreihe

in Sediment und Grundwasser wurde von /OSM 83/ entwickelt. Dieses Modell soll hier ausführlich vorgestellt werden, da es sich bei der Urananreicherung am Standort Ruprechtov möglicherweise um eine Roll-Front-Anreicherung handelt und die radiometrischen Daten entsprechend interpretiert werden können.

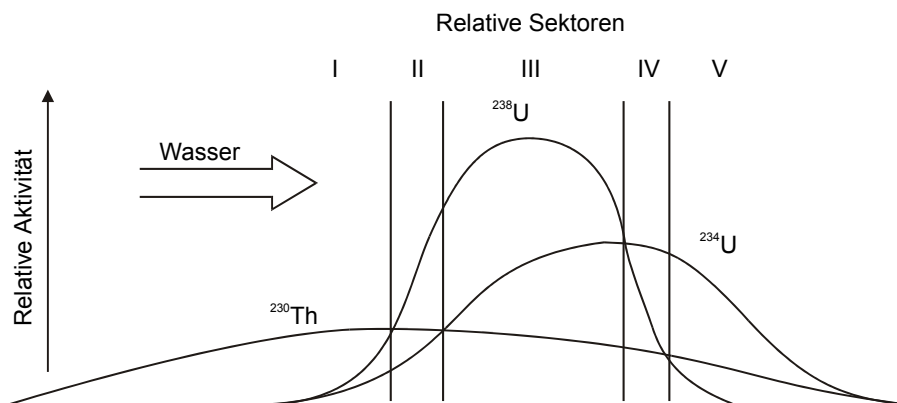
Das Modell geht von einer unterschiedlichen Mobilität der in der Zerfallsreihe nachfolgenden Töchter des  $^{238}\text{U}$  aus. Das vierwertige  $^{230}\text{Th}$  ist in natürlichen Wässern immobil.  $^{234}\text{U}$  ist unter gewissen Bedingungen trotz chemischer Gleichheit mobiler als  $^{238}\text{U}$ . Verantwortlich für eine bevorzugte Auflösung des  $^{234}\text{U}$  sind Prozesse, die durch den radioaktiven Zerfall begründet sind. Der Zerfall von  $^{238}\text{U}$  erfolgt über



wobei die Töchter  $^{234}\text{Th}$  mit 24,1 d und  $^{234}\text{Pa}$  mit 1,18 m sehr kurzlebig sind. Beim  $\alpha$ -Zerfall von  $^{238}\text{U}$  erhält das  $^{234}\text{Th}$  eine Rückstoßenergie von 72 keV. Dadurch können folgende Effekte auftreten:

- Der Rückstoßprozess kann zu lokalen Gitterdefekten, Aufbrechen chemischer Bindungen sowie zur Positionierung des  $^{234}\text{U}$  auf Zwischengitterplätzen führen. Diese Effekte haben dann eine leichtere  $^{234}\text{U}$ -Mobilisierbarkeit zur Folge.
- Übergang des  $^{234}\text{Th}$  von fester in die flüssige Phase durch direkten  $\alpha$ -Rückstoß. Das  $^{234}\text{Th}$  wandelt sich innerhalb kurzer Zeit über  $^{234}\text{Pa}$  in  $^{234}\text{U}$  um. Die Reichweiten der rückgestoßenen Atome in Festkörpern liegen bei 0,01 - 0,1  $\mu\text{m}$ . Der Prozess des direkten Übergangs in die flüssige Phase ist immer dann von Bedeutung, wenn Uran vorwiegend an Mineraloberflächen gebunden vorliegt /OSM 83/. Da es viele Hinweise gibt, dass die Reduktion von Uran(VI) zu Uran(IV) in natürlichen Systemen vorwiegend an Oberflächen, wie z. B. Pyrit oder Chlorit stattfindet oder zumindest dort forciert wird (z. B. /GRE 92b/), ist eine Anreicherung von Uran(IV) an Mineraloberflächen in vielen Systemen zu beobachten.
- Außerdem wird eine Oxidation von U(IV) zu U(VI) diskutiert (z. B. /ADL 91/. Durch den Rückstoßprozess werden entlang der Trajektorie des rückgestoßenen Atoms auch Radikale erzeugt. Durch Reaktion mit Sauerstoffradikalen können die Tochteratome oxidiert werden. Aus  $^{238}\text{U(IV)}$  kann über  $^{234}\text{Th(IV)}$  und  $^{234}\text{Pa(V)}$  durch zweimaligen  $\beta$ -Zerfall das chemisch mobilere  $^{234}\text{U(VI)}$  entstehen.

Die genannten Prozesse sind schwer zu quantifizieren. Die unterschiedliche Mobilität der drei langlebigen Radionuklide  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  und  $^{230}\text{Th}$  führt aber zu einer Konzentrationsverteilung im Sediment, wie sie in Abb. 2.9.2 dargestellt ist. Der Schwerpunkt der Kurve von  $^{234}\text{U}$  ist aufgrund seiner etwas höheren Mobilität gegenüber derjenigen von  $^{238}\text{U}$  in Grundwasser-Fließrichtung verschoben. Im Hauptbereich der Urananreicherung führt die bevorzugte Mobilisierung von  $^{234}\text{U}$  zu einer Abnahme gegenüber  $^{238}\text{U}$ .  $^{230}\text{Th}$  ist weniger mobil, wird aber auch durch Zerfall von  $^{234}\text{U}$  nachgeliefert. Entsprechend ergibt sich ein flaches lang gestrecktes Profil der  $^{230}\text{Th}$ -Kurve.

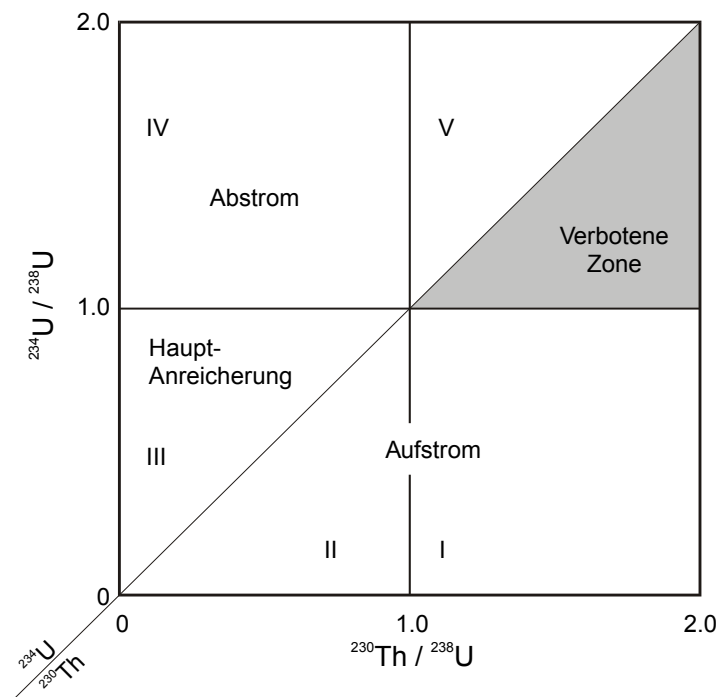


**Abb. 2.9.2:** Relative Aktivitätsverteilung von  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  und  $^{230}\text{Th}$  im Sediment einer Roll-Front-Anreicherung (nach /OSM 83/)

Es ergeben sich fünf verschiedene Bereiche, die in einem Quadrantendiagramm (Abb. 2.9.3) dargestellt werden können. Sektor I stellt den Bereich aufstrom der Uranfront dar. Hier wird akkumuliertes Uran durch oxidierende Wässer wieder gelöst, entsprechend ist die  $^{230}\text{Th}$ -Aktivität gegenüber den Uranisotopen erhöht. In den Bereichen II und III übersteigt die  $^{238}\text{U}$ -Aktivität die der beiden anderen Radionuklide, wobei in Sektor II das  $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ -Verhältnis kleiner 1 ist. Sektor III stellt den größten Bereich der Urananreicherung dar. Daher fallen auch die meisten Messungen von Uranerzlagerstätten genau in diesen Bereich. In Sektor IV übersteigt die  $^{234}\text{U}$ -Aktivität die von  $^{238}\text{U}$ , da Uran aus einer Lösung mit einem  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnis  $> 1$  ausgefällt wird. Die Aktivitätskonzentration des durch Zerfall von  $^{234}\text{U}$  gebildete  $^{230}\text{Th}$  übersteigt schließlich im vorderen Abstrombereich der Front die  $^{238}\text{U}$ -Konzentration.

Die Verhältnisse im Grundwasser stellen sich entsprechend Abb. 2.9.4 bzw. als Konzentrations-Aktivitäts-Diagramm in Abb. 2.9.5 dar. Im Aufstrombereich hat das oxidierende Grundwasser einen Urangehalt, der sich entsprechend der Vorgeschichte

eingestellt hat. Sofern das Wasser nicht mit Uran gesättigt ist erfolgt aufstrom der Uran-Front in Sektor II eine Wiederauflösung des Urans unter oxidierenden Bedingungen, die zu einer Erhöhung der Konzentration im Grundwasser führt. Gleichzeitig nimmt das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnis ab, entsprechend dem in diesem Sektor niedrigen Wert im Sediment. Im Sektor III, wo sich die Redoxverhältnisse signifikant ändern, nimmt die Urankonzentration im Grundwasser entsprechend der geringen Uranlöslichkeit rapide ab. Bei gleichzeitig hoher Urankonzentration im Sediment macht sich der  $\alpha$ -Rückstoß-Effekt hier deutlich bemerkbar, so dass das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis ansteigt. Statistische Auswertungen zeigen auch, dass hohe  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse vor allem bei geringen Urankonzentrationen im Grundwasser gefunden werden, während bei hohen Urankonzentrationen niedrige Aktivitätsverhältnisse überwiegen /GEL 84/.

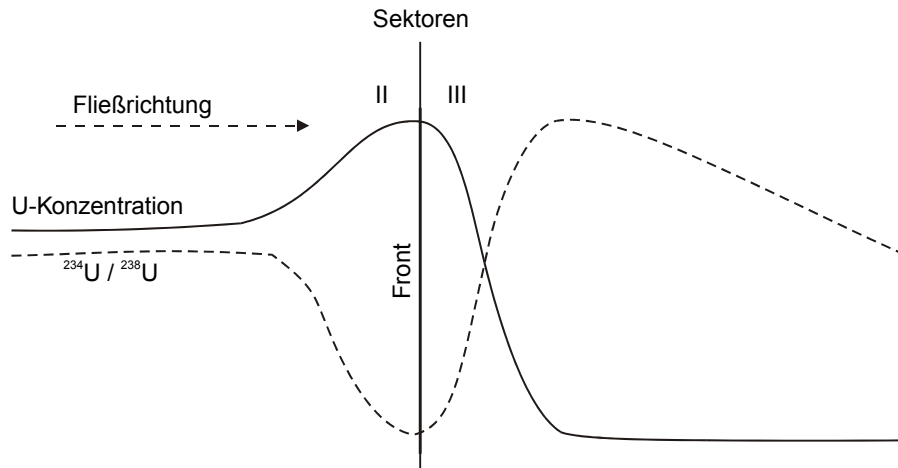


**Abb. 2.9.3:** Charakterisierung der Urananreicherung in einem Roll-Front-System anhand der Radionuklid-Aktivitätsverhältnisse

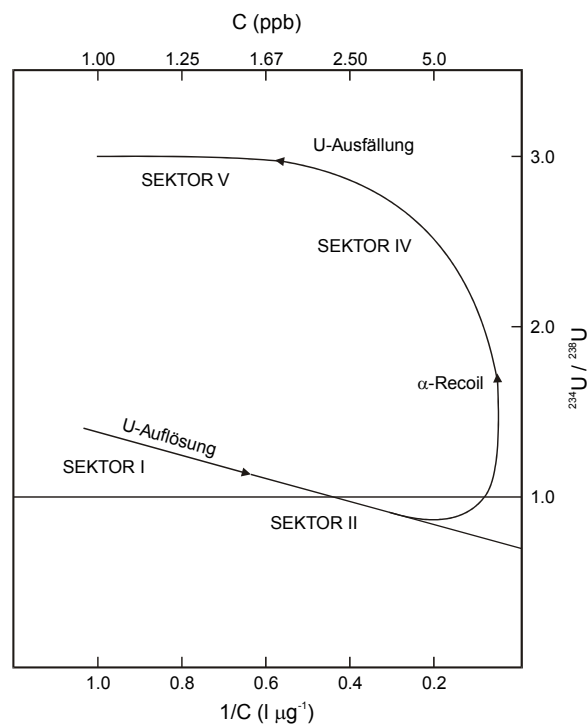
Die Wanderungsgeschwindigkeiten solcher Roll-Fronts liegen, wie oben erwähnt zwischen 0.01 m und 10 m pro 100.000 a. Noch niedrigere Geschwindigkeiten würden nicht zur Ausbildung von messbaren Ungleichgewichtszuständen führen.

Zwischen schnell und langsam wandernden Systemen treten signifikante qualitative Unterschiede in Sedimenten und Grundwasser auf, wie in Abb. 2.9.6 und Abb. 2.9.7

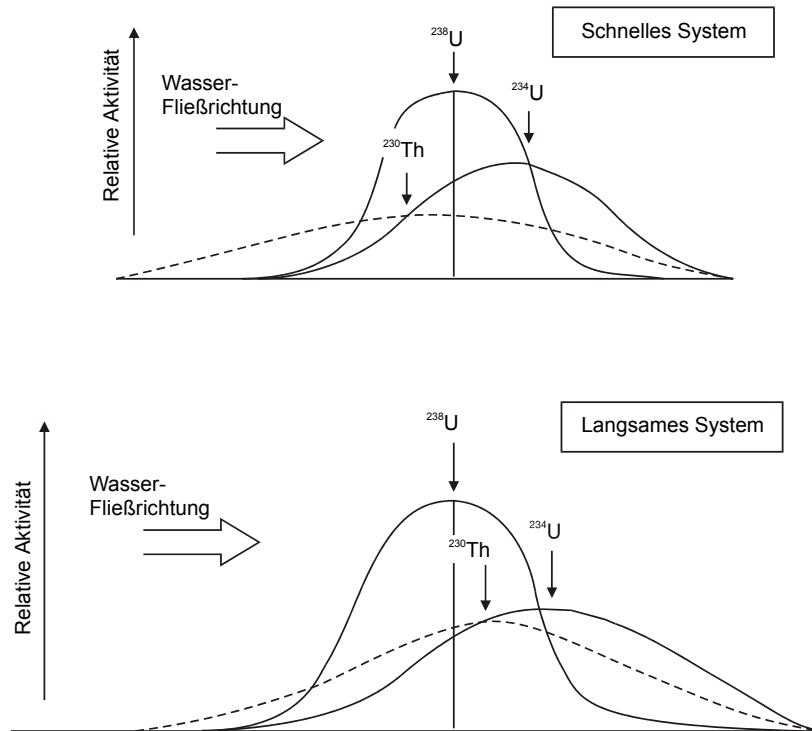
dargestellt. In Sedimenten kommt es bei sehr langsamen Systemen dazu, dass sich das Maximum des  $^{230}\text{Th}$ -Peaks in Fließrichtung verschiebt und sogar abstrom des  $^{238}\text{U}$ -Maximums liegt. In den Grundwässern ist die Änderung der  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse aufgrund der längeren Einwirkung von  $\alpha$ -Rückstoßeffekten stärker ausgeprägt.



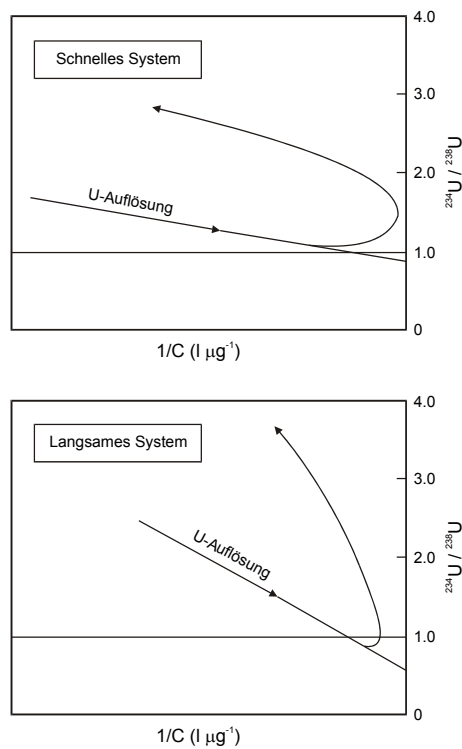
**Abb. 2.9.4:** Konzentrationsverteilung und  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis im Grundwasser entlang der Roll-Front-Anreicherung



**Abb. 2.9.5:** Entwicklung der Uran-Konzentration und der Isotopenverhältnisse im Grundwasser in einem Roll-Front-System als Konzentrations-Aktivitäts-Diagramm



**Abb. 2.9.6:** Radionuklidverteilung in Sedimenten schneller und langsamer Systeme



**Abb. 2.9.7:** Aktivitätsverhältnisse von gelöstem Uran in schnellen und langsamen Systemen

Die Randbedingungen für eine Roll-Front sind am Standort Ruprechtov grundsätzlich gegeben. Es existiert ein geringmächtiger Aquifer, der von gering permeablen Schichten abgegrenzt wird. Entsprechend dem bisherigen Arbeitsmodell wird angenommen, dass oxidierende Grundwässer Uran aus dem Granit mobilisiert haben bzw. noch mobilisieren und entlang des Aquifers in tiefer liegende Bereiche transportieren. In tiefer liegenden Bereichen in der Umgebung des Lignit-Sand-Horizontes sind mit Siderit, Pyrit und Ligniten reduzierende Substanzen vorhanden, die auch im Grundwasser ein reduzierendes Milieu erzeugen. Die niedrigen Konzentrationen und Eh-Werte im Grundwasser sowie die Ergebnisse der geochemischen Modellrechnungen deuten darauf hin, dass Uran in dem untersuchten Bereich vierwertig vorliegt und immobil ist.

Auch die Ergebnisse der radiometrischen Messungen an Bohrkernproben des Standortes Ruprechtov lassen sich sehr gut mit dem Roll-Front-Modell erklären. Der überwiegende Teil der Sedimentproben aus dem 35 m-Horizont fällt in den Sektor III, d. h. den Hauptbereich der Roll-Front (Abb. 2.9.2). Dies geht einher mit relativ niedrigen Urankonzentrationen im Grund- und Porenwasser, die ein  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis von 2,5 - 3,5 aufweisen. Auch dies entspricht den erwarteten Werten im Bereich III der Front (Abb. 2.9.4 und Abb. 2.9.5).

Zur Überprüfung des Modells muss ein wesentliches Ziel des Nachfolgeprojekts deshalb eine weiträumigere Untersuchung des Uran-tragenden Horizontes sein. Entsprechend dem Roll-Front-Modell sind im Aufstrombereich oxidierende Bedingungen, höhere Urankonzentrationen im Grundwasser mit niedrigeren  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnissen sowie  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse  $>1$  zu erwarten. Im Abstrombereich sollten dagegen ebenfalls reduzierende Bedingungen, abnehmende Urankonzentrationen und erhöhte  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse in Sediment und Grundwasser auftreten. Aufgrund der starken Heterogenität der Sedimente sind die Übergänge voraussichtlich nicht scharf sondern fließend.

### **2.9.3 Konzeptuelles Modell für den Urantransport**

Auf Basis aller bisherigen Ergebnisse wurde ein Arbeitsmodell erstellt, das die am Standort Ruprechtov stattgefundenen Prozesse beschreibt.

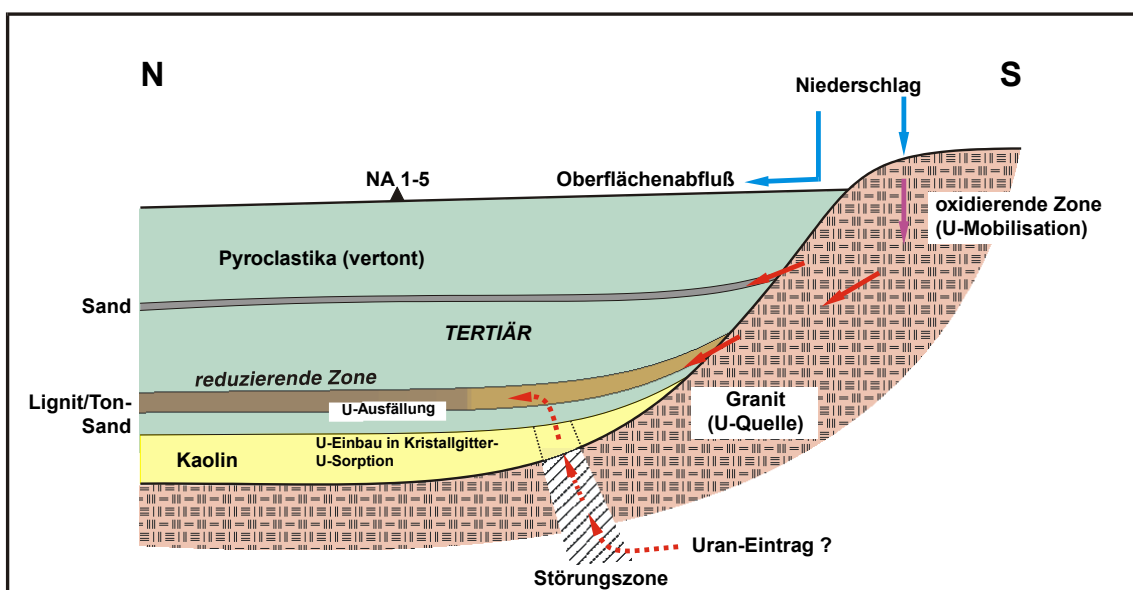


Dazu ist zuerst das Alter der in Abb. 2.9.8 dargestellten geologischen Einheiten zu betrachten. Der unterlagernde Granit ist karbonischen Alters, also zwischen 280 und 345 Ma alt. Die Uranmineralisation im Granit hat ab einem Zeitpunkt vor ca. 250 Ma über mehrere Stadien bis heute stattgefunden. Die oberflächliche Verwitterung des Granits (Kaolinisierung) erfolgte möglicherweise in unterschiedlichen Zeiträumen, zum einen noch während des Karbon, zum anderen im Tertiär, zwischen ca. 20 und 65 Ma b.p. Es ist derzeit noch unklar, ob dabei ein Teil des Urans im Kaolin angereichert wurde. Eher wahrscheinlich ist, dass das Uran unter diesen Bedingungen auch mobil war und abtransportiert wurde. Die Grabenbildung mit Auffüllen des Tertiären Beckens datiert aus dem Jungtertiär (ca. 5- 25 Ma). Demnach kann eine Uranmigration in das Becken und eine Immobilisierung frühestens nach oder während der Bildung des tertiären Beckens (vor 5 - 10 Ma?) begonnen haben. Möglicherweise hat dies schon unter damaligen günstigen klimatischen Bedingungen stattgefunden. Eine erhöhte Wärmeproduktion, wie auch geeignete geochemische Bedingungen können zu einer signifikanten Mobilisierung des Urans und Ablagerung zu dieser Zeit geführt haben. Prozesse, die in diesen Zeiträumen stattgefunden haben, sind aber radiometrisch nicht mehr nachweisbar, da sich ein säkulares Gleichgewicht in der Uranzerfallsreihe nach ca. 10 Halbwertszeiten des Tochternuklids eingestellt hat; für die Tochter  $^{230}\text{Th}$  also nach etwa 700.000 a.

Da aber Ungleichgewichtszustände in der Uranzerfallsreihe nachgewiesen werden, muss ein Urantransport auch innerhalb der letzten 700.000 a stattgefunden haben. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Transport auch heute noch stattfindet.

Das Arbeitsmodell ist in Abb. 2.9.8 dargestellt. Die Modellvorstellung besteht darin, dass Uran unter oxidierenden Bedingungen aus dem Granit herausgelöst wurde, bzw. noch wird, ein direkter Übergang vom Granit in die Aquifere existiert und ein Transport entlang der Aquifere stattgefunden hat, bzw. noch stattfindet. Unter diesen Bedingungen ist zu erwarten, dass Carbonato-Komplexe eine wichtige Rolle beim U-Transport spielen. Neben dem Eintrag aus dem oberflächennahen Granit ist zusätzlich auch ein Eintrag über eine Störungszone, die sich etwa 200 m südlich („aufstrom“) der bisherigen Bohrungen befindet, denkbar. Voraussetzung dafür ist, dass diese Störungszone im Granit eine hydraulische Verbindung zum Tertiär und damit zum Aquifer aufweist. Hierzu sollen Messungen an natürlichen Isotopen auch im Bereich zwischen vermuteter Quelle und Störungszone Aufschluss bringen. Die bisherigen Ergebnisse ergeben noch kein eindeutiges Bild.

Speziell in der Umgebung von Lignit-Bändern und -Linsen sowie Pyrit- und Siderithaltigen Sedimenten, die sich im Aquiferbereich, also der Lignit/Ton-Sandschicht befinden, führen dann reduzierende Bedingungen zur Reduktion des sechswertigen Urans zu Uran(IV), gefolgt von Ausfällung in geringlöslichen Mineralphasen und/oder Sorption. Zusätzlich ist auch eine Sorption des sechswertigen Urans z. B. an immobilen Huminstoffen als Rückhalte­mechanismus denkbar. Wie bereits an anderer Stelle diskutiert, sprechen viele Indizien dafür, dass der überwiegende Teil des Urans in einer Form gebunden ist, die nicht leicht verfügbar ist. Zudem konnten in Proben mit hohen Urankonzentrationen die Minerale des vierwertigen Urans, Ningyoit und Uraninit nachgewiesen werden.



**Abb. 2.9.8:** Auf Basis der bisherigen Ergebnisse entwickeltes Szenario der Uran-Mobilisierung und -Rückhaltung am Standort Ruprechtov: schematische Darstellung

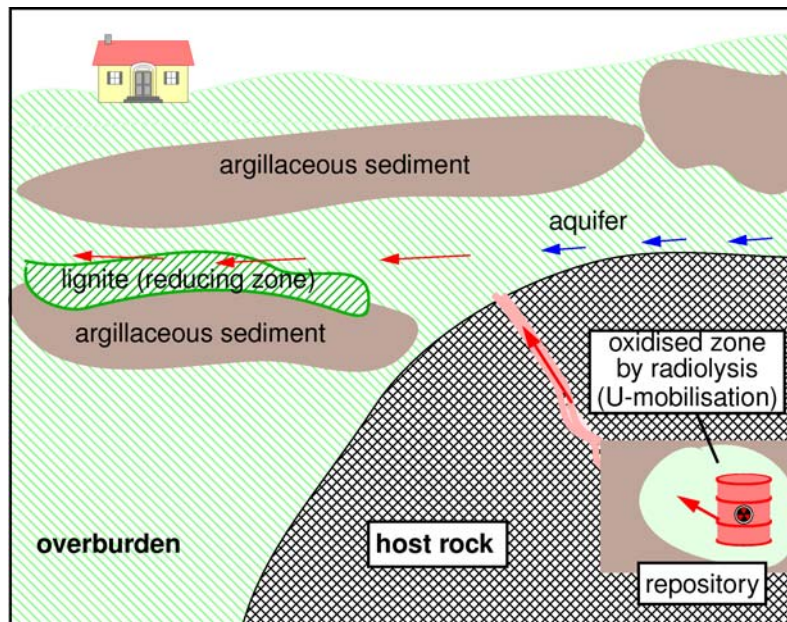
Wenn der Eintrag von oxidierenden Wässern weiterhin stattfindet, wird sich eine oxidierende Front und damit auch das Uran innerhalb des Aquifers langsam in Fließrichtung fortbewegen. Dafür sprechen insbesondere die Ergebnisse der radiometrischen Messungen.

Die Rolle des Kaolins und die Prozesse, die zur Uran-Anreicherung im Kaolin geführt haben, sind z. Z. noch unklar. Vorstellbar ist, dass eine Sekundärmineralisation auf den oberen Kaolinschichten unter geeigneten geochemischen Bedingungen stattgefunden hat. In diesem Zusammenhang besteht auch insbesondere die Frage, ob und in

welcher Größenordnung ein Radionuklideintrag aus dem Kaolin in den tertiären Aquifer erfolgen kann. Die integralen radiometrischen Messungen an den Sedimentproben zeigen keinen deutlichen Unterschied zu den Proben aus dem Sand-Lignit-Horizont. Allerdings sollen hier weiterführende radiometrische Messungen in Kombination mit sequentieller Extraktion prüfen, ob ein Teil des Urans in einer leicht mobilisierbaren Fraktion vorliegt, aus der eine Uran-Mobilisierung erfolgt ist.

Das FuE-Vorhaben soll insgesamt als natürliches Analogon für die Migration von Radionukliden im Deckgebirge einer Endlagerformation dienen. Ein typisches Szenario mit Mobilisierung, Freisetzung und Migration der Radionuklide ist schematisch in Abb. 2.9.9 dargestellt. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf konkrete PA-Belange ist zum jetzigen Zeitpunkt festzustellen, dass die Standortverhältnisse Ruprechtov den im Fernfeld eines Endlagers zu erwartenden Bedingungen in folgenden Punkten sehr ähnlich sind:

- Die Gesamtheit der geologisch-geochemischen Prozesse, die zur Anreicherung des Urans geführt haben, fallen in einen Zeitrahmen von bis zu  $10^6$  Jahren. Dies entspricht dem Zeitrahmen, der häufig in Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt wird, wobei der Zeitraum von  $10^4$  -  $10^6$  Jahren generell mit großen Unsicherheiten behaftet ist.
- Das Tertiär besteht aus tonigen und sandigen Sedimenten mit eingeschlossenen Lignit-Bändern bzw. -Linsen. Ähnliche geologische Strukturen werden häufig in Mitteleuropa oberflächennah angetroffen, d. h. auch im Deckgebirge von Endlagerformationen.
- Die geochemischen Bedingungen sind durch niedrige Eh-Werte und neutrale pH-Werte charakterisiert. Bedingungen, wie sie häufig im Fernbereich eines Endlagers vorherrschen.
- Die abgeschätzten Darcy-Geschwindigkeiten liegen im Bereich von wenigen Metern pro Jahr. Derartige Grundwasserfließgeschwindigkeiten werden im allgemeinen im Fernfeld eines Endlagers vorgefunden.
- Die beobachteten Uran-Konzentrationen liegen im Bereich von  $10^{-9}$  mol/l. Dies entspricht typischen Werten, wie sie in Langzeitsicherheitsanalysen im Fernfeld von Endlagern berechnet werden.



**Abb. 2.9.9:** Typisches Szenario für die Radionuklidfreisetzung aus einem Endlager und den Transport durch das Deckgebirge

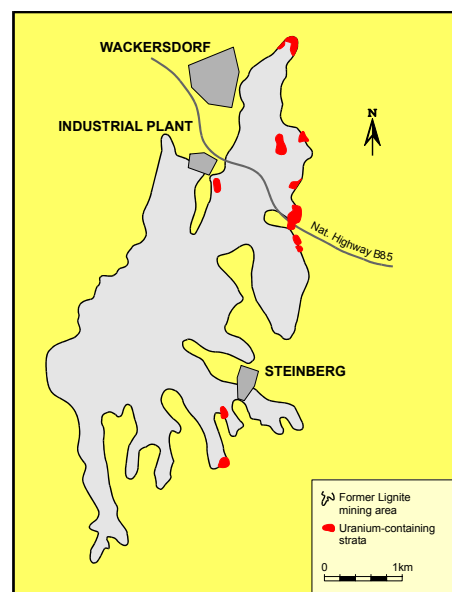


### 3 Standort Heselbach

#### 3.1 Standortcharakterisierung

##### 3.1.1 Einleitung

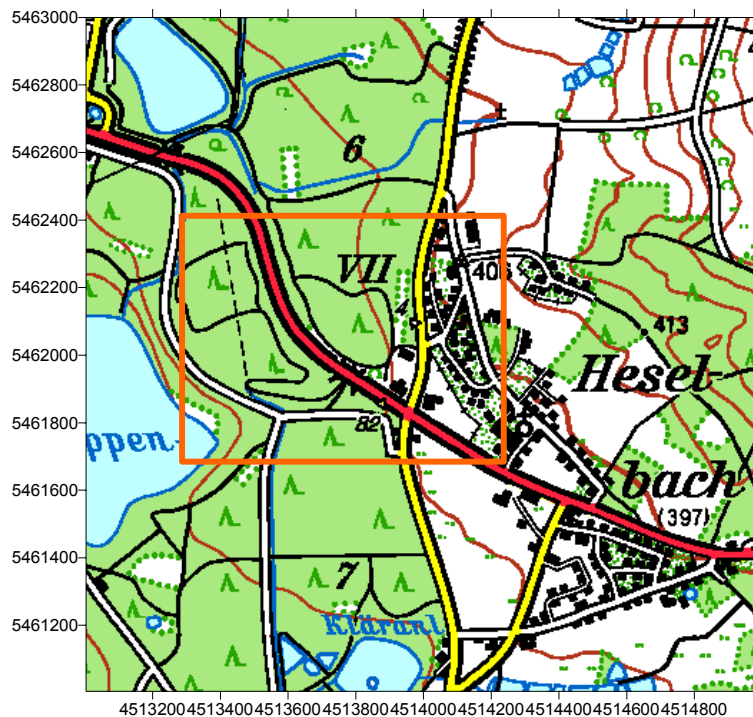
Die Lokalität Heselbach liegt am Nordostrand des Wackersdorfer Braunkohlentertiärs, in einer kleinen, nach Osten gerichteten Seitenbucht des früheren Braunkohlenabbaufeldes Wackersdorf Nord (Abb. 3.1.1).



**Abb. 3.1.1:** Übersichtskarte des Wackersdorfer Braunkohlenreviers mit den Lokationen festgestellter Urananreicherungen; das Projektgebiet befindet sich am Ost-Rand des Beckens, unmittelbar nördlich der Bundesstraße B85

Das engere Projektgebiet ist i. w. Teil der forstwirtschaftlich rekultivierten ehemaligen Tagebaufläche, westlich der Ortschaft Heselbach und unmittelbar an der Bundesstraße B 85 gelegen (Abb. 3.1.2). Die Lokalität Heselbach ist eines der in der Literatur als möglicherweise abbauwürdig dargestellten Uranvorkommen am Ostrand des Wackersdorfer Braunkohlentertiärs. Auf Grund dieser Beschreibung und insbesondere der Lithologie mit Sanden, Tonen und Braunkohle wurde dieses Vorkommen, das aufgrund des jahrzehntelangen Braunkohle-Tagebaues nur noch in Relikten erhalten

ist, ausgewählt, um dessen Eignung für weitere Natürliche Analoga - Studien zu überprüfen.



**Abb. 3.1.2:** Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1 : 25.000 (TK 6739 - NW-Blattrand) mit Lage des Projektgebietes

### 3.1.2 Bohrkampagnen

Nachdem die ersten Sondierbohrungen unter Hinzuziehung des für den Braunkohlenabbau in den 50er und 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts zuständigen Chefgeologen keine klaren Ergebnisse geliefert hatten /BRA 98/, ist die genaue Lage der besonders interessierenden Urananreicherung in unmittelbarer Umgebung der Ortschaft Heselbach mit Hilfe alter Ausgaben der Topographischen Karte in Kombination mit nur fragmentarisch vorhandenen und verwertbaren Bohrpunktkarten aus der Zeit der Uranexploration rekonstruiert worden. Im Ergebnis ist eine Profillinie parallel zur Bundesstraße B85 ausgewiesen worden, entlang derer die vier Aufschlussbohrungen B1 bis B4 positioniert und im Dezember 1999 als Kernbohrungen im Trockenbohrverfahren abgeteuft worden sind (Tab. 3.1.1). Bis ca. 0,30 m über Filteroberkante erfolgte jeweils eine Kiesschüttung, darüber wurde eine Bentonitabdichtung eingebracht (Abb. 3.1.6 bis Abb. 3.1.9).



**Abb. 3.1.3:** Blick von der B85 Richtung NNE auf die Bohrung B2; am linken Bildrand ist die Position der Bohrung B3 zu erkennen; B1 und B4 befinden sich außerhalb des rechten Bildrandes

**Tab. 3.1.1:** Ausbau der Aufschlussbohrungen B1 - B4 am Standort Heselbach

Bohrung	Sumpfrohr [m u. ROK]	Filterrohr [m u. ROK]	Vollrohr [m u. ROK]	ROK [m ü. GOK]
B4	4 - 3	3 - 1	1 - 0	+ 0,54
B1	6 - 5	5 - 2	2 - 0	+ 0,30
B2	8 - 6	6 - 4	4 - 0	+ 0,30
B3	10 - 9	9 - 6	6 - 0	+ 0,17

Ausgehend von der Bohrung B2 ergibt sich die genaue Lage der einzelnen Bohrungen aus folgender Zusammenstellung (s. Abb. 3.1.2):

(NW) **B3** - 14,50 m - **B2** - 18,20 m - **B1** - 19,80 m - **B4** (SE)

**B2:** Schnittpunkt NW-SE-Forststraße / SW-NE-Forststraße (Unterführung B 85)

**B1:** 18,20 m SE B2

**B4:** 38,00 m SE B2

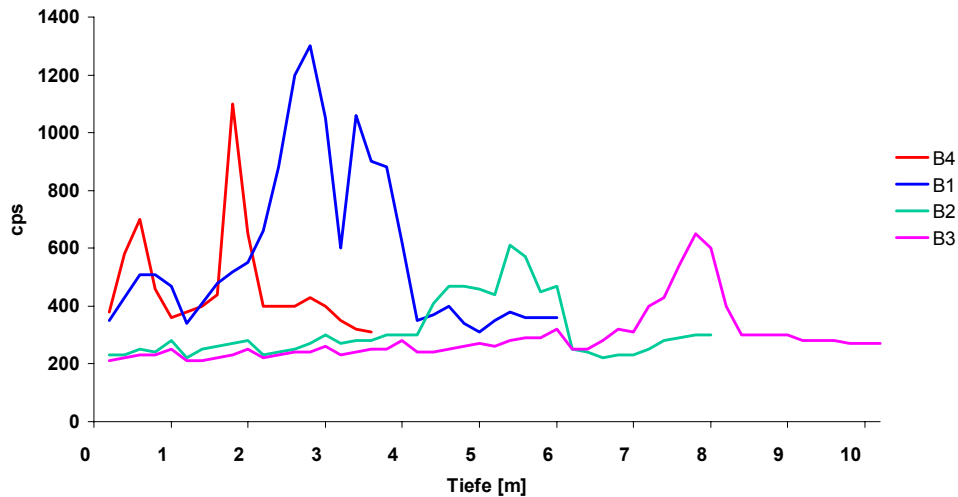
**B3:** 14,50 m NW B2



Direkt vor Ort sind die erbohrten Kerne mittels eines Differential-Spektrometers (EDA-GRS500) abgescannt worden, um die Eignung der jeweiligen Bohrung für die Projektbelange zu überprüfen (Abb. 3.1.5). Bereits diese Übersichtsmessungen haben gezeigt, dass mit den Bohrungen B1 - B4 der Rand des Braunkohlentertiärs mit einem nach NW abtauchenden Kohlenflöz und damit auch die Urananreicherung erfasst worden sind.



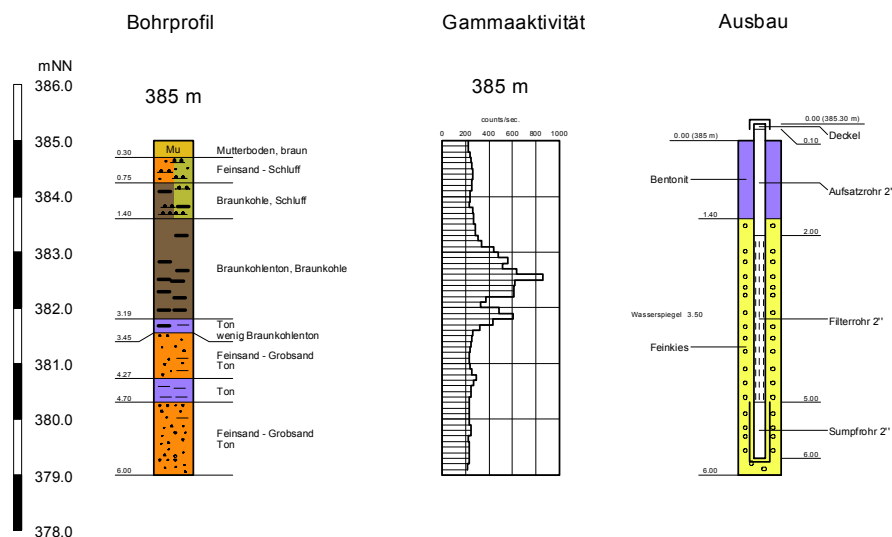
**Abb. 3.1.4:** Bohrarbeiten am Standort Heselbach; hier: Bohrung B2



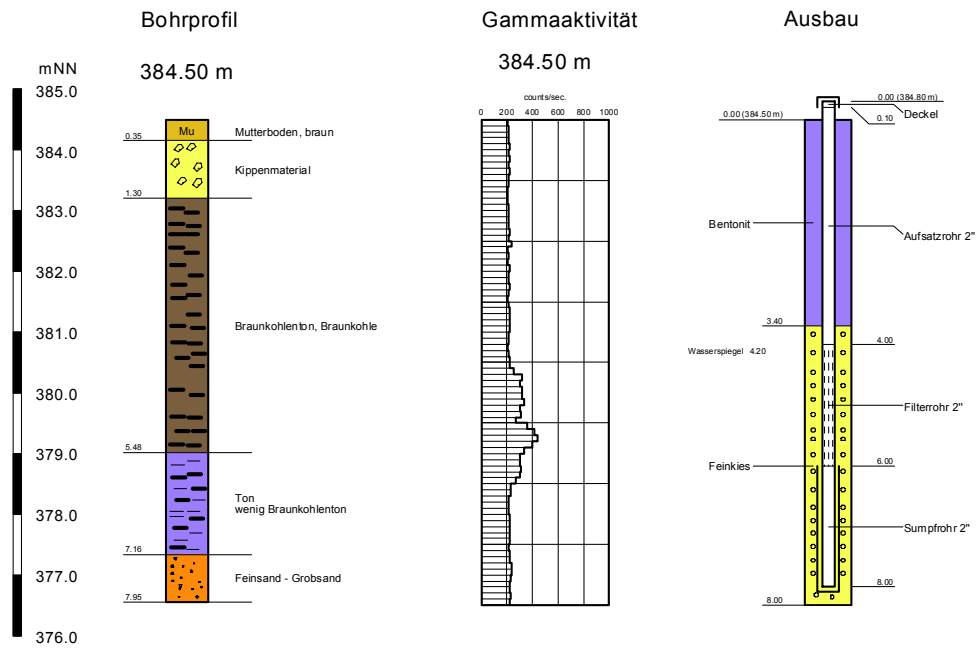
**Abb. 3.1.5:** Messung der Gamma-Strahlung an Sedimenten der Bohrungen B1 - B4 am Standort Heselbach mit einem Differential-Spektrometer

### 3.1.3 Probenbehandlung und $\gamma$ -Charakterisierung

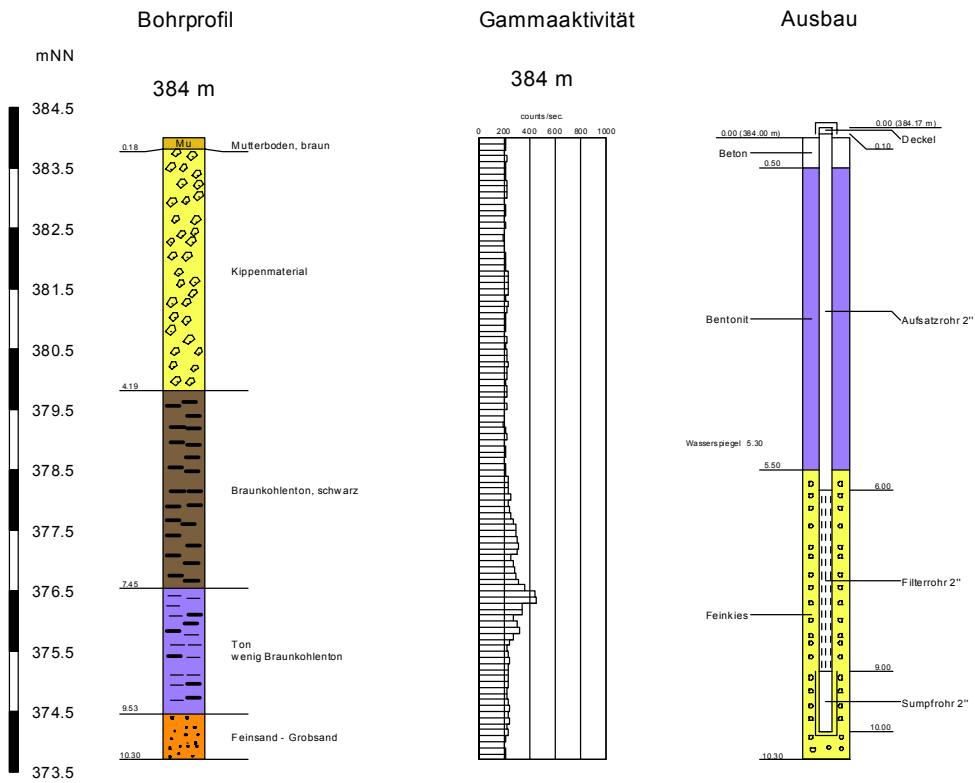
Die gewonnenen Bohrkerns wurden zum Schutz gegen Austrocknung unmittelbar in Plastikfolie eingeschlagen und in Kernkisten nach Braunschweig transportiert. Zur detaillierteren Probenauswahl für weiterführende Untersuchungen wurden die Kerne geologisch beschrieben und im 10-cm-Abstand gammaspektrometrisch vermessen, um die Urananreicherungshorizonte exakt zu erfassen (Abb. 3.1.6 bis Abb. 3.1.9).



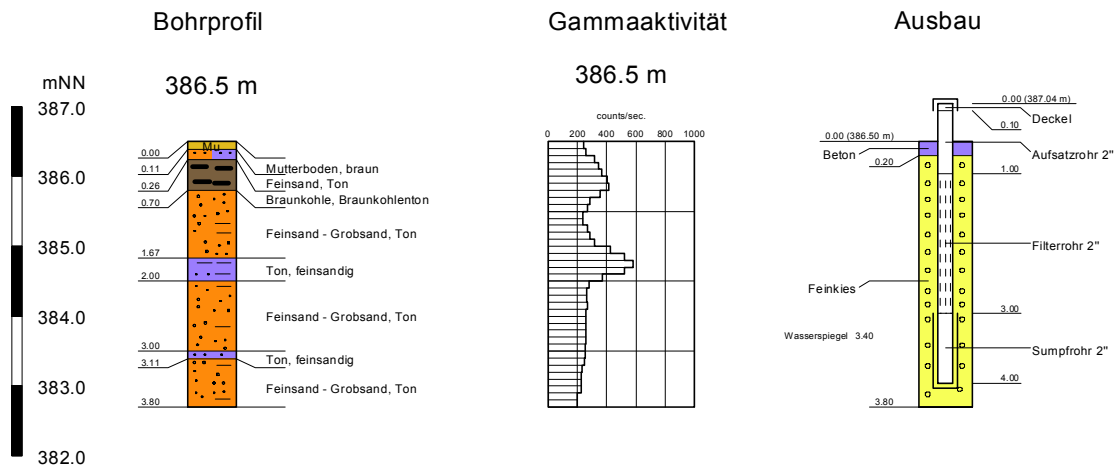
**Abb. 3.1.6:** Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B1



**Abb. 3.1.7:** Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B2



**Abb. 3.1.8:** Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B3



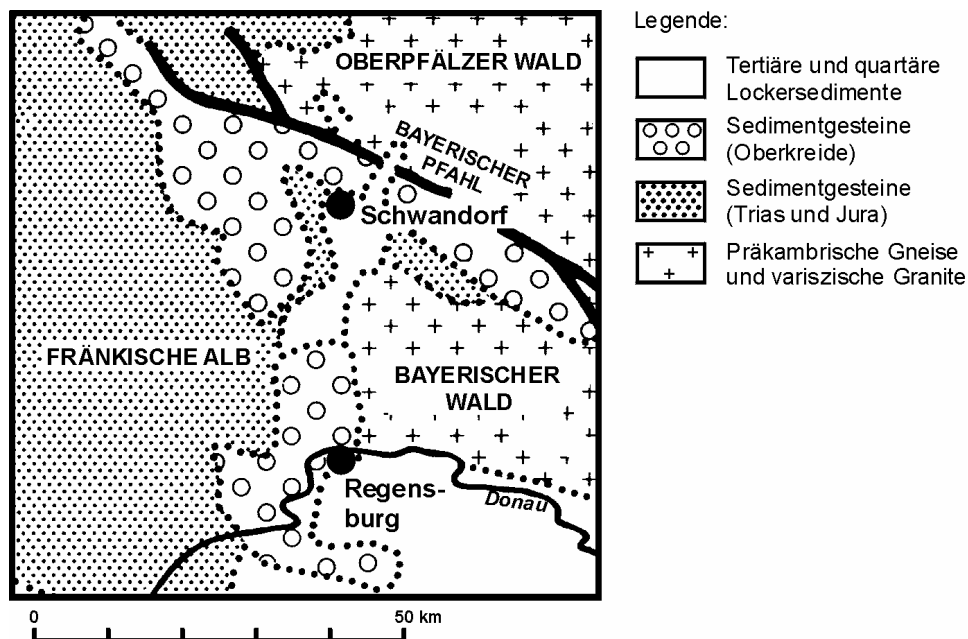
**Abb. 3.1.9:** Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B4

Alle vier Bohrungen zeichnen sich durch jeweils zwei Horizonte mit Urananreicherungen aus, von denen der obere in der Braunkohle selbst, der untere im Grenzbereich Braunkohle - liegende Tone angetroffen wird. Die in den Bohrungen B4 und B1 noch deutliche Differenzierung der beiden Horizonte nimmt mit zunehmender Tiefe ab.

## 3.2 Geologie

### 3.2.1 Einleitung

Heselbach liegt in der Bodenwöhrer Senke, einem Halbgraben, der südwestlich der Pfahl-Störungszone jüngere Sedimente des Deckgebirges gegen das ältere Grundgebirge des Oberpfälzer Waldes absetzt, ca. 6 km SE Schwandorf (Abb. 3.2.1).



**Abb. 3.2.1:** Geologische Übersichtskarte der Oberpfalz zwischen Schwandorf und Regensburg mit Verlauf des Bayerischen Pfahls (nach /HEN 92/)

Früheste Sedimente sind permische Arkosen und Fanglomerate des Rotliegenden (s. Tab. 3.2.1), darüber folgen mehrere 10er m mächtige geröllführende Arkosen und Sandsteine des Buntsandsteins und des Muschelkalkes. Besonders mächtig (140-180 m) ist der Keuper, der überwiegend aus Sandstein mit Tonsteinbändern besteht. Geringmächtige Lias- und Dogger-Schichten bilden eine deutliche Geländestufe. Sie werden von mächtigen (200 m), randlich marin gebildeten Oberkreidesedimenten überlagert. Nach einer langen flächenhaften Erosion kam es dann im unteren Miozän zu einer kräftigen Hebung des Gebietes relativ zur Molassezone im Süden und damit zu einer Eintiefung der Flüsse - es entstand das weit verzweigte Rinnensystem der Ur-Naab. Die Füllung der tertiären Braunkohlenrinnen reicht stratigraphisch vom Otnang bis ins Karpat (unteres bis mittleres Miozän). Die Braunkohle des ehemaligen Wackersdorfer Tagebaues lässt sich als eine Weichbraunkohle charakterisieren, die

sich aus etwa 50 % erkennbaren Hölzern (Xylite) sowie aus feiner Gewebekohle bzw. stark vergelter Grundmasse mit lateral rasch wechselnden Lagen von Kohlentonen und Sanden zusammensetzt /EIG 84/.

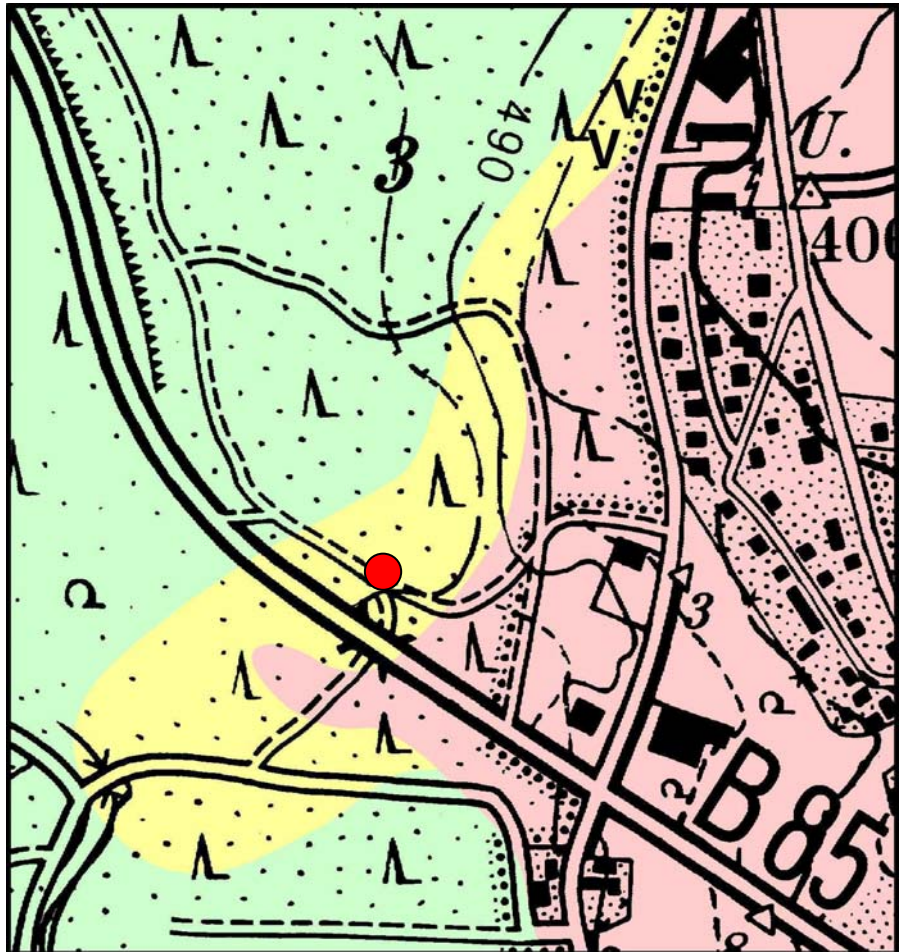
**Tab. 3.2.1:** Stratigraphische Tabelle zur Alterseinstufung der Schichtenfolgen am Standort Heselbach (nach /MUR 83/)

System (Alter [Ma])	Serie (Alter [Ma])	System (Alter [Ma])	Serie
Quartär ( < 2)	Holozän ( < 0,01)	Jura (135 - 190)	Malm
	Pleistozän (0,01 - 2)		Dogger
Tertiär (2 - 65)	Pliozän (2 - 7)		Trias (190 - 225)
	Miozän (7 - 26)	Keuper	
	Oligozän (26 - 37)	Muschelkalk	
	Eozän (37 - 54)	Buntsandstein	
	Paläozän (54 - 65)	Perm (225 - 280)	Zechstein
Kreide (65 - 135)	Obere Kreide		Rotliegendes
	Untere Kreide	Prä-Perm ( > 280)	

Bezüglich der Herkunft von Urananreicherungen ist festzuhalten, dass zunächst das Oberpfälzer Kristallin viele Uranvorkommen enthält. Durch Verwitterung und Abtragung könnte das Uran der Gesteine und der Fluoritgänge mobilisiert worden sein. In terrestrischen fluviatilen Sedimenten, in randlichen limnischen Becken mit oder ohne Kohlen, und in randlich marinen Sedimenten des permisch-mesozoisch-känozoischen Deckgebirges waren lokal oder regional mehrfach in der geologischen Geschichte Bedingungen zur Ausfällung des mobilisierten Urans gegeben, so dass der Oberpfälzer Wald, das Fichtelgebirge und das Erzgebirge von einem Hof sedimentärer (besser infilträrer) Uranlagerstätten bzw. Vorkommen umgeben sind. In der Oberpfalz, bis in den Raum östlich Nürnbergs, sind solche Vorkommen vor allem im Burgsandstein des mittleren Keupers beschrieben worden.

Das Uran des Burgsandsteins ist in kohligen, pyritführenden Schluff- und Tonsteinen festgelegt, in welchen Gehalte bis 0,2 % U auftreten, die als Produkte einer frühdiagenetischen Infiltration und Ausfällung an Redox-Grenzen (ähnlich wie bei *roll*

fronts) interpretiert werden können. Daneben gibt es Uran auch in Calcretes, Silcretes und Dolcretes (Karbonat-, Silikat- bzw. Dolomitzement) sowie in phosphatischen Arkosen. Aus dem Raum der Bodenwöhler Senke sind keine Angaben zur Uranführung des Burgsandsteins bekannt, jedoch sind äquivalente Verhältnisse zu den Gebieten im Nordwesten anzunehmen.



Legende:

- Innenkippe
- Braunkohlentertiär  
z.T. unter Kippe
- Keuper
- V  
V Relikte von Kieselfeinsandsteinen  
der Reinhausener Schichten (Tripel)

**Abb. 3.2.2:** Geologische Detailkarte des Projektgebietes Heselbach mit Lage der Bohrung B2 (Punkt)



Das Uran am Ostrand der Wackersdorfer Kohlemulde kann aus geologischen, orographischen und hydrographischen Gründen nicht aus Wölsendorf bezogen werden, wie das /ZIE 61/ postuliert hat. Die zur Schichtung des Braunkohlentertiärs quergreifende Lagerung uranreicher Linsen belegt eindeutig eine Infiltration von Osten her, also aus dem Gebiet des grundwasserreichen Burgsandsteins. Eine Verbindung zum uranführenden Kristallin kann nicht hergestellt werden, da auch zur Zeit der Braunkohlenmoore (wie heute) ein Rücken von Kreidesandsteinen und die lange Moorrinne vom Rauberweiher einen direkten Abfluss aus dem Kristallin in das Wackersdorfer Feld unmöglich machten. Die alleine verbleibende Quelle für das Uran am Ostrand der Wackersdorfer Kohlenmulden ist demnach der Burgsandstein.

### **3.2.2 Standortverhältnisse**

Das engere Untersuchungsfeld umfasst drei geologische Einheiten (s. Abb. 3.2.2):

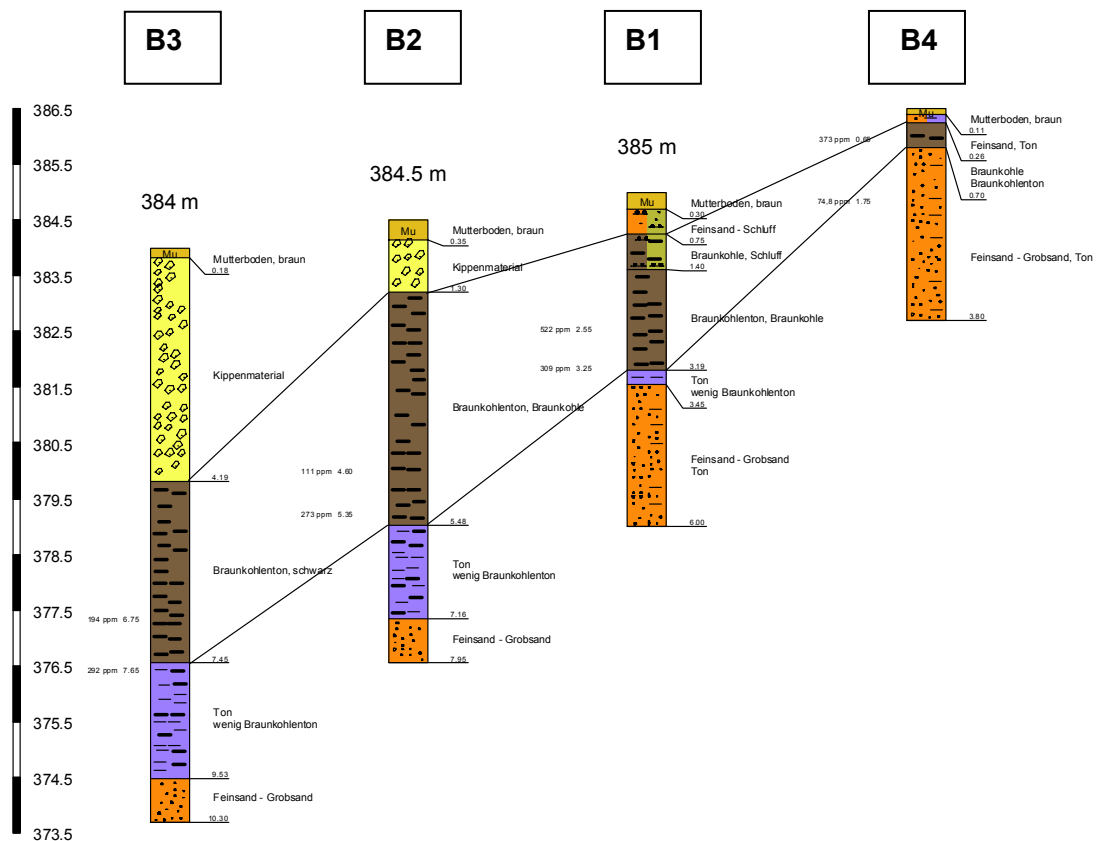
1. den Burgsandstein des mittleren Keuper als Liegendes bzw. östliche Umrahmung der Braunkohlenmulde (rosa),
2. den nach dem Kohlentagebau verbliebenen Rest des Braunkohlentertiärs (gelb) sowie
3. die Innenkippe des Tagebaues Nordfeld, welche etwa bis zur Wiederherstellung der früheren Geländeoberfläche aufgeschüttet worden war (grün).

Die Grenzen zwischen den drei genannten geologischen Einheiten können bislang noch nicht exakt rekonstruiert werden, weder aus den Profilen der Uranexploration noch aus eigenen Bohrungen

Quantitative Daten zur hydrogeologischen Situation liegen bisher nicht vor. Aus einzelnen Beobachtungen lässt sich jedoch ein generelles Bild zusammenfügen. Das tonige Liegendtertiär am Muldenrand wirkt offenbar grundwasserstauend, so dass der Grundwasserspiegel des Burgsandsteins von Osten abfallend etwa mit der schmalen Zone oberflächlich anstehenden Tertiärs am Fuße der Böschung austritt. Quellen im eigentlichen Sinne sind nicht zu beobachten. Es liegt jedoch ein vernässter Bereich mit einzelnen Tümpeln vor. In der Innenkippe sinkt der Grundwasserspiegel langsam nach Westen ab, vermutlich mit einem Gefälle, das dem Abstand und der Höhendifferenz zum Vorfluter entspricht. Das ist der Knappensee mit 364 m Wasserspiegelhöhe in einer Entfernung von ca. 500 bis 600 m. Das hydraulische Gefälle beträgt demnach bei



$i = h/l = 26/500 = 0,05$ . Über die mittlere Durchlässigkeit bzw. die Fließgeschwindigkeit in der Innenkippe können gegenwärtig noch keine Aussagen gemacht werden, sicher ist jedoch eine große Inhomogenität ebenso wie große vertikal/horizontale Anisotropie. Mit Hilfe der im Dezember 1999 abgeteufte Aufschlussbohrungen, die in erster Linie einer Überprüfung der Modellvorstellungen (s. Kapitel 3.6) dienen, konnten die getroffenen Annahmen in allen wesentlichen Punkten bestätigt werden. Mit der gewählten Profillinie (Abb. 3.2.3) kann nunmehr der Rand des Braunkohlen-tertiärs näher charakterisiert werden. Bohrung B4 befindet sich in unmittelbarer Nähe der Keuper-Schichtstufe, Reste der Braunkohle treten hier fast zu Tage aus. Mit zunehmender Entfernung vom Beckenrand taucht das Braunkohlenflöz ab und in den Bohrungen B2 und B3 findet sich oberflächennah Innenkippenmaterial, erst darunter ist die weitgehend natürliche Lagerung erbohrt worden.



**Abb. 3.2.3:** Geologische Korrelation der Aufschlussbohrungen im Untersuchungsgebiet Heselbach (B3 - B2 - B1 - B4)

Nähere Einzelheiten zur regionalen Geologie und insbesondere zur Urangenenese sind in /BRA 98/ zu finden.

### 3.3 Sediment-Untersuchungen

#### 3.3.1 Bohrkernbeschreibung

Eine detaillierte Beschreibung der Bohrkernprofile ist in Abb. 3.3.1 bis Abb. 3.3.4 erfolgt. Unter einer geringmächtigen Bodenbedeckung folgt in den beiden beckenwärts gelegenen Bohrungen B2 und B3 Kippenmaterial mit nach NW zunehmender Mächtigkeit. Zwischen den Bohrungen B1 und B2 ist also an dieser Lokalität der Rand des ehemaligen Braunkohletagebaus und der im Anschluss durchgeführten Verfüllmaßnahmen anzusetzen (s. auch Kap. 3.2). Darunter folgt die im Wackersdorfer Braunkohlenbecken abgebaute und hier nur noch geringmächtig ausgebildete Braunkohle, teils mit Zwischenlagerungen von Ton bzw. Braunkohlenton. Im Liegenden der Braunkohle finden sich überwiegend Tone mit z. T. sandigen Zwischenlagen. Die Beantwortung der Frage, inwieweit diese Schichtenfolge noch Tertiäre Basistone und / oder bereits Sedimente des unterlagernden Keuper darstellt, ist nicht Ziel des Vorhabens und auf Basis der begrenzten Aufschlüsse auch nicht möglich gewesen.

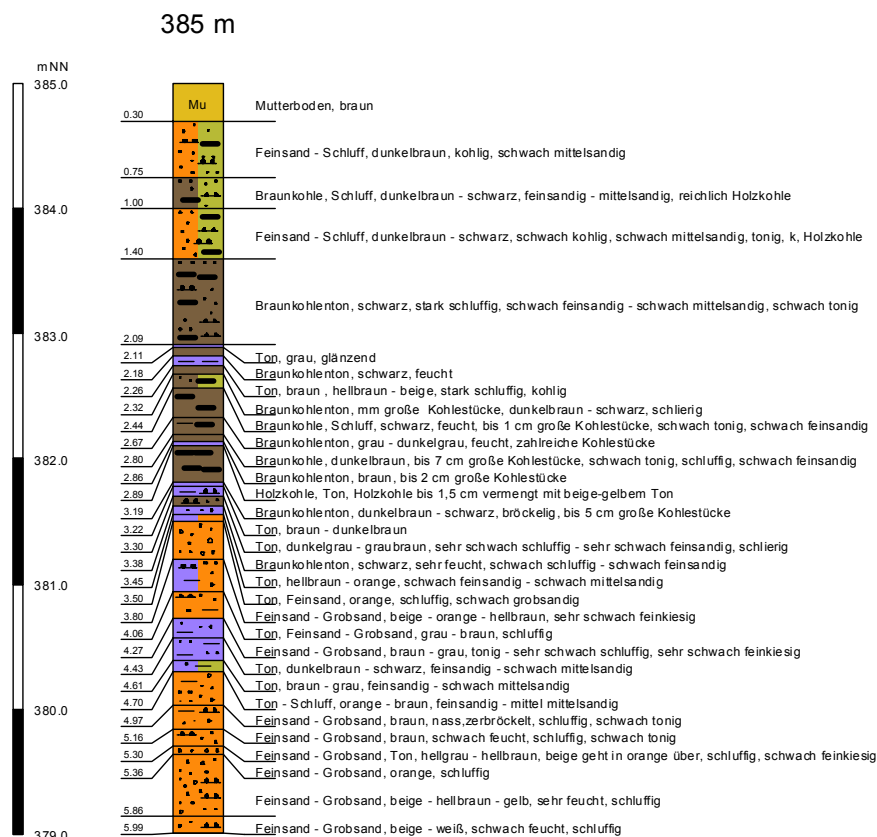


Abb. 3.3.1: Geologische Profilaufnahme der Bohrung B1

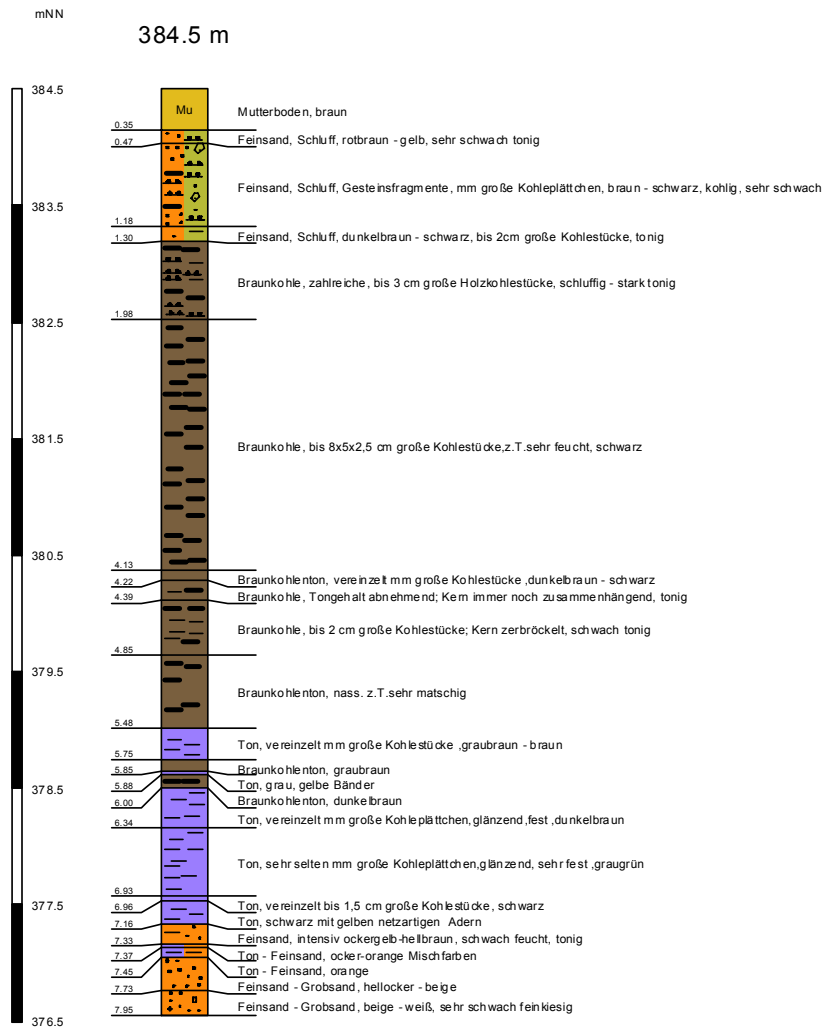


Abb. 3.3.2: Geologische Profilaufnahme der Bohrung B2

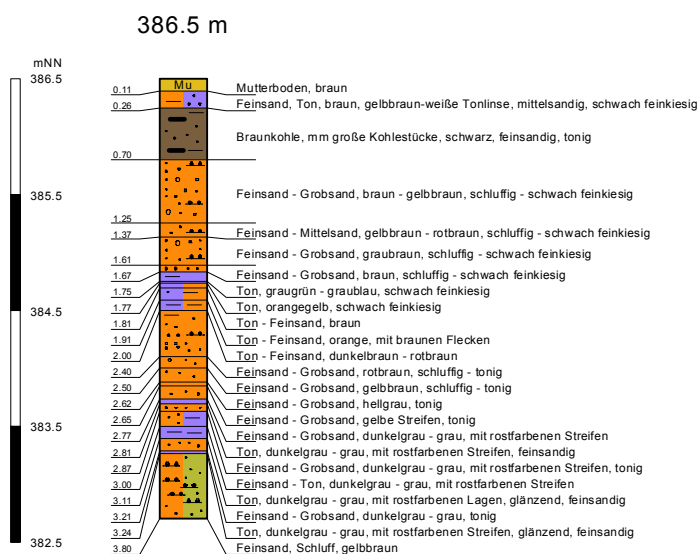


Abb. 3.3.3: Geologische Profilaufnahme der Bohrung B4

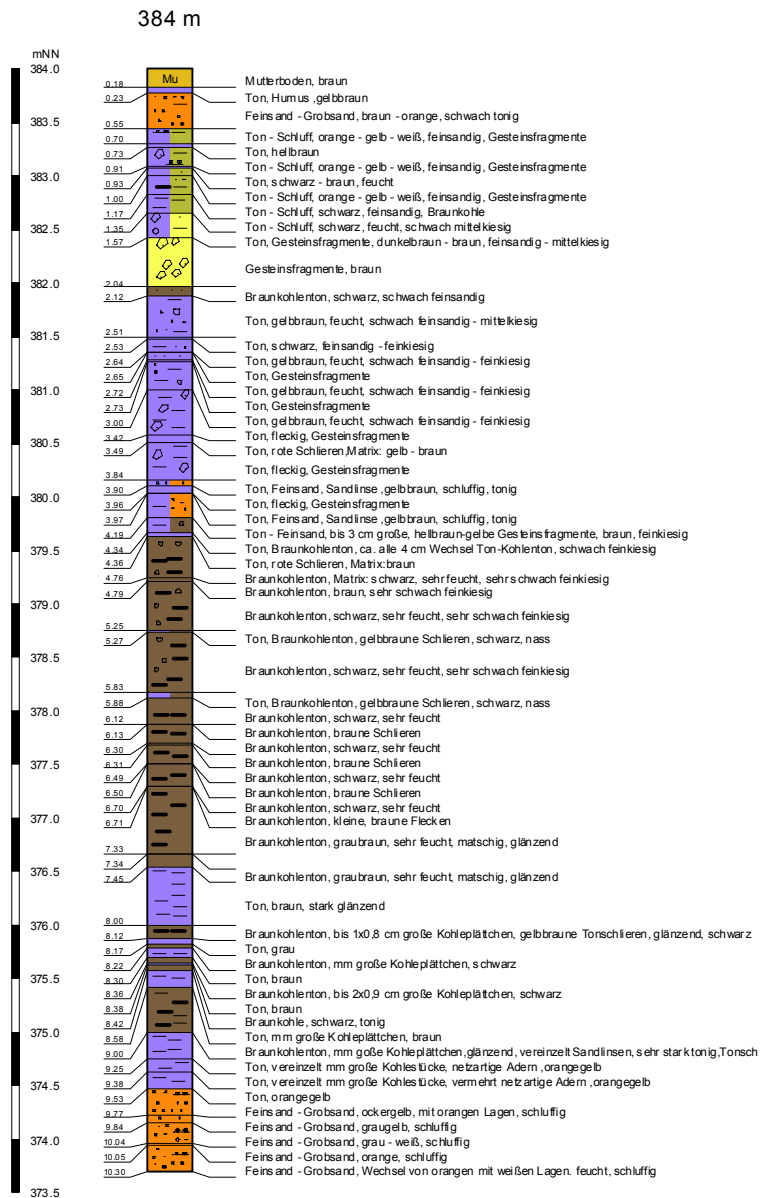
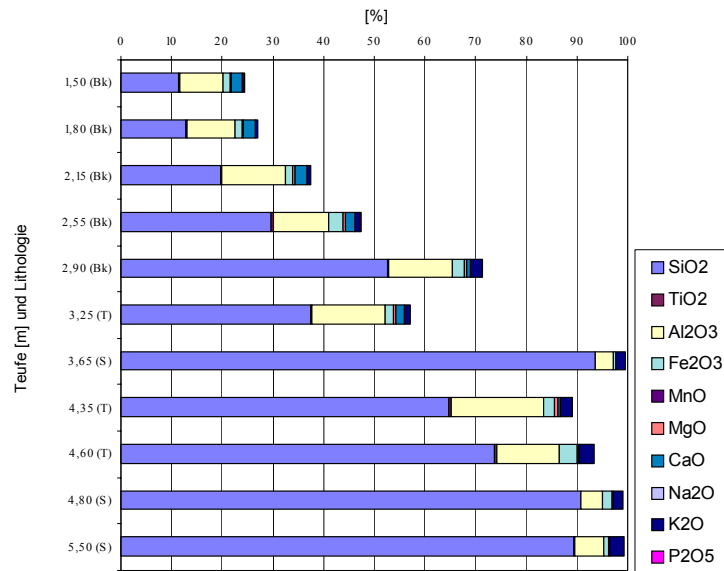


Abb. 3.3.4: Geologische Profilaufnahme der Bohrung B3

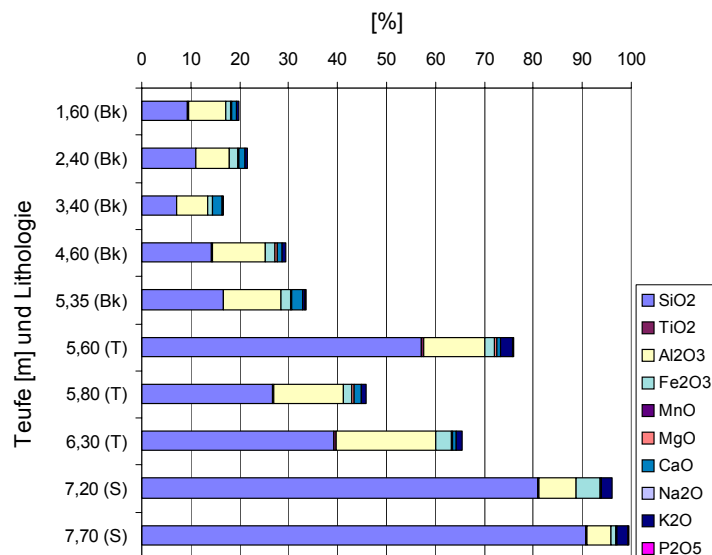
### 3.3.2 Chemische Analyse

Die Ergebnisse der Elementanalysen an Sedimentproben der Bohrungen B1 bis B4 sind im Anhang zusammengefasst und der Lithologie sowie dem Profil der gemessenen Gamma-Strahlung gegenübergestellt. Daraus wird deutlich, dass neben dem Uran auch eine Reihe von weiteren Elementen einerseits in der Braunkohle oder aber in den unterlagernden tonigen Sedimenten ihre Konzentrationsmaxima aufweisen.

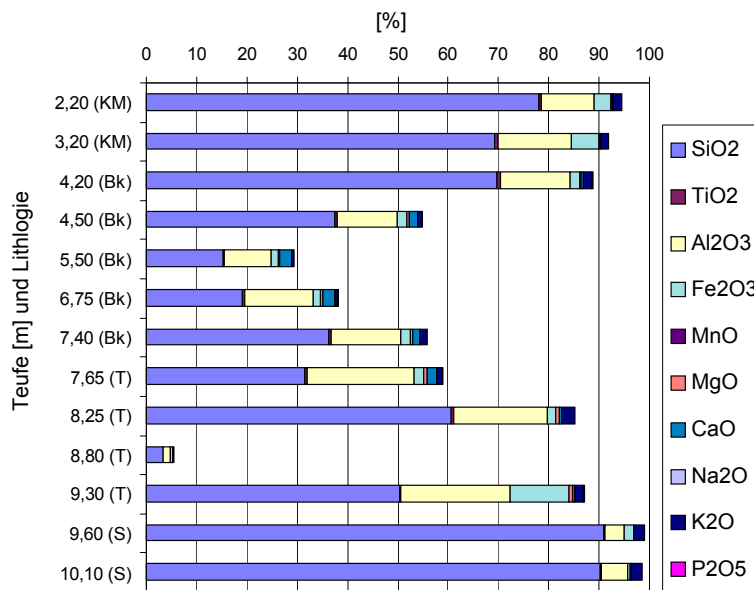
Aus der in der Geologie üblichen Umrechnung von Hauptelementgehalten auf die jeweilige Oxidform resultiert die in Abb. 3.3.5 bis Abb. 3.3.8 dargestellte Gesteinszusammensetzung. Neben Silizium und Aluminium als den dominierenden Gesteinsbestandteilen treten hauptsächlich Eisen- und Mangan- sowie Calcium-/Kaliumhaltige Minerale auf.



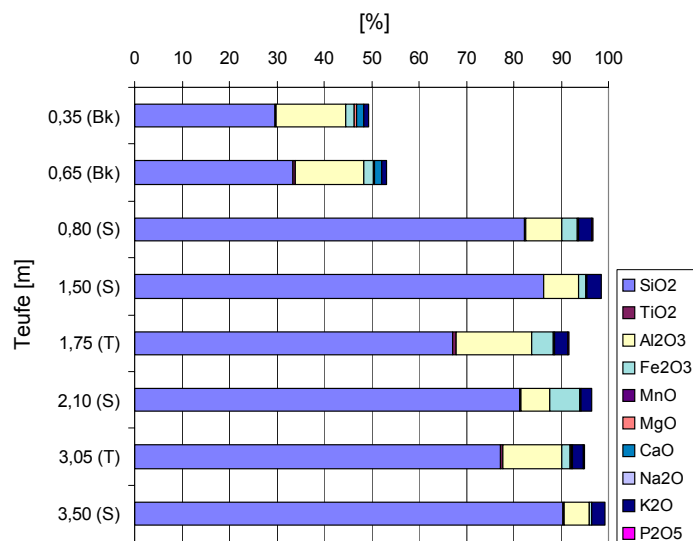
**Abb. 3.3.5:** Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B1 (oxidische Form)



**Abb. 3.3.6:** Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B2 (oxidische Form)



**Abb. 3.3.7:** Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B3 (oxidische Form)



**Abb. 3.3.8:** Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B4 (oxidische Form)

Eine separate Gegenüberstellung von Konzentrationsverläufen einzelner Elemente (Abb. 3.3.9 bis Abb. 3.3.12) zeigt darüber hinaus, dass nahezu in allen Bohrungen enge Beziehungen zwischen den Elementen U/Th, U/Cr, U/Cu und U/Ce sowie Zr/Zn bestehen. In einzelnen Bohrungen ist auch eine Korrelation von U/Pb und U/Ni zu beobachten. Zwischen Molybdän, das dem Uran in chemischer Hinsicht sehr ähnlich

ist, und dem Uran selbst konnte - entgegen den Erwartungen - keine Korrelation festgestellt werden. Die Ursache hierfür kann im Liefergebiet dieser Elemente begründet sein. Möglicherweise ist das Mo dort bereits (sulfidisch?) gebunden.

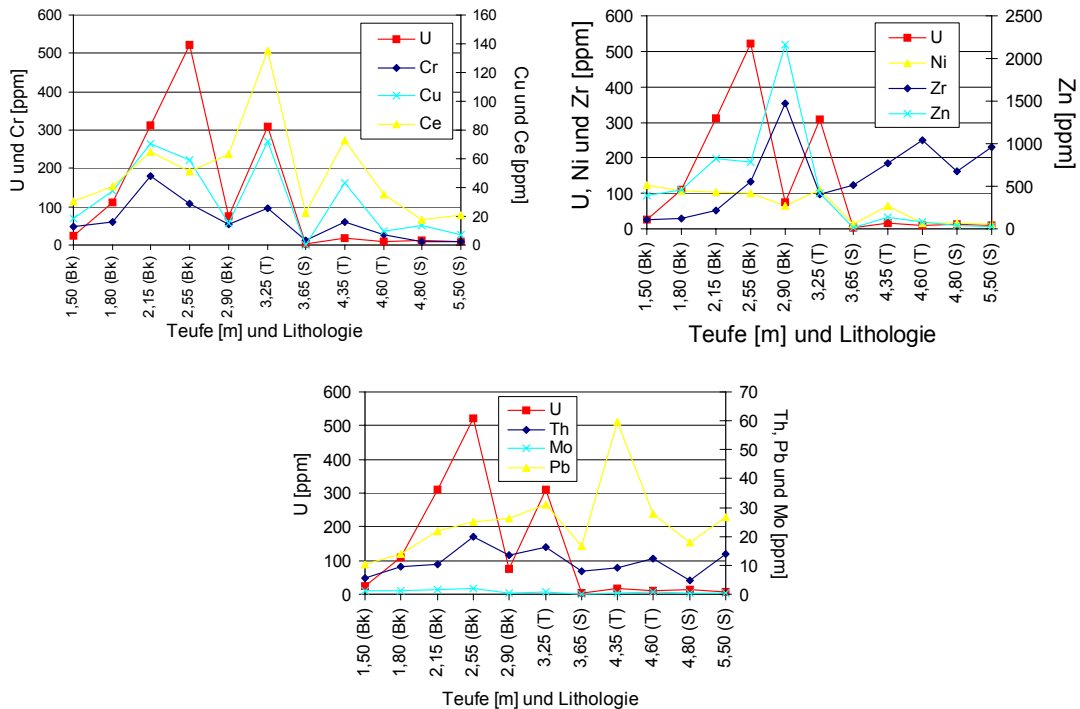


Abb. 3.3.9: Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B1

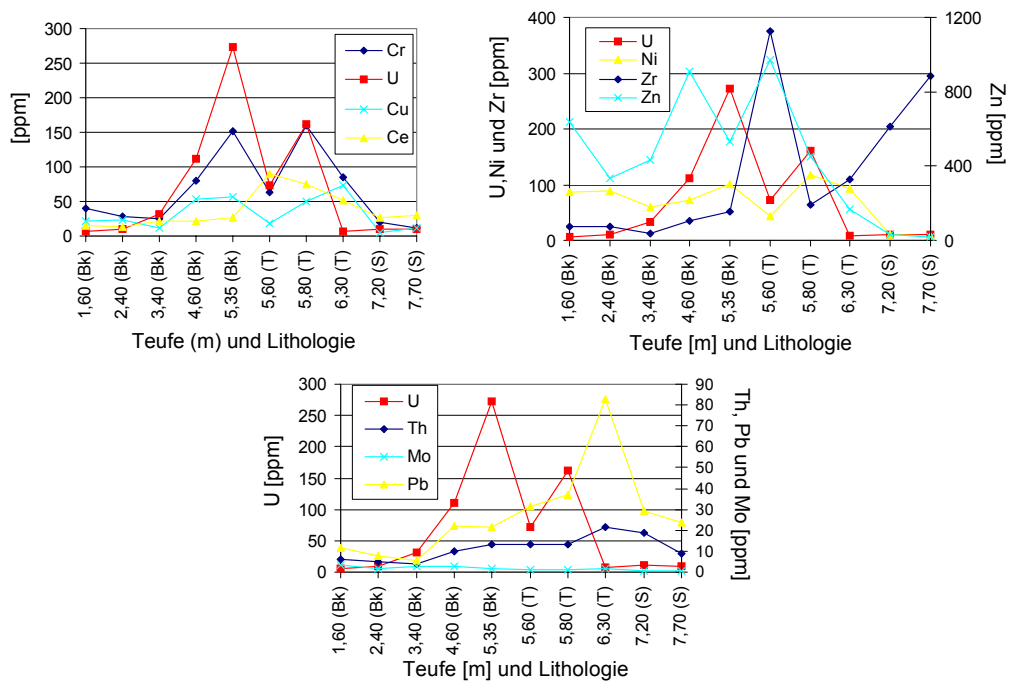


Abb. 3.3.10: Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B2

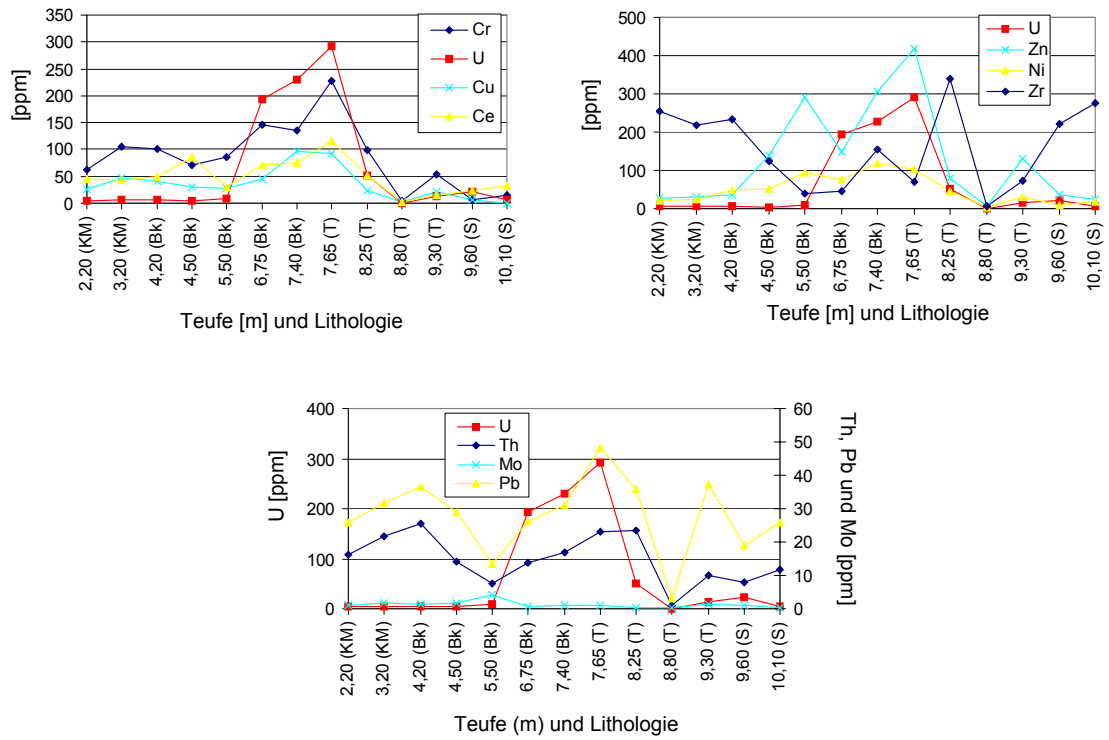


Abb. 3.3.11: Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B3

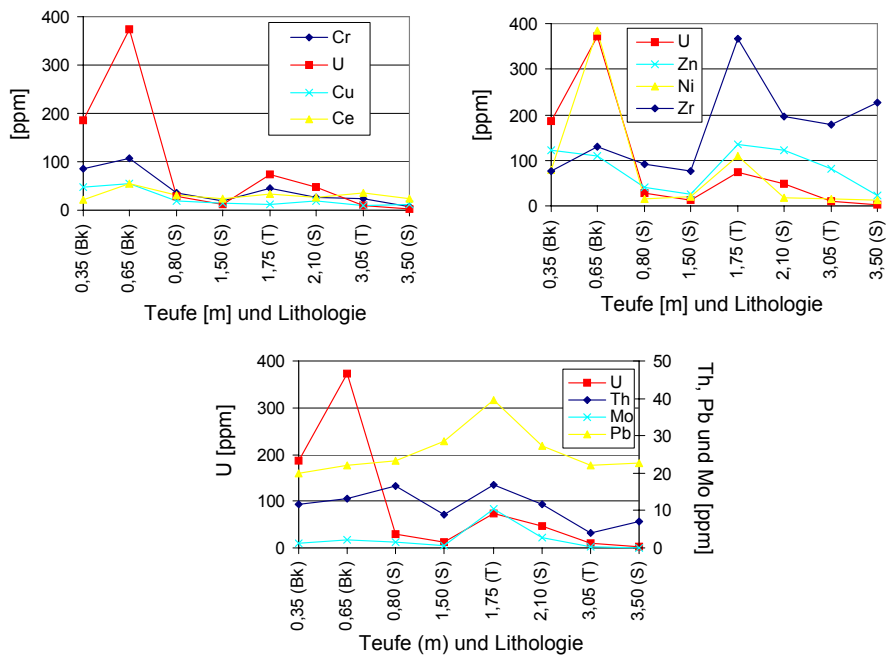
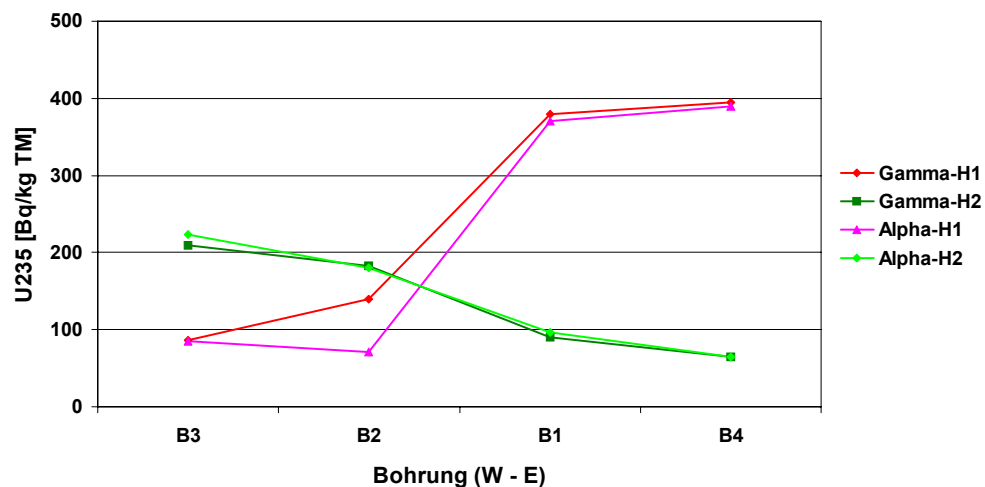


Abb. 3.3.12: Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B4



### 3.3.3 Radiometrische Charakterisierung

Die vier Bohrkern wurden direkt nach der Bohrkampagne gammaspektrometrisch untersucht. An jeweils zwei Proben mit hoher Gammaaktivität aus jedem Bohrkern wurden alpha-radiometrische Messungen durchgeführt. Die Gamma- und Alpha-Aktivitäten von  $^{235}\text{U}$  sind zum Vergleich in Abb. 3.3.13 dargestellt. Die Werte sind entsprechend der Grundwasserfließrichtung von B4 über B1 und B2 nach B3 angeordnet. Sie korrelieren sehr gut miteinander.



**Abb. 3.3.13:** Aktivitätsverteilung von  $^{235}\text{U}$  entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4 (H1 = oberer Horizont, H2 = unterer Horizont)

Zur Überprüfung der Messungen wurden die  $\alpha$ -radiometrisch ermittelten  $^{235}\text{U}$ -Konzentrationen, unter Berücksichtigung, dass  $^{235}\text{U}$  0,72 Gew.% der gesamten Urankonzentration ausmacht, in [ppm] umgerechnet und den ICP-Werten in Tab. 3.3.1 gegenübergestellt. Die ICP-Messungen an Proben aus dem oberem und unteren Horizont sind zusätzlich auch in Abb. 3.3.14 dargestellt.

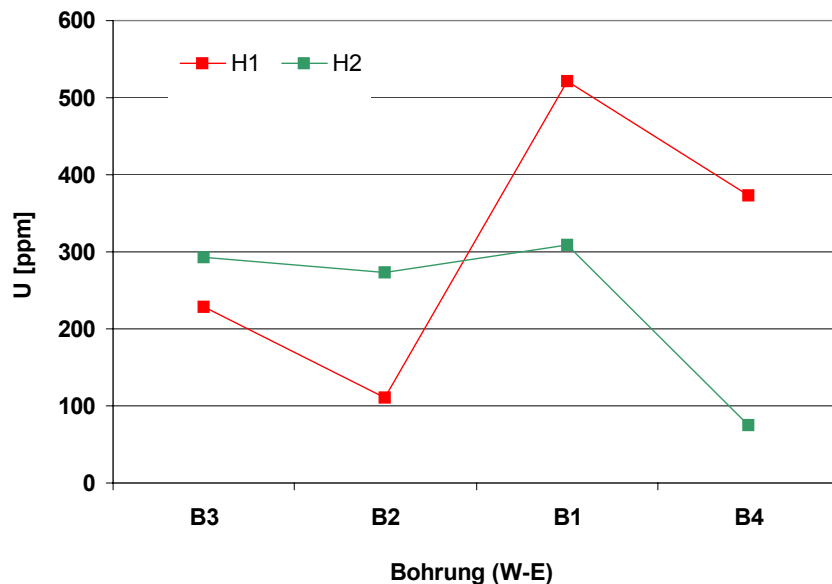
Die Verläufe zeigen das gleiche Bild wie die radiometrischen Messungen. Insbesondere der Abfall der Urankonzentration im oberen Horizont zwischen Bohrung B1 und B2 wird mit beiden Methoden erfasst. Generell stimmen die Werte von der Größenordnung überein, weichen aber bei einzelnen Proben signifikant voneinander ab. Besonders auffällig ist die im Vergleich zur radiometrischen Messung relativ niedrige Uran-Konzentration im oberen Horizont von Bohrkern B4. Die z. T. großen Abweichungen sind ein Indiz für die große Heterogenität der Probe. Die für ICP und Radiometrie verwendeten Proben stammen zwar aus unmittelbarer Nachbarschaft des

jeweiligen Kernsegments. Es fand aber keine vollständige Homogenisierung vor der Probenahme statt.

**Tab. 3.3.1:** Mittels ICP und  $\alpha$ -Radiometrie ermittelte Urangelhalte in [ppm]

	Horizont 1		Horizont 2	
	ICP	$\alpha$ -Radiometrie	ICP	$\alpha$ -Radiometrie
B4	373	677	75	112
B1	522	642	309	166
B2	111	220	273	312
B3	220	148	292	387

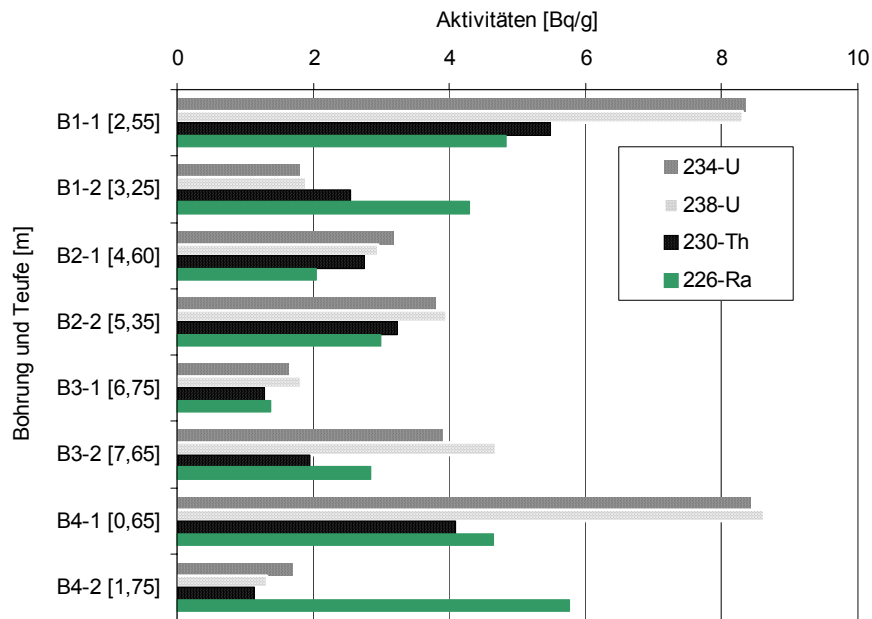
Auffällig ist das gegenläufige Verhalten im unteren Horizont. Die Urankonzentration nimmt in diesem Horizont von B4 in Richtung B3 (also von SE  $\rightarrow$  NW) zu. Bei den ICP-Messungen liegt die Urankonzentration von B4 niedrig, während sie bei den anderen drei Bohrungen etwa gleich hoch ist. Ob und inwieweit hierfür Faktoren wie z. B: Teufenlage, Grundwasserfließgeschwindigkeit, Mineralzusammensetzung, Sorptionsverhalten etc. verantwortlich sind, konnte im Rahmen der durchgeführten Analysen noch nicht geprüft werden.



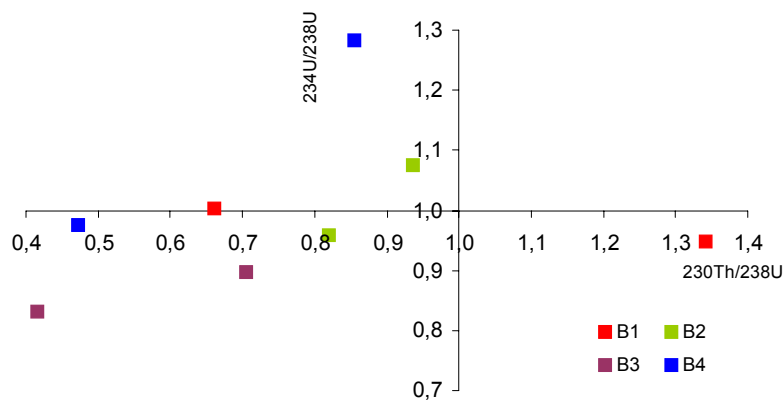
**Abb. 3.3.14:** Konzentrationsverteilung von Uran (ICP-Messung) entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4 (H1 = oberer Horizont, H2 = unterer Horizont)

In Abb. 3.3.15 sind die Aktivitäten wichtiger Isotope der Uranzerfallsreihe dargestellt und in Abb. 3.3.16 die  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - gegen die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse

aufgetragen. Bis auf die Probe aus dem unteren Horizont von B1 liegen alle  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnisse kleiner eins.



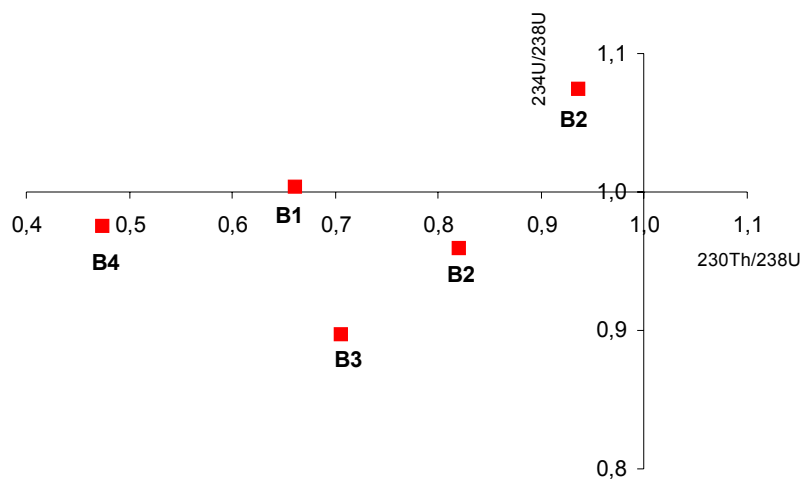
**Abb. 3.3.15:** Aktivitäten von Isotopen der Uranzerfallsreihe an Proben der Bohrungen B1 - B4



**Abb. 3.3.16:**  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - gegen  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse für Proben der Bohrungen B1 - B4

In Abb. 3.3.17 sind ausschließlich die Werte für die Proben aus dem Braunkohlehorizont aufgetragen. Dabei handelt es sich jeweils um die Proben aus dem oberen Horizont, im Fall der Bohrung 2 beide Proben. Es wird angenommen, dass im

Braunkohlehorizont Grundwassertransport stattfindet. Die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse schwanken um den Wert 1. Dies entspricht auch den in den Grundwässern bestimmten Verhältnissen. Das  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis ist für die Probe aus Bohrung B4 mit 0,47 am niedrigsten und nimmt in Fließrichtung zu, wobei allerdings der Wert für B3 niedriger liegt als für B2. Die Werte sind signifikant kleiner als 1, demnach ist für alle Sedimente der Braunkohle ein Uraneintrag anzunehmen. Eine Zunahme des  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisses in GW-Fließrichtung kann auf eine Abnahme der Uranabscheidungsrate zurückzuführen sein. Hierfür sprechen auch die insgesamt höheren Uran-Konzentrationen in B4 und B1 sowie die Abnahme der Urankonzentration im Grundwasser in Fließrichtung von B4 nach B3.



**Abb. 3.3.17:**  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - gegen  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse für Proben aus dem Braunkohlehorizont

Eine Erklärung für die starke Streuung der  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse in den drei Proben aus den unterlagernden Tonschichten gibt es bisher noch nicht. Dieser Frage soll nach Analyse von Sedimenten weiterer Bohrungen im Nachfolgeprojekt nachgegangen werden.

## 3.4 Grundwasser-Untersuchungen

### 3.4.1 Einleitung

Die im Raum Heselbach abgeteufte Bohrungen B1 - B4 haben in erster Linie das Ziel einer grundsätzlichen Eignungsprüfung des Standortes für weiterführende NA-Studien verfolgt, sind aber auch als Grundwassermessstellen ausgebaut (s. Kap. 3.1 und Abb. 3.4.1) und erlauben deshalb eine diskontinuierliche Entnahme von Grundwasserproben für eine Übersichtscharakterisierung.



**Abb. 3.4.1:** Grundwassermessstelle B2

### 3.4.2 Chemische Analysen

Die einer Orientierung bzgl. des hydrochemischen Milieus dienenden Untersuchungen haben sich an der Vorgehensweise am Standort Ruprechtov orientiert und umfassen zum einen die vor-Ort - Bestimmung von Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und Redox-Potential sowie die spektrophotometrische Bestimmung von  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{ges}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  und Mo (Tab. 3.4.1), zum anderen die standardmäßige chemische Grundwasser-Analytik im Labor (Tab. 3.4.2).

Bereits die vor-Ort bestimmten Parameter verdeutlichen das gegenüber dem Standort Ruprechtov unterschiedliche hydrochemische Milieu. Bei - mit Ausnahme des Oberflächenwassers SBS - vergleichbarer Gesamtmineralisation (dokumentiert durch

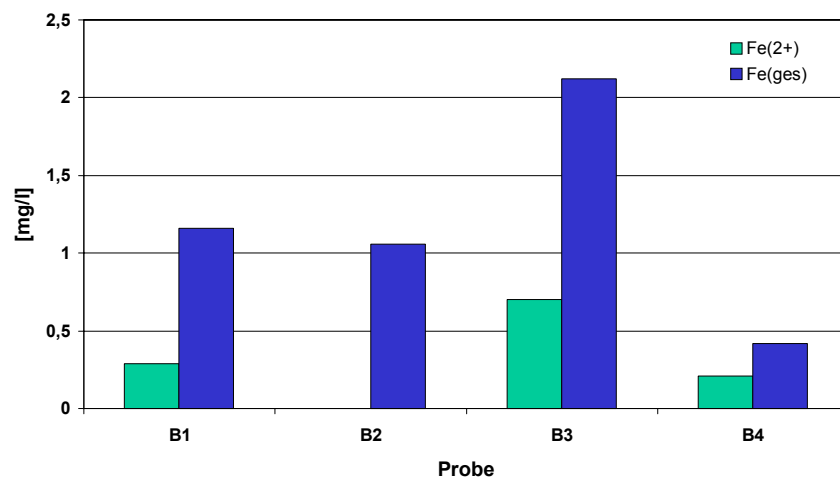
die elektrische Leitfähigkeit) weisen die „Heselbach-Wässer“ deutlich niedrigere pH-Werte (ca. pH = 5; Ausnahme: B4) auf und das Redox-Potential liegt deutlich im positiven Bereich (s. auch Abb. 3.4.2 und Abb. 3.4.3).

**Tab. 3.4.1:** On-site gemessene Parameter im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 sowie im Steinberger See (SBS)

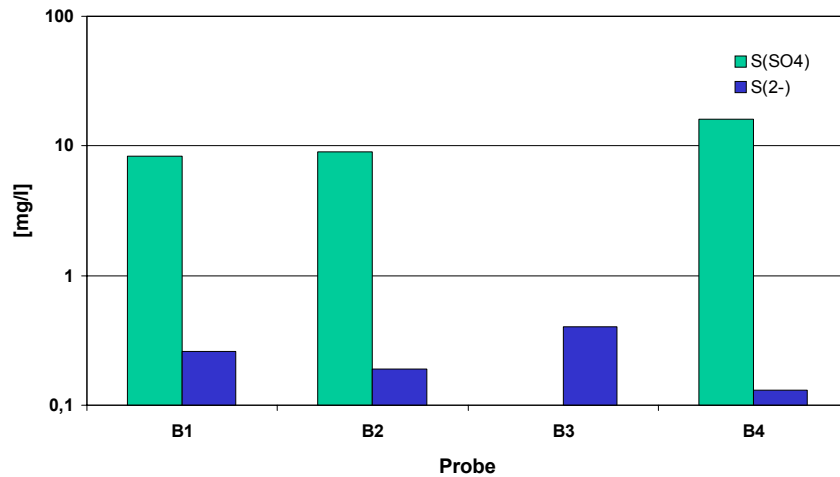
Bezeichnung	Datum	T [°C]	C [µS/cm]	pH	Redox [mV] *)	Fe <sup>2+</sup> [mg/l]	Fe <sub>ges</sub> [mg/l]	Mo [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	S <sup>2-</sup> [mg/l]
B1-GW1	16.03.00	7,1	505	4,76	225	0,29	1,16	0,0	25	0,26
B1-GW2	03.01.01	6,9	467	4,95	225	0,0	0,0	0,5	90	0,001
B1-GW3	23.07.01	17,4	540	5,10	305					
B2-GW1	16.03.00	8,2	552	4,77	241	0,0	1,06	n.g.	27	0,19
B2-GW2	03.01.01	8,0	500	5,10	205	0,01	0,02	0,5	95	0,0
B3-GW1	16.03.00	8,7	522	4,89	198	0,70	2,12	n.g.	n.g.	0,40
B3-GW2	04.01.01	8,2	460	5,06	230	0,0	0,01	0,0	90	0,001
B3-GW3	23.07.01	22,0	740	5,39	330					
B4-GW1	16.03.00	6,4	426	9,87	105	0,21	0,42	n.g.	48	0,13
SBS-OW1	04.01.01	4,0	1.240	4,15	310	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.

<sup>\*)</sup> Werte bezogen auf Pt-Ag/AgCl-Elektrode, zur Normierung auf Standard-Wasserstoffelektrode müssen zum angegebenen Wert jeweils 210 mV addiert werden

Damit bestätigt sich der Ansatz, dass der Standort Heselbach eine sinnvolle Ergänzung der Arbeiten in Ruprechtov darstellt: Aufgrund der größeren Obefächennähe und des damit veränderten hydrochemischen Milieus können andere Eh- / pH-Bereiche und deren Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten des Urans analysiert werden.

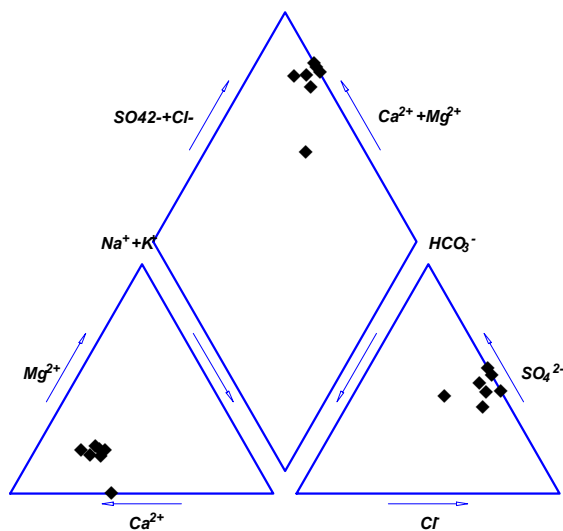


**Abb. 3.4.2:** „On-site“-gemessene Fe-Gehalte im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 (Vergleich von Fe<sup>2+</sup> und Fe<sub>ges</sub>)



**Abb. 3.4.3:** „On-site“-gemessene S-Gehalte im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 (Vergleich von S(SO<sub>4</sub>) und S<sup>2-</sup>)

Der Gesamtchemismus der am Standort untersuchten Grund- bzw. Oberflächenwässer ist in Tab. 3.4.2 zusammengestellt. Die graphische Darstellung der Hauptkomponenten-Zusammensetzung erfolgt wiederum in einem (modifizierten) Piper-Diagramm (Abb. 3.4.4).



**Abb. 3.4.4:** Darstellung der Grundwasseranalysen (B1 - B4) in einem modifizierten Piper-Diagramm

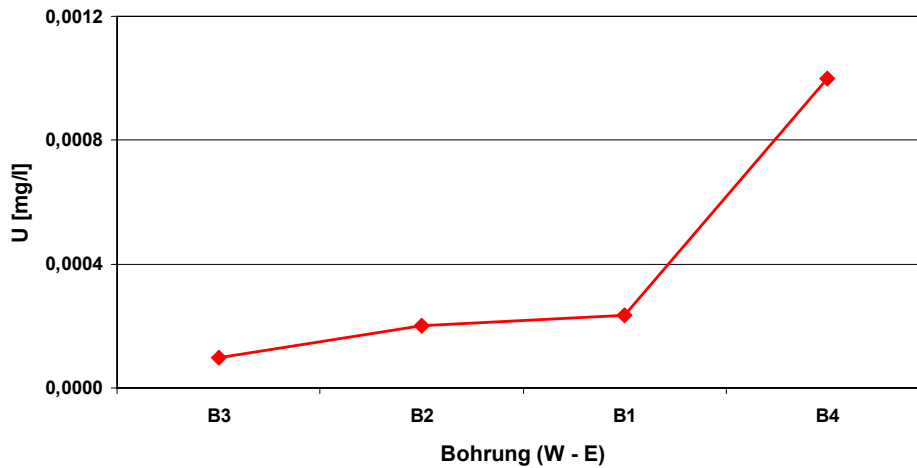
**Tab. 3.4.2:** Ergebnisse der chemischen Analyse von Grund- und Oberflächenwässern am Standort Heselbach [mg/l]

	B1-GW1	B1-GW2	B2-GW1	B2-GW2	B3-GW1	B3-GW2	B4-GW1	SBS-OW1
Na	12,4	14,7	17,7	18,7	18,9	18,3	17,7	30,5
K	8,0	13,2	9,5	13,7	11,4	13,7	27,4	14,6
Ca	54,2	50,3	56,4	54,3	48,8	47,1	50,0	206,6
Mg	9,6	10,9	9,4	11,4	8,2	10,0		20,6
Cl	81,4	74,7	81,0	70,6	64,9	57,0	39,7	27,7
SO <sub>4</sub>	79,6	81,8	97,2	100,9	93,2	93,5	65,4	615,9
NO <sub>3</sub>	24,2		27,0		36,7		11,0	
TIC	0,43		0,76		0,60		0,44	
TOC	2,42		2,57		2,57		19,66	
Al	0,4480	0,4070	0,3950	0,4030	0,3520	0,3470	1,0210	2,0150
B	0,1560	7,2490	0,3110	3,4680	0,2420	1,9750	0,5050	5,6250
Ba	0,1250	0,0540	0,0880	0,0330	0,1130	0,0310	0,0870	0,0300
Co	0,0020		0,0040		0,0020		0,0010	
Cr	0,0004		0,0005		0,0009		0,0040	
Cu	0,0010		0,0010		0,0020		0,0210	
Fe	0,8620	0,2490	1,4170	0,1730	1,1350	0,0280	1,5880	0,0220
La		0,0020		0,0020		0,0010		0,0060
Li	0,2560		0,2590		0,2600		0,2500	
Mn	0,2600	0,4600	0,1600	0,2900	0,4000		0,0900	1,6000
Ni	0,017		0,017		0,012		0,004	
P	0,074		0,078		0,011		0,159	
Pb	0,0001	0,040	0,0005	0,033	0,001	0,042		0,036
Sr	0,201	0,145	0,219	0,154	0,196	0,101	0,691	0,845
Ti		0,191		0,189		0,100		0,713
Th	0,0003		0,0003		0,0003		0,0003	
U	0,00023		0,0002		0,0001		0,001	
V	0,010		0,010		0,008		0,012	
Zn	0,330		0,396		0,352		0,083	

Generell ist zu den Grundwassermessungen zu bemerken, dass die Probenahme mit einem Schöpfgefäß bzw. einer Vakuum-Handpumpe aus dem Bohrloch erfolgte. Insgesamt sind die Wässer dem Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-Typ zuzuordnen, wobei das Oberflächenwasser SBS (Steinberger See) signifikant höhere Ca- und SO<sub>4</sub>-Konzentrationen aufweist als die Grundwässer, was sich auch in der elektrischen Leitfähigkeit dokumentiert. Die TIC-Konzentrationen entsprechen einem CO<sub>2</sub>-Partialdruck, der nur geringfügig über dem in der Atmosphäre liegt. Bei pH-Werten im Bereich von 5 liegt der überwiegende Anteil als H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, bzw. gelöstes CO<sub>2</sub> vor.



Die im Grundwasser gemessenen Uran-Konzentrationen liegen im 1/10- $\mu\text{g/l}$ -Bereich, zeigen aber bei einer der geologischen Profillinie entsprechenden Darstellung (Abb. 3.4.5) deutlich einen beckenwärts gerichteten Gradienten, wie er auch im oberen Horizont der Sedimentprofile zu erkennen gewesen ist.



**Abb. 3.4.5:** Uran-Konzentrationsverteilung im Grundwasser entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4

### 3.4.3 Radiometrische Charakterisierung

An den Messstellen B1 – B3 wurden Grundwässer auf ihre Gehalte an Isotopen der Uranzerfallsreihe untersucht. Leider war eine Grundwasserentnahme aus Bohrung B4 nicht mehr möglich, da die Bohrung aufgrund eines Unfalls vollständig zerstört wurde.

**Tab. 3.4.3:** Radionuklidgehalte von Wasserproben aus dem Projektgebiet Heselbach [mBq/l] - -radiometrische Messungen

Probe	U-234	U-238	Th-230	Ra-226
OW-SBS	5,8 +/- 0,8	6,4 +/- 0,9	11,2 +/- 1,6	22,7 +/- 3,4
B1-GW2	8,6 +/- 1,3	12,5 +/- 1,8	2,4 +/- 0,4	152,1 +/- 22,8
B2-GW2	10,0 +/- 1,5	8,7 +/- 1,3	5,9 +/- 0,9	65,6 +/- 9,8
B3-GW2	6,7 +/- 1,1	6,1 +/- 0,9	3,9 +/- 0,9	67,9 +/- 10,1

Die radiometrisch bestimmten  $^{238}\text{U}$ -Konzentrationen wurden in Massenkonzentrationen umgerechnet und in Tab. 3.4.4 den Urankonzentrationen aus ICP-Messungen

gegenübergestellt. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass die Uran-Gesamtkonzentration derjenigen von  $^{238}\text{U}$  entspricht.

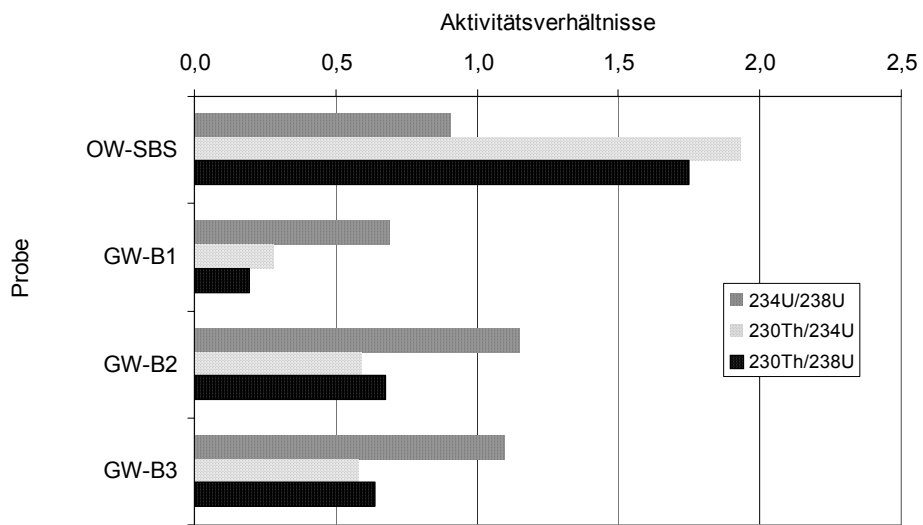
**Tab. 3.4.4:** Mittels ICP und  $\alpha$ -Radiometrie bestimmte Urankonzentrationen der Grundwässer

	Urankonzentration [mg/l]	
	ICP	$\alpha$ -Radiometrie
B1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
B2	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
B3	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
B4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.b

Die mittels  $\alpha$ -Radiometrie bestimmten Konzentrationen liegen signifikant höher als die per ICP-MS ermittelten Konzentrationen. Die Abweichungen konnten bisher noch nicht abschließend interpretiert werden. Die Proben entstammen aber beispielsweise unterschiedlichen Probenahme - Kampagnen mit ca. 10 Monate auseinander liegenden Entnahmepunkten, was eine mögliche Begründung für die o. g. Abweichungen liefern kann. Ein weiterer Grund kann auch in einem systematischen Fehler liegen. Die  $\alpha$ -Radiometrie ist eine vergleichsweise sehr genaue Analysemethode, deren relativer Fehler im untersuchten Konzentrationsbereich bei etwa 10 - 15 % liegt. Die Nachweisgrenze für Uran bei den durchgeführten ICP-MS - Messungen liegt dagegen bei  $0,1 \mu\text{g/l}$ , d. h. die Werte der Grundwässer aus den Messstellen B1 - B3 liegen nahe der Nachweisgrenze. In diesem Bereich ist der relative Fehler der Messungen sehr hoch. Für die Bestimmung der in-situ - Kd-Werte (Kap. 3.6) werden deshalb die radiometrisch bestimmten Urankonzentrationen eingesetzt.

Die Aktivitätsverhältnisse der Isotope der Uranzerfallsreihe sind in Abb. 3.4.6 dargestellt. Die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - Aktivitätsverhältnisse in den Wässern der Bohrungen B2 und B3 liegen im Rahmen der Fehlergrenzen bei eins. Das deutet darauf hin, dass chemische und Transportprozesse verhältnismäßig schnell sind, so dass ein Einfluss des  $\alpha$ -Rückstosseffekts auf die Isotopenverteilung im Grundwasser nicht festzustellen ist. Da die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - Aktivitätsverhältnisse auch in den Sedimenten nahe bei eins liegen spricht dies für ein reversiblen Austausch zwischen mobilem und immobilem Uran. Der niedrige  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätswert kann erst bei einer höheren Anzahl von Proben und einer Ausweitung des Probenahmegebietes, die im Nachfolgeprojekt geplant ist, geklärt werden. Die niedrigen  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ - Aktivitätsverhältnisse sind

wahrscheinlich, wie auch am Standort Ruprechtov, auf die geringe Löslichkeit des Thoriums zurückzuführen.



**Abb. 3.4.6:** Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe in verschiedenen Wasserproben

### 3.5 Geochemische Modellrechnungen

Die Grundwasserzusammensetzung in den Bohrungen B1 - B4 ist bereits in Kapitel 3.4 beschrieben worden. Da im Rahmen dieses Projekts überhaupt erst wenige Grundwassermessungen und noch keine Mineralbestimmungen durchgeführt worden sind, wird an dieser Stelle nur auf die Uran-Speziation eingegangen. Erste Modellrechnungen wurden mit dem Rechenprogramm PHREEQC und der Datenbasis Wateq 4.0 durchgeführt. Die Uranylphosphatkomplexe  $\text{UO}_2(\text{HPO}_4)_2^{2-}$  und  $\text{UO}_2\text{HPO}_4$  wurden nicht berücksichtigt (vgl. Diskussion in Kapitel 2.6).

Unter den gegebenen geochemischen Bedingungen liegt das Uran sechswertig vor. Die Eh-Werte schwanken bei verschiedenen Messungen in einer Bohrung z. T. über mehr als 100 mV. Die Werte aller vier Bohrungen variieren über einen Bereich von 300 - 550 mV, wobei der Wert in Bohrung B4 vergleichsweise niedrig liegt. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, sind Redoxmessungen grundsätzlich sehr störungsanfällig, so dass die gemessenen Eh-Werte aufgrund der für derartige Messungen eingeschränkten Probennahmemöglichkeiten in ihrem absoluten Wert fehlerhaft sein und deshalb nur semiquantitativ als Anhalt dienen können. Für das Nachfolgeprojekt steht eine Eh-Sonde für In-situ-Messungen zur Verfügung. Die pH-Werte der Bohrungen B1 - B3 sind sehr ähnlich und variieren über einen Bereich von 4,7 - 5,4. Der Wert von Bohrung 4 fällt mit pH 9,87 aus dem Rahmen und wird hier nicht berücksichtigt, da eine Reproduktion der Messung zu einem anderen Zeitpunkt aufgrund der Zerstörung dieser Messstelle nicht mehr möglich war (im Rahmen des Nachfolge-Projektes ist die Errichtung einer „Ersatz-Messstelle“ vorgesehen).

Die Speziationsrechnungen wurden für einen pH-Bereich von 4,5 - 6 durchgeführt. Zusätzlich wurden die Phosphat- und TIC-Konzentrationen (im Bereich von 0,01 - 0,2 mg P/l, bzw. von 0,1 - 2,5 mg C/l variiert. Als Referenz wurde die in Tab. 3.5.1 angegebene Grundwasserzusammensetzung angenommen.

**Tab. 3.5.1:** Grundwasserzusammensetzung für Speziationsrechnungen [mg/l]

Al	0,45	K	13,2	P	0,075
B	7,25	Li	0,3	S	27,3
Ba	1,0	Mg	10,9	U	0,00023
Ca	50,0	Mn	0,5	pH	4,95
Cl	75,0	Na	15,0	Eh	400 mV
Fe	0,9	Ni	0,2	Temp.	7°C
TIC	0,5	NO <sub>3</sub>	24,3		

Die Ergebnisse von einzelnen Parametervariationen sind in Tab. 3.5.2 dargestellt und zeigen, dass die mobile Uranphase im wesentlichen durch das frei  $\text{UO}_2^{2+}$  - Kation und den Komplex  $\text{UO}_2\text{HPO}_4$  bestimmt wird, wobei der Phosphato-Komplex insbesondere bei höheren pH-Werten wichtig wird. Bei den relativ niedrigen pH-Werten spielen die Carbonatkomplexe nur eine untergeordnete Rolle. Bei diesen Berechnungen wurde die Komplexierung mit organischer Verbindungen nicht berücksichtigt. Die gemessenen TOC-Konzentrationen liegen bei 2-3 mg/l im Bohrung NA4 wurde sogar ein Wert von 19,9 mg/l gemessen. Allerdings wurden die organischen Bestandteile bisher nicht charakterisiert. Aufgrund der hohen Anteile an Ligniten in den Sedimenten sind jedoch Huminkolloide im Grundwasser zu erwarten.

**Tab. 3.5.2:** Anteile der mobilen Uranspezies [%] für verschiedene Parameter-variationen

	$\text{UO}_2^{2+}$	$\text{UO}_2\text{OH}^+$	$\text{UO}_2\text{SO}_4$	$\text{UO}_2\text{PO}_4^-$	$\text{UO}_2\text{CO}_3$
Referenz	78,7	10,5	8,8	0,9	0,7
pH: 4,5	85,7	4,1	9,6	0,1	0,1
pH: 6	21,0	31,6	2,4	27,3	16,6
TIC: 2,5 mg/l	76,5	10,3	8,6	0,9	3,2
TIC: 0,1 mg/l	79,2	10,6	8,9	0,9	0,1
$\text{PO}_4^{3-}$ : 0,02 mg/l	79,5	10,7	8,9	0,1	0,6
$\text{PO}_4^{3-}$ : 0,6 mg/l	76,9	10,5	8,7	2,4	0,6

Die Rechnungen mit unterschiedlichen Urankonzentrationen zeigen, dass selbst bei den höchsten gemessenen Urankonzentration im Grundwasser von 4  $\mu\text{g/l}$  keine Sättigung von U(VI)-Mineralen zu erwarten ist. Ebenso führt auch eine Variation des Eh-Werts bis herab zu 100 mV nicht zu einer Uran-Mineralsättigung. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Uran-Rückhaltung hauptsächlich durch Sorption erfolgt.

Als Basis für die Durchführung detaillierterer Modellrechnungen sollen im Rahmen des Nachfolgeprojekts durch Anwendung von sequentieller Extraktion und oberflächen-sensitiver Methoden, wie Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM) oder Extended X-Ray Absorption Fine Structure Spectroscopy (EXAFS) die immobilen Uranphasen identifiziert werden. Hier soll insbesondere überprüft werden, welchen Einfluß Eisenoxidminerale haben. Aus der Literatur ist bekannt, dass sechswertiges Uran in vielen natürlichen Systemen bevorzugt an Eisenoxiden gebunden wird (z. B. /MAN 92/, /PAY 01/, /DAV 01/).

## **3.6 Interpretation**

### **3.6.1 Einleitung**

Das wesentliche Ziel der Arbeiten am Standort Heselbach ist es gewesen, eine aus der Literatur bekannte Urananreicherung am Ostrand des Wackersdorfer Braunkohlentertiärs zu identifizieren und die bislang nur angenommene Eignung der Lokation als Natürliches Analogon zu überprüfen. Mit Hilfe von insgesamt vier Explorationsbohrungen entlang einer den Rand des Braunkohlentertiärs erfassenden Profillinie und entsprechenden Sediment- und Grundwasseranalysen konnte diese Aufgabe insgesamt positiv abgeschlossen werden. Die Bearbeitungstiefe ist mit den detaillierten Untersuchungen am Standort Ruprechtov nicht zu vergleichen.

### **3.6.2 Integration und Interpretation aller Ergebnisse**

Die am Standort Heselbach bislang erzielten Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- In allen vier Bohrungen konnte in zwei unterschiedlichen Horizonten, dem Braunkohleflöz sowie dem unterlagernden Ton ein erhöhter Urangehalt nachgewiesen werden.
- Die radiometrischen Messungen geben einen starken Hinweis auf Urananreicherungsprozesse, die auch noch in jüngster Vergangenheit stattgefunden haben.
- Das Auftreten relativ saurer Grundwässer ist wahrscheinlich durch die randlich noch anstehende Braunkohle bzw. den Braunkohleabbau verursacht.
- Geochemische Modellrechnungen lassen erwarten, dass Uran unter den bisher ermittelten Bedingungen vorwiegend als  $\text{UO}_2^{2+}$  in Lösung vorliegt. Zu geringen Anteilen spielen die Komplexe  $\text{UO}_2\text{OH}^+$  und  $\text{UO}_2\text{SO}_4$  eine Rolle. Bei einem geringen Anstieg des pH-Werts gewinnen auch die Komplexe  $\text{UO}_2\text{HPO}_4^-$  und  $\text{UO}_2\text{CO}_3$  an Bedeutung. Zu bemerken ist, dass der DOC-Gehalt der Wässer bei 2-3 mg C/l liegt, in B4 wurde sogar ein Wert von 19,9 mg C/l gemessen. Da die

organischen Inhaltsstoffe bisher aber noch nicht charakterisiert wurden, konnten sie bei der Uranspeziation noch nicht berücksichtigt werden.

- Die Abnahme sowohl der Grundwasser- als auch der Sedimentkonzentration in Abhängigkeit des Transportwegs im oberen, braunkohlehaltigen Horizont, deutet auf reversible Sorptionsprozesse hin.

Unter der Annahme, dass die Uranrückhaltung durch Sorptionsprozesse bestimmt ist, können aus den in Kapitel 3.3. dargestellten Urangehalten der Sedimente und den in Kapitel 3.4 aufgeführten Grundwasserkonzentrationen Verteilungskoeffizienten für Sedimente aus beiden Horizonten der Bohrungen B1 - B4 bestimmt werden. Für die Berechnung wurden die mittels -Radiometrie bestimmten Konzentrationen verwendet.

**Tab. 3.6.1:** In-situ-Verteilungskoeffizienten \*) Für B4 wurde die GW-Konzentration aus der ICP-Messung verwendet, da keine radiometrische Messung vorlag

	Verteilungskoeffizienten [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]	
	Horizont 1	Horizont 2
B4 *)	522	112
B1	639	165
B2	315	446
B3	302	789

Die so berechneten Verteilungskoeffizienten sind in Tab. 3.6.1 dargestellt. Die Werte liegen um 2 - 3 Größenordnungen höher als Werte, die für die Sorption von Uran an Tonmineralen oder Eisenoxiden gemessen wurden /DAV 01/. Generell geben so bestimmte Verteilungskoeffizienten nur obere Grenzen an, da nicht berücksichtigt wurde, dass ein Teil des immobilen Urans auch in ausgefällter Form, bzw. irreversibel gebunden vorliegen kann. Vergleichbar hohe Werte wurden beispielsweise auch an natürlichen Sedimentproben am Standort Alligator River gemessen /WAI 92/. Wurden die Werte aber auf die mittels sequentieller Extraktion ermittelten reversibel sorbierten Fraktion bezogen, so lagen sie signifikant niedriger bei 1 - 10  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Da in Heselbach bisher ausschließlich Gesamtkonzentrationen von Uran in den Sedimenten ermittelt wurden, und noch nicht untersucht wurde in welcher Form das immobile Uran vorliegt, kann hierzu noch keine Aussage getroffen werden. Vordringlich ist daher die Analyse von Mineralphasen sowie die Anwendung experimenteller Methoden wie EXAFS-Spektroskopie oder sequentieller Extraktion. Speziell über die Sequentielle Extraktion besteht die Möglichkeit unterschiedlich gebundene Uranphasen zu unterscheiden. Aus

den Gesteinsanalysen geht hervor, dass in den Sedimenten signifikante Anteile Eisenminerale enthalten sind. Da kristalline und amorphe Eisenoxide in vielen natürlichen Systemen die Rückhaltung von Uran(VI) bestimmen (z. B. /MAN 92/, /PAY 01/) ist der Nachweis und die Quantifizierung von Eisenoxid-Mineralen ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Arbeiten.

Eine mögliche Erklärung für die abnehmende Grundwasserkonzentration entlang des Fließwegs könnte auch in der örtlichen Veränderung der geochemischen Verhältnisse liegen, die zu einer Absenkung der Uran-Löslichkeit führt. Allerdings sind die chemischen Grundwasserdaten der Messstellen B1, B2 und B3 sehr ähnlich. Außerdem deuten die ersten geochemischen Rechnungen darauf hin, dass reine Uranminerale unter den Bedingungen nicht gesättigt sind.

Zusätzlich ist zu bemerken, dass Uran in vielen natürlichen Systemen ein Sorptionsmaximum im pH-Bereich 6 - 8 hat und bei niedrigeren pH-Werten weniger sorbiert. Dies wurde ebenso in Laborexperimenten von Uran(VI) an Kaolin und amorphen Eisenoxidhydrat nachvollzogen, z. B. /PAY 01/. Allerdings wurde in /PAY 96/, /PAY 01/ festgestellt, dass eine erhöhte Sorption von Uran bei pH-Werten im Bereich von 3-6 an amorphen Eisenoxidhydrat und Kaolin bei Vorhandensein von Huminsäuren auftritt. Ebenso wird die Uransorption bei Phosphatkonzentrationen von  $10^{-4}$  mol/l im gleichen pH-Bereich signifikant erhöht. Die Phosphatkonzentrationen in den Grundwässern am Standort Heselbach liegen maximal bei  $10^{-5}$  mol/l. Diese Einflüsse können zumindest relativ hohe Verteilungskoeffizienten bei pH-Werten im Bereich 5 - 5,5 erklären und müssen bei zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

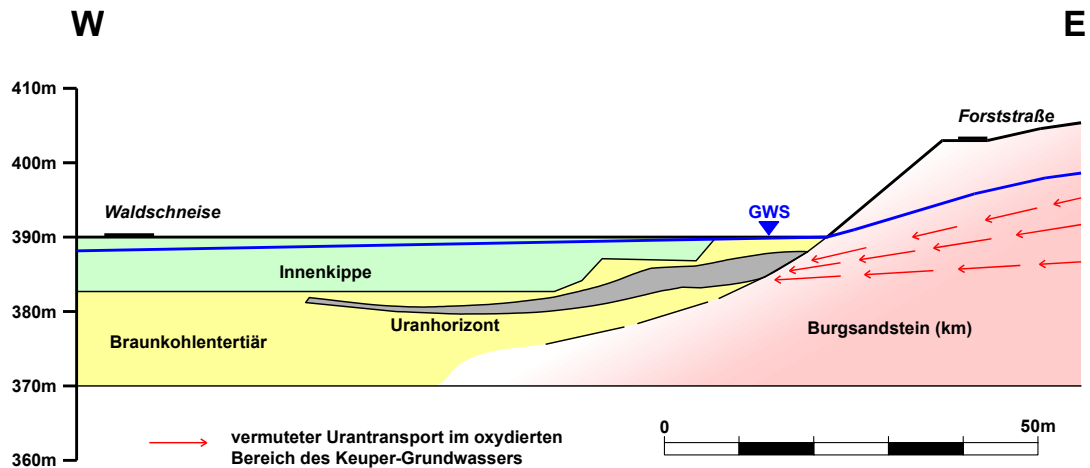
### **3.6.3 Konzeptionelles Modell für den Urantransport**

Auf Basis der bisherigen Informationen wurde ein erstes Arbeitsmodell für den Urantransport am Standort Heselbach entwickelt, das in Abb. 3.6.1 dargestellt ist. Aufgrund der geologischen und hydrologischen Gesamtsituation kann als Uranquelle nur der Burgsandstein des Keuper in Frage kommen.

Von dort wurde bzw. wird noch heute Uran in das tertiäre Becken transportiert. Eine Urananreicherung findet dann im Bereich braunkohlehaltiger Sedimente und Tone statt. Die Identifikation aller dafür verantwortlichen Prozesse bedarf noch detaillierter Mineralbestimmungen an Sedimentproben dieses Standortes. Die geochemischen



Bedingungen des Grundwassers, insbesondere die hohen gemessenen Eh-Werte deuten darauf hin, dass Uranminerale vermutlich keine wichtige Rolle spielen. Mit dem geplanten Einsatz einer in-situ Eh-Sonde sollen auch für das Projektgebiet Heselbach die Eh-Messungen optimiert werden. Darüber hinaus ist - kleinräumig gesehen - auch das Vorhandensein lokal reduzierender Milieus gegenwärtig nicht auszuschließen.



**Abb. 3.6.1:** Schematisches geologisch-hydrogeologisches Profil des Untersuchungsgebietes Heselbach mit modellhafter Darstellung des Urantransportes

Mögliche Rückhalteprozesse stellen Sorption an Eisenoxiden, organischen Substanzen oder Tonen, sowie auch Uran-Mitfällungsprozesse dar. Möglicherweise sind die geochemischen Standort - Bedingungen auch durch den Braunkohleabbau beeinflusst worden und haben bei Absenkung des Grundwasserspiegels zu einer Oxidation von sulfidischen Mineralen in tieferen Horizonten sowie nach dem - durch Einstellung des Braunkohleabbaus bedingten - Wiederanstieg des Grundwassers zur Absenkung der pH-Werte geführt. Ebenso ist ein Einfluss des Kippenmaterials auf den Grundwasserchemismus nicht auszuschließen, was im Rahmen weiterführender Untersuchungen zu überprüfen ist.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen eines vorlaufenden Auswahlverfahrens und mit Hilfe erster Aufschlussbohrungen sind insgesamt zwei Lokationen, die den Anforderungen entsprochen haben, als geeignete Standorte für weiterführende Natürliche - Analoga – Untersuchungen identifiziert worden: Ruprechtov in der Tschechischen Republik und Heselbach in der Oberpfalz. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens ist der Standort Ruprechtov anhand von zwei neuen Bohrungen einer detaillierten geologischen, mineralogischen, geochemischen und hydrochemischen Charakterisierung sowie einer grundlegenden Interpretation der Grundwasserfließ- und Transportverhältnisse unterzogen worden. In Heselbach lag der Schwerpunkt der Arbeiten darin, die Lage der Urananreicherung zu identifizieren und mittels Übersichts - Untersuchungen zu charakterisieren. Hierzu wurden vier Explorationsbohrungen durchgeführt und Bohrkernmaterial wie Grundwasser geochemisch analysiert.

Die schon zu Vorhabensbeginn gegenüber Heselbach höhere Informationsdichte am Standort Ruprechtov basiert ganz wesentlich auf den eigenständigen FuE-Arbeiten des tschechischen NRI und hat sich - auf Grundlage der Kooperation mit NRI sowie weiteren Forschungseinrichtungen - bis zum Ende des Berichtszeitraumes fortgesetzt. Zukünftig soll auch der Standort Heselbach mit zunehmender Intensität in das Gesamtvorhaben einbezogen werden.

### **4.1 Ruprechtov**

Am Standort Ruprechtov konnten zwei geringmächtige Grundwasserleiter, die durch geringdurchlässige Tonschichten voneinander getrennt sind, in einer Teufe von 20 m und 35 m nachgewiesen werden. Aus Pumpversuchen wurden hydraulische Konduktivitäten von  $1,8 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $1,5 \cdot 10^{-7}$  m/s für den unteren bzw. oberen Aquifer bestimmt. Aufgrund existierender hydrogeologischer Informationen zum Standort verläuft die zu erwartende Haupt-Grundwasserfließrichtung von Südwest nach Nordost. Als Infiltrationsgebiet wird der Bereich austretenden Granits südlich der bisherigen Bohrungen angenommen.

Signifikante Urananreicherungen wurden, wie aus den Explorationsbohrungen bekannt, in 34 - 38,4 m Teufe in direkter Umgebung des tieferen Aquifers ermittelt. An den Proben mit höchsten Urankonzentrationen (Braunkohlenhorizont) der Bohrung

NA5 wurden die Uran-Mineraler Ningyolit und Uraninit nachgewiesen. Die starke Heterogenität innerhalb von lithologischen Horizonten ist mitverantwortlich dafür, dass die Urangelhalte in Bohrung NA5 erheblich höher als in der nur wenige Meter entfernten Bohrung NA4 sind. Demgegenüber konnten in der Bohrung NA4 erstmals auch Urananreicherungen in den oberen Horizonten des unterlagernden Kaolins nachgewiesen werden.

Als dominierende Immobilisierungs-Prozesse des Urans werden derzeit die Reduktion und Ausfällung von Uran(IV)-Phasen und/oder die Sorption von Uran an Huminstoffen angesehen. Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion zeigen, dass der überwiegende Teil des Urans in Form vierwertiger Uranminerale vorliegt bzw. an organisches Material gebunden ist. Eine Unterscheidung zwischen beiden Phasen ist in dieser Projektphase allerdings noch nicht möglich gewesen. Da die Gehalte an organischem Kohlenstoff in der Umgebung des Aquifers zum Teil bei 50 % liegen, ist dessen Einfluss mit zu berücksichtigen. Das Auftreten von Siderit und Pyrit neben organischem Kohlenstoff in der Umgebung des tieferen Aquifers (ca. 35 m Tiefe) bestätigt, dass dort stark reduzierende Bedingungen vorliegen. Die in den Anreicherungshorizonten erfassten Grundwässer weisen dementsprechend insgesamt sehr geringe Uran-Konzentrationen von  $<10^{-9}$  mol/l auf.

Aus den begleitenden geochemischen Modellrechnungen wird deutlich, dass unter den gegebenen geochemischen Bedingungen vierwertiges Uran thermodynamisch stabil ist. Die gemessenen, gelösten Uran-Konzentrationen können über ein thermodynamisches Gleichgewicht mit Uraninit - bei hohen Phosphatkonzentrationen auch mit Ningyolit - erklärt werden. Zur Absicherung dieser Aussagen dient eine Optimierung der Messung von Eh-Werten. Dazu soll von der bisherigen on-site-Messung in einer gegenüber der Atmosphäre isolierten Durchflussskammer auf eine in-situ - Messung mittels Bohrloch - Eh-Sonde übergegangen werden.

Die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse der meisten Sedimentproben sind kleiner eins. Gleichzeitig ist das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitäts-Verhältnis in Grund- und Porenwässern mit Werten zwischen 2,5 und 4 relativ hoch. Solche Werte sind typisch für die Hauptanreicherungsgebiete in so genannten Roll-Front-Ablagerungen. Derartige Uran-Lagerstätten entstehen entlang des Transportwegs von Uran in eng begrenzten Aquiferen. Dabei wird Uran(VI) in oxidierenden Wässern antransportiert und in Bereichen mit hohen Anteilen an reduzierenden Substanzen, wie Pyrit oder Lignit reduziert. Dabei kommt es zur Ausfällung vierwertiger Uranminerale. Diese Redoxfront

wandert mit Geschwindigkeiten von Zentimetern bis wenigen Metern pro 100.000 Jahre in Grundwassertransportrichtung. Die Voraussetzungen für eine solche Uranablagerung sind am Standort Ruprechtov gegeben. Deshalb basiert das bisherige konzeptuelle Modell auf einer Uranmobilisierung im Bereich der austretenden Granite unter oxidierenden Bedingungen und einem Transport entlang des Aquifers bis in die Bereiche, in denen reduzierende Bedingungen vorherrschen. Dort wird Uran entweder durch Ausfällung von Uran(IV)-Mineralen oder durch Sorption an organischen Substanzen, bzw. Tonen zurückgehalten. Zur Überprüfung des Modells sind Untersuchungen der geochemischen Bedingungen im Grundwasser aufstrom wie auch abstrom von entscheidender Bedeutung.

Der Schwerpunkt der Arbeiten des vorliegenden Vorhabens lag in der Detailuntersuchung weniger punktuell angesetzter Bohrungen. Insgesamt wurde der Standort bisher nur in einem eng begrenzten Areal von ca. 200 m<sup>2</sup> anhand von drei Explorationsbohrungen und zwei weiteren Bohrungen für Detailuntersuchungen über einen Teufenbereich von etwa 40 m charakterisiert. Deshalb ist es ein wesentliches Ziel des nachfolgenden Vorhabens, die Struktur und die geochemischen Verhältnisse des Standortes großräumig zu erfassen. Die zukünftigen Arbeiten lassen sich im wesentlichen zwei Themengebieten zuordnen, die beide in einem inhaltlichen Zusammenhang stehen:

- a) Uranspeziation, -mobilisierung, -retardation
- b) Grundwasserchemie und -hydraulik

Zu a): Um quantitative Aussagen zur Rückhaltung des Urans ableiten zu können, müssen insbesondere die Uranphasen genauer bestimmt und quantifiziert werden. Daraus ergeben sich die nachfolgend dargestellten Arbeiten.

- Bisher konnten nur an Proben mit den höchsten Urananreicherungen Uran-Mineralphasen nachgewiesen werden. Die Anwendung von oberflächen-spezifischen Methoden mit höherer Nachweisempfindlichkeit wie z. B. Transmissionselektronen-Spektroskopie (TEM) mit EDX soll zum Uran-Mineralnachweis an möglichst vielen Proben führen. Zudem können durch Anwendung von EXAFS - Spektroskopie (Extended X-ray Absorption Fine Structure) auch sorbierte Uran-Phasen detektiert werden. Ganz wesentlich zum Verständnis abgelaufener bzw. ablaufender Prozesse ist auch der Nachweis der Oxidationsstufe des Urans. Dies ist ebenfalls mittels EXAFS - Spektroskopie möglich.

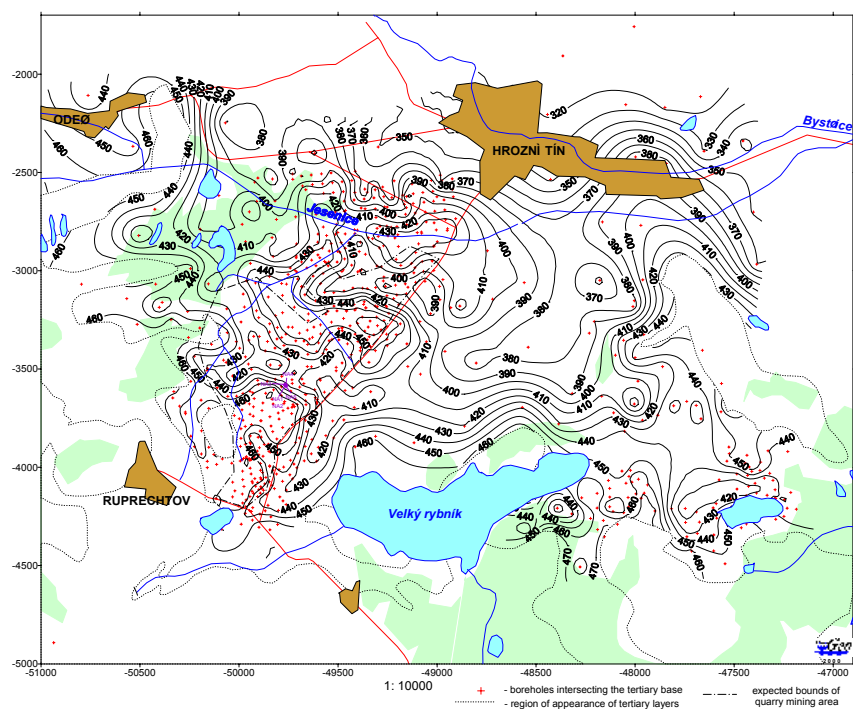
- Begleitend dazu soll die Methode der sequentiellen Extraktion auf die Zusammensetzung der Sedimente in Ruprechtov optimiert werden. Ein wesentlicher Aspekt ist die Unterscheidung zwischen Uraninit und in organischer Materie gebundenem Uran, die bisher in einer Phase gemeinsam extrahiert werden. Hier soll ein zusätzlicher Auftrennungsschritt durch Sedimentation eingefügt werden.
- Aufgrund des hohen Gehalts an organischem Material können Kolloide und Bakterien großen Einfluss auf den Transport haben. Bisher sind nur geringe Kolloidkonzentrationen und auch nur die Existenz von sulfatreduzierenden Bakterien nachgewiesen worden. Weitere detaillierte Laboruntersuchungen zu deren Einfluss auf die Uran-, Thorium- und Radium-Migration sind notwendig.

Zu b): Zur Absicherung bzw. Weiterentwicklung des bisherigen konzeptuellen Modells und um eine Beschreibung des Uran-, Thorium- und Radium-Transports mit Transportmodellen zu ermöglichen, sind insbesondere die nachfolgenden Untersuchungen erforderlich.

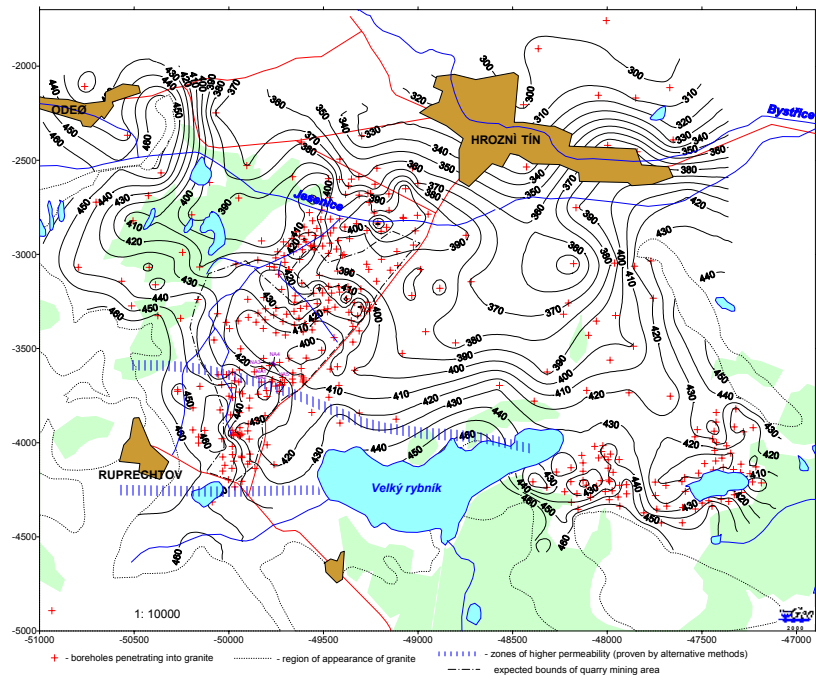
- Rolle von Kolloiden: die gemessenen Kolloidkonzentrationen sind trotz der in unmittelbarer Umgebung auftretenden Lignithorizonte mit 10-90 ppb verhältnismäßig gering.
- Die räumliche Ausdehnung der Uranhorizonte, Grundwasserleiter und lithologischen Einheiten sowie Grundwasseralter und -fließrichtung müssen über ein größeres Areal erfasst werden. Auf dieser Basis kann dann ein Grundwassermodell erstellt werden.
- Der Übergang Granit - Kaolin - Tertiär ist bisher noch nicht untersucht und muss eingehend charakterisiert werden. Insbesondere müssen die geologisch-mineralogischen Prozesse, die zur Uran-Abreicherung im Granit und Anreicherung im Kaolin geführt haben, ermittelt werden. Es ist weiterhin zu klären, ob und inwieweit der Kaolin als sekundäre Uranquelle zum Uraneintrag in den Aquifer beiträgt oder Uran zurückhält. Ebenso ist zu prüfen, ob ein Eintrag direkt aus dem Granit erfolgen kann. Dies ist Voraussetzung für die Formulierung eines Quellterms.

Zu diesen beiden Punkten tragen auch die im Rahmen der Kaolinexploration ermittelten Ergebnisse und Informationen bei. Die zu Vorhabensende verfügbaren

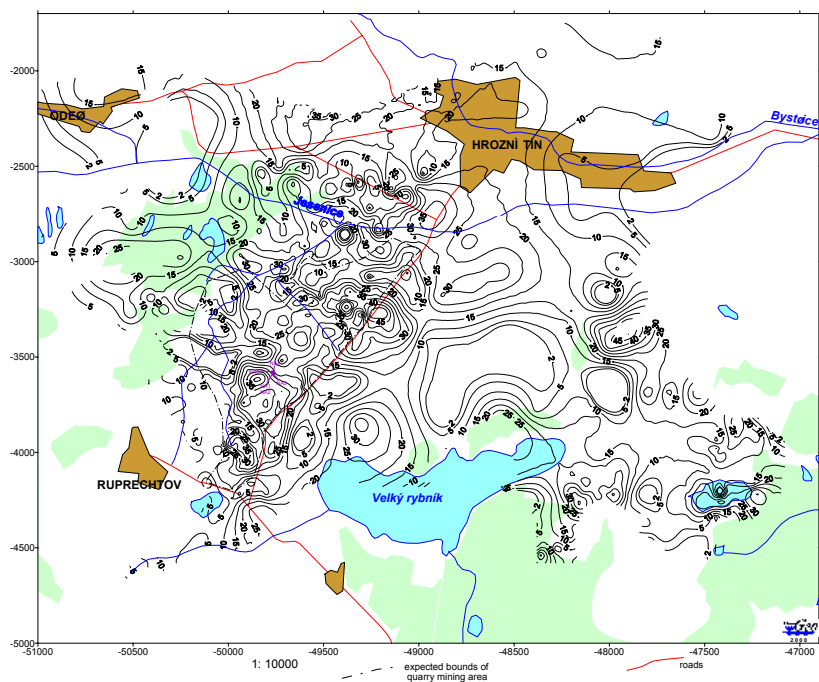
Höhenpläne zur Lage der Tertiär-Basis (Abb. 4.1.1), der Granit-Oberfläche (Abb. 4.1.2) und die daraus abgeleitete Karte der Kaolinmächtigkeit (Abb. 4.1.3) im Untersuchungsgebiet erlauben es jetzt, die bisherigen Modellvorstellungen bezüglich der Lagerungsverhältnisse zu differenzieren. Eine Umsetzung dieser Kartengrundlagen in geologische SW - NE bzw. SSW - NNE verlaufende Querprofile (Abb. 4.1.4, Abb. 4.1.5) verdeutlicht bereits, dass entgegen den bisherigen vereinfachten Annahmen der Untergrund, die Tertiär-Basis bzw. Granit-Oberfläche, stärker strukturiert ist. Dies kann sich unmittelbar auf Grundwasserfließrichtung und Geschwindigkeit auswirken. Beide Abbildungen geben auf Grundlage angedeuteter „Rinnenstrukturen“ Hinweise darauf, dass möglicherweise mit bevorzugten Fließwegen zu rechnen ist, die - lokal gesehen - stark von der Haupt-Grundwasserfließrichtung abweichen können. Darüber hinaus wird deutlich, dass das ausgeprägte Relief an der Tertiärbasis - besonders in der Umgebung der bisherigen Bohransatzpunkte - auf kleinräumigem Areal starke Veränderungen in der Sedimentausprägung verursachen kann. Möglicherweise ist dieser Sachverhalt auch mitverantwortlich für die in den Bohrungen NA4 und NA5 festgestellten Unterschiede in der Urananreicherung. Die durch die o. g. Karten verbesserte „Ausgangssituation“ ist bereits bei der Diskussion und Festlegung neuer Bohransatzpunkte berücksichtigt worden.



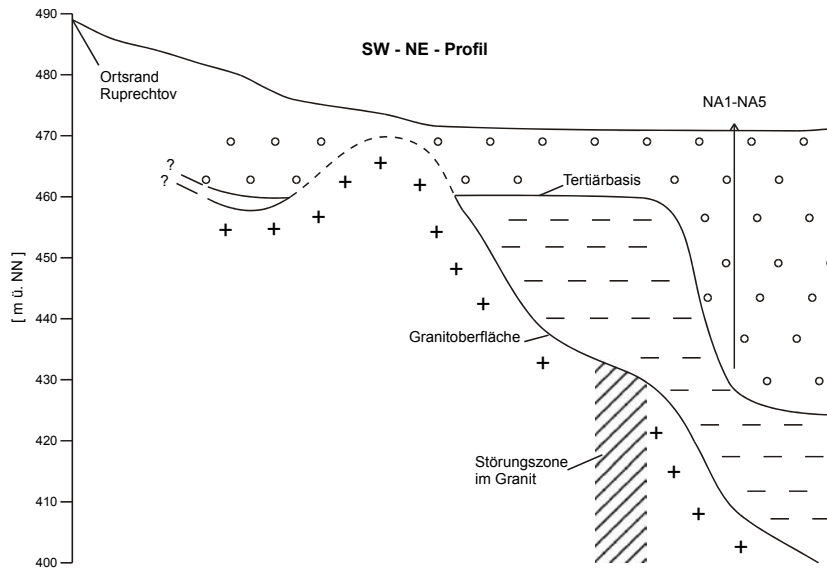
**Abb. 4.1.1:** Basis der Tertiär-Schichten im Projektgebiet Ruprechtov (nach Unterlagen der Kaolin-Industrie)



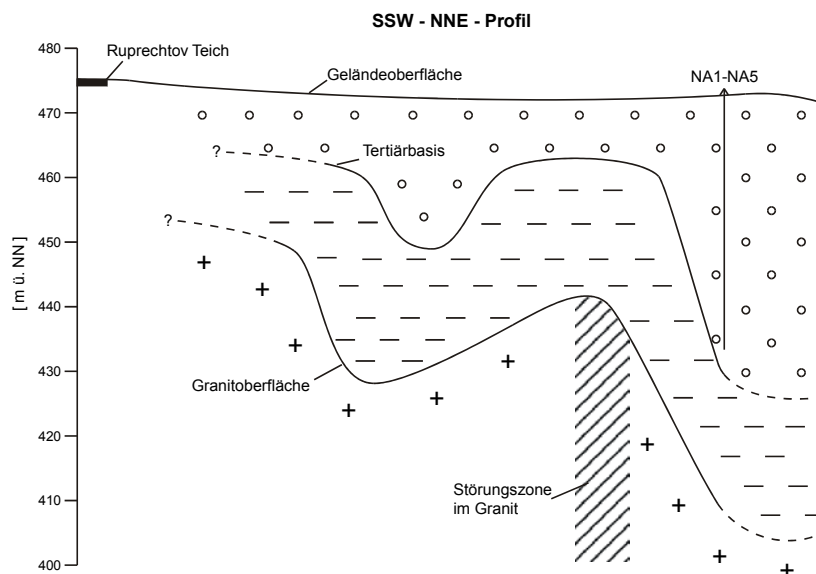
**Abb. 4.1.2:** Lage der Granitoberfläche im Projektgebiet Ruprechtov (nach Unterlagen der Kaolin-Industrie)



**Abb. 4.1.3:** Mächtigkeitkarte des Kaolinhorizontes im Projektgebiet Ruprechtov (nach Unterlagen der Kaolin-Industrie)



**Abb. 4.1.4:** Aus den Tiefenlinienplänen (Abb. 4.1.1 und Abb. 4.1.2) rekonstruiertes Profil entlang der angenommenen U-Transportrichtung - Variante A



**Abb. 4.1.5:** Aus den Tiefenlinienplänen (Abb. 4.1.1 und Abb. 4.1.2) rekonstruiertes Profil entlang der angenommenen U-Transportrichtung - Variante B



## 4.2 Heselbach

Die bisherigen Untersuchungen am Standort Heselbach ergeben folgendes Bild: in zwei Horizonten, a) dem oberen Lignit-haltigen und b) in darunterliegenden Tonen konnten Urananreicherungen von bis zu 640 ppm nachgewiesen werden. Die Aktivitätsverhältnisse im Braunkohlehorizont deuten klar auf einen Urananreicherungsprozess hin. Urankonzentrationen im Grundwasser liegen im Bereich von  $3 \cdot 10^{-9}$  mol/l. Die abnehmenden Uran-Konzentrationen sowohl im Sediment als auch im Wasser entlang des Fließwegs deuten eine Rückhaltung durch Sorption hin. Ebenso ergeben erste geochemische Modellrechnungen, dass unter den vorliegenden geochemischen Bedingungen die Uranminerale weit von der Sättigung entfernt sind. in-situ - Verteilungskoeffizienten, die aus dem Verhältnis der immobilen zur mobilen Urankonzentration ermittelt wurden, liegen allerdings oberhalb von  $100 \text{ m}^3/\text{kg}$  und sind damit deutlich höher als typische Sorptionswerte von Uran an Tonmineralen oder Eisenoxiden. Auf diese Weise bestimmte Verteilungskoeffizienten stellen nur obere Grenzen dar, da nicht berücksichtigt wird, dass ein Teil des immobilen Urans auch in ausgefallter Form bzw. irreversibel gebunden vorliegen kann. Vergleichbar hohe Werte wurden beispielsweise auch an natürlichen Sedimentproben am Standort Alligator River gemessen. Dort wurde über sequentielle Extraktion ermittelt, dass nur ein geringer Teil des Urans reversibel sorbiert ist und die Verteilungskoeffizienten um Größenordnungen niedriger sind

Fraglich ist, wie stark die geochemischen Bedingungen am Standort Heselbach durch den Braunkohleabbau beeinflusst worden sind. Möglicherweise hat die Absenkung des Grundwasserspiegels zu einer Oxidation von sulfidischen Mineralen in tieferen Horizonten und nach dem durch Einstellung des Braunkohleabbaus bedingten Wiederanstieg des Grundwassers zur Absenkung der pH-Werte geführt. Ebenso ist ein Einfluss des Kippenmaterials auf den Grundwasserchemismus nicht auszuschließen. Hierzu soll im Nachfolgeprojekt auch ein Messpunkt in einem durch den Braunkohleabbau ungestörten Bereich einbezogen werden.

Als Uranquelle kommt nach heutigem Kenntnisstand nur der Burgsandstein des Keuper in Frage.

Um auch am Standort Heselbach die Migration der Uran-, Thorium und Radium-Isotope mit einem Transportcode beschreiben zu können, müssen insbesondere die folgenden Arbeiten ergänzt werden:

- Der Standort ist bisher im wesentlichen nur im Hinblick auf seine grundsätzliche Eignung als Natürliches Analogon hin untersucht worden. Deshalb ist auch im Raum Heselbach eine Erfassung der geologischen und hydraulischen Eigenschaften in einem größeren räumlichen Umfeld notwendig, um auf dieser Basis ein Grundwassermodell zu erstellen.
- Hinsichtlich der Uranquelle müssen die Übergänge Keuper - Tertiär - Quartär analysiert und auf dieser Basis ein Quellterm erstellt werden.

Weiterhin ist eine umfangreiche geochemische und radiometrische Charakterisierung von Sedimenten und Grundwasser, sowie eine genaue mineralogische Sediment-Untersuchung Voraussetzung für eine Identifikation und Charakterisierung der relevanten Prozesse, welche die Migrationseigenschaften der drei o. g. Elemente am Standort bestimmen. Diese Erfordernisse sind bereits bei der Konzeption neuer Bohransatzpunkte berücksichtigt worden.

Hinsichtlich des Nachweises der immobilen Uranphasen sollen die gleichen Methoden wie am Standort Ruprechtov angewendet werden. Dabei wird als sequentielles Extraktionsverfahren voraussichtlich das in Alligator River eingesetzte Verfahren gewählt, da in Heselbach eher oxidierende Verhältnisse herrschen und ein starker Einfluss von Eisenoxiden auf die Uranrückhaltung erwartet wird. Falls Sorption als wesentlicher Rückhalteprozess identifiziert wird, sollen vorhandene Oberflächenkomplexmodelle zur Beschreibung der Uranrückhaltung eingesetzt werden.



## 5 Literatur

- /ADL 91/ Adloff, J.P.; Roessler, K.: Recoil and Transmutation Effects in the Migration Behaviour of Actinides.- *Radiochim. Acta* **52/53**, 269-274 (1991).
- /AME 83/ Ames, L.L.; McGarrah, J.E.; Walker, B.A.: Sorption of trace constituents onto secondary minerals, II. Radium.- *Clays Clay Miner.* **31**, 335-341 (1983).
- /AND 93/ Andrews, J.N.: The isotopic composition of radiogenic helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers.- *Chem. Geol.* **49**; 339-351 (1985).
- /BAL 91/ Ball, J.W.; Nordstrom, D.K.: Users manual for Wateq4f with revised thermodynamic database and test cases for calculation of major, trace and redox elements in natural waters.- US Geological Survey Open file report 91-183. Menlo Park, California (1991).
- /BAR 86/ Barthel, F.; Dahlkamp, F.J.; Fuchs, H.; Gatzweiler, R.: Kernenergieerohstoffe.- In: F.Bender (ed.), *Angewandte Geowissenschaften, Bd. IV*, F. Enke Verlag (1986).
- /BÖH 00/ Böhnke, O.: Petrographie und hydrogeologische Eigenschaften von Ruprechtov / Tschechien.- Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften der TU Braunschweig, Braunschweig (2000).
- /BRA 98/ Brassler, Th.; Brewitz, W.; Gies, H.; Noseck, U.; Pohl, W.; Schönwiese, D.: Untersuchung der Uran- / Thorium- Mobilisation als natürliches Analogon für den Radionuklidtransport im Deckgebirge eines Endlagers für radioaktive Abfälle.- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2652, Braunschweig (1998).
- /BRE 91/ Breiter, K., Knotek, M.; Pokorný, L.: The Nejdek Granite Massif.- *Folia Musei Rerum Naturalium Bohemia Occidentalis* **33**, 1-32 (1991).

- /BRE 95/ Breiter, K.: Petrology and geochemistry of granites as precursors of dominant ore depositions in the Krušné hory–Erzgebirge region.- In: Breiter, K.; Seltmann, R. (eds): Ore Mineralizations of the Krušné Hory Mts. (Erzgebirge). Third Biennial SGA Meeting Mineral Deposits: From Their Origin to Environmental Impacts. Prague, August 28-31, 1995. Excursion Guide. GÚ, Praha, 19-40 (1995).
- /BUC 00/ Buckau, G.; Artinger, R.; Geyer, S.; Wolf, M.; Fritz, P.; Kim, J.I.: Groundwater in-situ generation of aquatic humic and fulvic acids and the mineralisation of sedimentary organic carbon.- Appl. Geochem. **15**, 819-832 (2000).
- /CAD 84/ cadková, Z. et al.: Katalog geochemických dat základní regionální sít .- MS ÚÚG Praha (1984).
- /CAS 98/ Casas, I.; De Pablo, J.; Gimenez, J.; Torrero, M.E.; Bruno, J.; Cera, E.; Finch, R.J.; Ewing, R.C.: The role of pE, pH and carbonate on the solubility of UO<sub>2</sub> and uraninite under nominally reducing conditions.- Geochim. Cosmochim. Acta **62**, 2223-2231 (1998).
- /COX 79/ Cox, K.G., Bell, J.D.; Pankhurst, R.J.: The Interpretation of Igneous Rocks.- George Allen & Unwin (1979).
- /CRA 94/ Cramer, J; Smellie, J. (eds): Final report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study.- SKB Technical Report 94-04, (1994).
- /DAH 93/ Dahlkamp, F.J.; Uranium ore deposits.- Springer Verlag (1993).
- /DAV 01/ Davis, J.A.: Surface Complexation Modeling of Uranium (VI) Adsorption on Natural Mineral Assemblages.- NUREG/CR-6708, US-NRC, (2001).
- /DEL 99/ Del Nero, M.; Salah, S.; Miura, T.; Clément, A.; Gauthier-Lafaye, F.: Sorption/Desorption Processes of Uranium in Clayey Samples of the Bangombè Natural Reactor Zone, Gabon.- Radiochim. Acta **87**, 135-150 (1999).

- /DRE 88/ Drever, J.I.: The geochemistry of natural waters (second edition).- Prentice-Hall, New Jersey (1988).
- /DUE 92/ Duerden, P.; Lever, D.A.; Sverjensky, D.A.; Townley, L.R.: Alligator Rivers Analogue Project.- Final Report. Volume 1 (1992).
- /EIG 84/ Eigler, G.: Braunkohle in Ostbayern.- Begleitschrift zur Sonderausstellung 1984 des Stadtmuseums Nittenau, Nittenau-Bodenstein (1984).
- /FIA 68/ Fiala, F.: Granitoids of the Slavkovský (Císařský) les Mts.- Sbor. geol. V d, Geol. **14**, 93-159 (1968).
- /FÖR 95/ Förster, H.-J.: Types of uranium and fluorite-barite deposits.- In: Breiter, K.; Seltmann, R. (eds): Ore Mineralizations of the Krušné Hory Mts. (Erzgebirge).- Third Biennial SGA Meeting Mineral Deposits: From Their Origin to Environmental Impacts. Prague, August 28-31, 1995. Excursion Guide. GÚ, Praha, 41-46 (1995).
- /GAU 00/ Gauthier-Lafaye, F.; Ledoux, E.; Smellie, J.; Louvat, D.; Michaud, V.; Perez del Villar, L.; Oversby, V.; Bruno, J.: OKLO-natural analogue Phase II: Behavior of nuclear reaction products in a natural environment.- EUR 19139 EN, Luxemburg (2000).
- /GEL 84/ Gellermann, R.; Fröhlich, K.: Nutzung der Uranisotope  $^{234}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in der Hydrologie und Hydrogeologie.- Freib. Forschungshefte **C-397**, Dt. Verlag für Grundstoffindustrie (1984).
- /GEL 94/ Gellermann, R.; Molitor, N.; Ripper, P.; Nindel, K.; Mäller, B.; Heinecke, J.; Stolz, W.:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  im Grundwasser des Erzgebirgischen Beckens.- Beiträge zur Hydrogeologie **45**, 55-68 (1994).
- /GER 89/ Gerstenberger, H.: Autometasomatic Rb enrichments in highly evolved granites causing lowered Rb–Sr isochron intercepts.- Earth Planet. Sci. Lett., **93**, 65-75 (1989).

- /GRE 92a/ Grenthe, I.; Fuger, J.; Konings, R.; Lemire, R.J.; Muller, A.B.; Nguyen-Trung, C.; Wanner, H.: Chemical Thermodynamics of Uranium.- Nuclear Energy Agency/OECD. Elsevier Science Publ., Amsterdam (1992).
- /GRE 92b/ Grenthe, I.; Stumm, W.; Laaksuharju, M.; Nilsson, A.C.; Wikberg, P.: Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems.- Chem. Geol. **98**, 131-150 (1992).
- /GRE 95/ Grenthe, I.; Puigdomenech, I.; Sandino, M.C.A.; Rand, M.H.: Appdx. D. Chemical Thermodynamics of Americium.- Nuclear Energy Agency/OECD. Elsevier Science Publ., Amsterdam (1995).
- /HAV 90/ Havelka, J.; Rozložník, L.: Ložiska rud.- SNTL, Praha (1990).
- /HEN 92/ Henningsen, D.; Katzung, G.: Einführung in die Geologie Deutschlands.- 228 + XX S., F. Enke Verlag, Stuttgart (1992).
- /IVA 91/ Ivanovich, M.: Aspects of Uranium/Thorium Series Disequilibrium Applications to Radionuclide Migration Studies.- Radiochimica Acta **52/53** 257-268 (1991).
- /JAN 00/ Janoušek, V.: R - an alternative to spreadsheets and special software for geochemical calculations and plotting.- Geolines, **10**, 34-35 (2000).
- /KAM 82/ Kamineni, D.C.; Dugal, J.J.B.: A study of rock alteration in the Eye-Dahwa Lakes Pluton, Atikokan. Northwestern Ontario, Canada.- Chem Geol. **36**, 35-57 (1982).
- /LAN 78/ Langmuir, D.: Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits.- Geochim. Chosmochim. Acta **42**, 547-569 (1978).
- /LAN 97/ Langmuir, D.: Aqueous Environmental Geochemistry.- Prentice Hall, New Jersey (1997).

- /LAT 89/ Latham, A.G.; Schwarz, H.P.: Review of the modelling of radionuclide transport from U-series disequilibria and of its use in assessing the safe disposal of nuclear waste in crystalline rock.- *Appl. Geochem.* **4**, 527-537 (1989).
- /LAU 76/ Laube, G.C.: *Geologie der Böhmischen Erzgebirge I.*- Arch. der Naturwiss. Landesdurchforschung, Praha (1876).
- /MAC 91/ MacKenzie, A.B.; Scott, R.D.; Houston, C.M.; Hooker, P.J.: Natural Decay series radionuclide studies at the Needles Eye natural analogue site, 1986 - 1989.- BGS Technical report WE/90/4, Keyworth Nottingham (1990).
- /MAD 98/ Madsen, F.T.: Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal.- *Clay Minerals* **34**, 579-599 (1998).
- /MAN 92/ Manceau, A.; Charlet, L.; Boisset, M.C.; Didier, B.; Spandini, L.: Sorption and speciation of heavy metals on hydrous Fe and Mn oxides. From microscopic to macroscopic.- *Appl. Clay Sci.* **7**, 201-223 (1992).
- /MAR 00/ Marivout, J.; Van Keer, I.; Wemaere, I.; Hardy, L.; Pitsch, H.; Beaucaire, C.; Michelot, J.-L.; Marlin, C.; Philippot, A.C.; Hassanizadeh, M.; van Weert, F.: A palaeohydrogeological study of the MOL site (PHYMOL project).- EUR 19146 EN, Luxemburg (2000).
- /MAT 95/ Matolín, M.; Manová, M.: *Radiometrická mapa R.*- GÚ, Praha (1995).
- /MÖL 98/ Möller, P., Dulski, P., Gerstenberger, H., Morteani, G. & Fuganti, A.: Rare earth elements, yttrium and H, O, C, Sr, Nd and Pb isotope studies in mineral waters and corresponding rocks from NW Bohemia, Czech Republic.- *Applied geochemistry*, Vol.13, No. 8, pp. 975-994; Elsevier Science Ltd. (1998).
- /MUR 83/ Murawski, H.: *Geologisches Wörterbuch.*- 281 S., F. Enke Verlag, Stuttgart (1983).



- /NOS 00/ Noseck, U.; Brasser, T.; Woller, F.; Laciok, A.; Hercik, M.: Uranium migration in tertiary sediments - natural analogue study for repository systems at Ruprechtov Site.- in: "Proceedings of the International Conference on Radioactive Disposal, DISTEC 00", 4.-6. September 2000, Berlin (2000).
- /OSM 83/ Osmond, J.K.; Cowart, J.B.; Ivanovich, M.: Uranium Isotopic Disequilibrium in Ground Water as an Indicator of Anomalies.- *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **34**/1, 283-308 (1983).
- /PAR 88/ Parks, G.A.; Pohl, D.C.: Hydrothermal solubility of uraninite.- *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 863-875 (1988).
- /PAY 01/ Payne, T.E.: Uranium (VI) Interactions with Mineral Surfaces: Controlling Factors and Surface Complexation Modelling.- PHD Thesis, University of NSW (1999).
- /PAY 96/ Payne, T.E.; Davis, J.A.; Waite, T.D.: Uranium Adsorption on Ferrihydrite - Effects of Phosphate and Humic Acid.- *Radiochim. Acta* **74**, 239-243 (1996).
- /PER 90/ Percival, J.B., Torrance, J.K.; Bell, K.: On the development of a sequential procedure with application to leachability problems.- In: Gadsby, J.W.; Malick, J.A.; Day, S.J. (eds.): *Acide mine drainage designing for closure*, BiTech Publishers Ltd., Vancouver, 51-62 (1990).
- /RAI 90/ Rai, D.; Felmy, A.R.; Ryan, J.L.: Uranium(IV) hydrolysis constants and solubility product of  $\text{UO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ .- *Inorg. Chemistry* **29**, 260-264 (1990).
- /REE 00/ Reeder, S. et al.: Extraction and Analysis of Clay Pore-Waters from Core Materials from the Ruprechtov Site.- BGS - Technical Report No. WI/00/8C, 21 p., Keyworth, Nottingham (2000).
- /RYA 83/ Ryan, J.L.; Ryan, D.: The solubility of Uranium(IV) hydrous oxide in sodium hydroxide solutions under reducing conditions.- *Polyhedron* **2**, 947-952 (1983).

- /SAY 77/ Sayles, F.L., Mangelsdorf, P.C.: The equilibration of clay minerals with seawater: exchange reactions.- *Geochim. Cosmochim. Acta* **41**, 951-960 (1977).
- /SCH 00/ Schönwiese, D.: Petrologie tertiärer Sedimente von Ruprechtov / Tschechien.- Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften der TU Braunschweig, Braunschweig (2000).
- /SEL 95/ Seltmann, R.; Štemprok, M.: Metallogenic overview of the Krušné hory Mts. (Erzgebirge) region.- In: Breiter, K.; Seltmann, R. (eds): *Ore Mineralizations of the Krušné Hory Mts. (Erzgebirge). Third Biennial SGA Meeting Mineral Deposits: From Their Origin to Environmental Impacts. Prague, August 28-31, 1995. Excursion Guide.* GÚ, Praha, 1-18 (1995).
- /SHR 95/ Shrbený, O.: Chemical Composition of Young Volcanites of the Czech Republic.- *Czech Geological Survey Special Paper 4.* GÚ, Praha, 1-52 (1995).
- /SME 96/ Smellie, J.A.T.; Karlsson, F.: A reappraisal of some Cigar Lake issues of importance to performance assessment.- *SKB Technical Report 96-08* (1996).
- /SME 98/ Smellie, J.A.T.: Maqarin natural analogue study. Volume I.- *SKB Technical Report 98-04* (1998).
- /STE 86/ Štemprok, M.: Petrology and geochemistry of the Czechoslovak part of the Krušné hory Mts. granite pluton.- *Sbor. geol. V d, ložisk. Geol. Mineral.* **27**, 111-156 (1986).
- /STU 95/ Stute, M., Forster, M.; Frischkorn, H.; Serejo, A.; Clark, J.F.; Schlosser, P.; Broecker, W.S.; Bonani G.: Cooling of tropical Brazil (50C) during the last glacial maximum.- *Science*, **269**, 379-383 (1995).
- /SVO 66/ Svoboda, j. et al.: *Regional Geology of Czechoslovakia, Part I: The Bohemian Massif.*- *Geol. Survey of Czechoslovakia, Prague* (1966).

- /ULR 99/ Ulrych, J. et al.: Cenozoic intraplate volcanic rock series of the Bohemian Massif: a review.- *Geolines* **9**, 123-135 (1999).
- /WAI 92/ Waite, T.D., Payne, T.E.; Davis, J.A.; Sekine, K.: Alligator Rivers Analogue Project. Final report – Volume 13. Uranium Sorption. 1992.
- /WHI 59/ White, W.A., Pichler, E.: Water sorption characteristics of clay minerals.- III. *State Geol. Surv., Circ.*, 266 (1959).
- /YAN 91/ Yanase, Y.; Nightingale, T.; Payne, T.; Duerden, P.: Uranium Distribution in Mineral Phases of Rock by sequential extraction procedure.- *Radiochim. Acta* **52/53**, 387-393 (1991).
- /ZIE 61/ Ziehr, H.: Uranhaltige Kohlen in Europa.- *Glückauf*, **97**, S. 1370-1383 (1961).

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Übersichtskarte der Uranvorkommen in Südost-Deutschland und dem westlichen Teil der Tschechischen Republik /BRA 98/ .....	2
Abb. 2.1.1:	Lage des Untersuchungsgebietes Ruprechtov.....	5
Abb. 2.1.2:	Blick von N → S auf das Projektgebiet mit den beiden Bohrungen NA4 (rechts) und NA5 (links).....	5
Abb. 2.1.3:	Topographische Übersichtskarte des Projektgebietes mit Lage der Bohrungen NA1 - NA5 (Maßstab ca. 1:25.000).....	6
Abb. 2.1.4:	Lage der Aufschlussbohrungen NA1 - NA5 im Koordinatensystem der amtlichen topographischen Karte .....	7
Abb. 2.1.5:	3D-Visualisierung der Morphologie am Standort Ruprechtov .....	7
Abb. 2.1.6:	Bohrarbeiten zur Bohrung NA4 .....	8
Abb. 2.1.7:	Ausbau der Bohrung NA4 zu einer Grundwassermessstelle .....	9
Abb. 2.1.8:	Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung in Bohrung NA4 .....	11
Abb. 2.1.9:	Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung in Bohrung NA5 .....	12
Abb. 2.1.10:	Gamma-Scan des Bohrkernabschnitts von 33,00 - 38,40 m der Bohrung NA4.....	14
Abb. 2.1.11:	Bedeutende Uran-Akkumulationen in den Bohrungen NA1 - NA5.....	14
Abb. 2.2.1:	Geologische Übersichtskarte des Ohre-Grabens und benachbarter Regionen .....	17
Abb. 2.2.2:	Die Entstehung des Erzgebirges und seines in der Tschechischen Republik gelegenen südlichen Vorlandes mit dem Ohre-Graben .....	18
Abb. 2.2.3:	Vereinfachte geologische Übersichtskarte des Sokolov-Beckens und seiner Teilbecken .....	21
Abb. 2.2.4:	Satellitenbildkarte des Sokolov-Beckens mit Lage des Projektgebietes	22
Abb. 2.2.5:	Geologische Detailkarte des Projektgebietes mit Lage der Bohrungen	23

Abb. 2.2.6:	Schematisches geologisches Querprofil durch den ehemaligen Uran- und Kaolinabbau Hajek .....	24
Abb. 2.2.7:	Tektonische Karte des Projektgebietes Ruprechtov.....	25
Abb. 2.2.8:	Photogeologische Linearanalyse des Projektgebietes Ruprechtov.....	25
Abb. 2.3.1:	Aufschluss von dickbankigem Granit des Karlovy Vary - Typs entlang der Eisenbahnlinie am Südufer des Velký rybník .....	26
Abb. 2.3.2:	Klassifizierung von granitischen Gesteinen im TAS- (Total Alkali – SiO <sub>2</sub> ) Diagramm .....	30
Abb. 2.3.3:	Binäres Diagramm Th vs. U [ppm] der drei magmatischen Gesteinsgruppen innerhalb des Untersuchungsgebietes .....	33
Abb. 2.3.4:	Korrelation der Hauptelemente der Gebirgsgranite (▲) und Erzgebirgsgranite (■) innerhalb des weiteren Projektgebietes .....	34
Abb. 2.3.5:	Korrelation ausgewählter Spurenelemente der Gebirgsgranite (▲) und Erzgebirgsgranite (■) innerhalb des weiteren Projektgebietes .....	35
Abb. 2.4.1:	Lithologische Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (gesamt) .....	37
Abb. 2.4.2:	Vergleichende Profildarstellung der Bohrungen NA4 (links) und NA5 (rechts) von 33,00 m u. GOK bis Endteufe.....	38
Abb. 2.4.3:	Vereinfachte geologische Profile der Bohrungen NA1 (links) und NA3 (rechts) .....	38
Abb. 2.4.4:	Rhythmische Bänderung und Blaufärbung des Bohrkerns NA4.....	41
Abb. 2.4.5:	Braunkohle aus der Bohrung NA4.....	42
Abb. 2.4.6:	Semiquantitative Auswertung von Tonmineralanalysen der Bohrung NA4 .....	46
Abb. 2.4.7:	Semiquantitativer Mineralbestand ausgewählter Sedimentproben der Bohrung NA5.....	46
Abb. 2.4.8:	Dünnschliff 1 (links): Glastuffit mit toniger Matrix; Dünnschliff 2 (rechts): Glas- bis Kristalltuffit mit toniger Matrix .....	51
Abb. 2.4.9:	Dünnschliff 3 (links): verzwillingter Feldspat in Tonmatrix und Glasfragmenten; Dünnschliff 4 (rechts): inkohlte Pflanzenreste und Dolomitkristalle in Tonmatrix .....	51

Abb. 2.4.10: Dünnschliff 6 (links): Siderit mit Limonit (rostfarben) und feinverteilten Quarzen; Dünnschliff 7 (links): Pigeonit zwischen überwiegend glasigen Komponenten.....	51
Abb. 2.4.11: Dünnschliff 8 (links): Biogene Fragmente in Tonmatrix mit Glasfragmenten; Dünnschliff 9 (rechts): Titanit in Glastuffit.....	52
Abb. 2.4.12: Dünnschliff 9 (Ausschnitte): Granate und Pyrit.....	52
Abb. 2.4.13: Dünnschliff 10 (links): Perthit in sphärolithischem Glastuffit; Dünnschliff 11 (rechts): Tonmatrix mit unreinen, eckigen Quarzen.....	52
Abb. 2.4.14: Ausschnittsphoto der Probe NA4-4: auffällig ist die türkise Färbung von Tonmineralen.....	54
Abb. 2.4.15: Mikroskopische Aufnahmen der Probe NA4-4 .....	54
Abb. 2.4.16: Röntgendiffraktogramme von Sedimentproben der Bohrungen NA4 und NA5 .....	55
Abb. 2.4.17: Reflexionsmikroskopische Aufnahmen der Probe NA4-4 mit Siderit-Knollen und Pyritsphäroiden in einer Matrix aus Tonmineralen und organischem Material .....	58
Abb. 2.4.18: Autoradiographie-Aufnahmen der Proben NA4-2 (oben) und NA4-6 (Mitte und unten) mit Verteilung der Spuren von Alpha-Strahlern.....	60
Abb. 2.4.19: Mikroskopische Aufnahmen von verwittertem vulkanoklastischem Material aus dem Bereich des NA5-U-Peaks mit Pyrit-Knollen (P) und Ningyoit-Mineralkörnern (N), Zippeit (Z) und autogenem Apatit (A) .....	61
Abb. 2.4.20: REM-Bild reflektierter Elektronen mit Uranoxid- (U) und Ningyoit- (N) Mineralen in einer Dünnschliffprobe aus dem Bereich mit höchstem Urangehalt der Bohrung NA5 .....	61
Abb. 2.4.21: Handstück der Probe NA5-1: der obere, dunkle Teil der Probe ist reich an organischem Material .....	62
Abb. 2.4.22: Wassergehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4.....	64
Abb. 2.4.23: Wasseraufnahmevermögen von Sedimentproben des Bohrkerns NA4 und zweier Bentonite .....	65
Abb. 2.4.24: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit einiger Proben des Bohrkerns NA4 .....	66
Abb. 2.4.25: Porenverteilung ausgewählter Proben des Bohrkerns NA5 .....	69

Abb. 2.4.26: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Al, Fe, Mn).....	71
Abb. 2.4.27: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Ca, Mg, U).....	72
Abb. 2.4.28: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (U, Ce, Co) .....	72
Abb. 2.4.29: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (U, Pr, Th).....	72
Abb. 2.4.30: Ausgewählte Element-Korrelationen im Teufenprofil der Bohrung NA4 (Zn, La, U) .....	73
Abb. 2.4.31: Korrelation der U- und Th-Gehalte in Sedimentproben der Bohrung NA4 .....	73
Abb. 2.4.32: Mittels ICP ermittelte U- und Th-Gehalte in den basalen Sedimenten der Bohrungen NA4 (links) und NA5 (rechts).....	75
Abb. 2.4.33: Bedeutende Uran-Akkumulationen in den Bohrungen NA1 - NA5.....	75
Abb. 2.4.34: TC-, TIC- und TOC- Gehalte in Sedimentproben der Bohrung NA4 .....	77
Abb. 2.4.35: Korrelation der Urangehalte mit organischem Kohlenstoff in Sedimentproben der Bohrung NA4 .....	78
Abb. 2.4.36: Ergebnisse der sequentiellen Uran-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA5 nach Methode A.....	79
Abb. 2.4.37: Ergebnisse der sequentiellen Thorium-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA5 nach Methode A.....	79
Abb. 2.4.38: Ergebnisse der sequentiellen Uran-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA4 nach Methode B.....	80
Abb. 2.4.39: Ergebnisse der sequentiellen Thorium-Extraktion ausgewählter Proben der Bohrung NA4 nach Methode B.....	80
Abb. 2.4.40: Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe für die Sedimentproben aus Bohrung NA4.....	82
Abb. 2.4.41: Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe: Übersicht über alle Bohrkerne .....	83

Abb. 2.4.42:	Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe: Übersicht über alle Bohrkerne unterschieden nach lithologischen Einheiten .....	84
Abb. 2.4.43:	Mittelwerte der Aktivitätsverhältnisse der Proben aus den einzelnen Bohrungen (links) und den verschiedenen lithologischen Einheiten (rechts) .....	84
Abb. 2.4.44:	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt B ausgewählter Kaolin-Proben.....	85
Abb. 2.4.45:	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt D ausgewählter Kaolin-Proben .....	85
Abb. 2.4.46:	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Verhältnisse in Filtraten aus Extraktionsschritt B aus Kaolinschicht und hangenden Sedimenten.....	86
Abb. 2.4.47:	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ -Aktivitätsverhältnisse für verschiedene Sedimentproben aus Bohrung NA4 .....	87
Abb. 2.5.1:	Grundwassermessstelle NA4 .....	88
Abb. 2.5.2:	Zeitliche Temperaturentwicklung im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 .....	90
Abb. 2.5.3:	Zeitliche Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 .....	91
Abb. 2.5.4:	Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 .....	91
Abb. 2.5.5:	Zeitliche Entwicklung des Redoxpotentials im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5.....	91
Abb. 2.5.6:	„On-site“ gemessene Fe-Gehalte im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 .....	92
Abb. 2.5.7:	„On-site“ gemessene S-Gehalte im Grundwasser der Messstellen NA4 und NA5 (Vergleich von $\text{S}(\text{SO}_4)$ und $\text{S}_2^-$ ).....	92
Abb. 2.5.8:	Zeitliche Entwicklung der Grundwassertemperatur während eines Pumptests .....	93
Abb. 2.5.9:	Zeitliche Entwicklung der Grundwasser-Leitfähigkeit während eines Pumptests .....	93
Abb. 2.5.10:	Zeitliche Entwicklung der Grundwasser - pH-Werte während eines Pumptests .....	93



Abb. 2.5.11: Zeitliche Entwicklung der Grundwasser-Redoxwerte während eines Pumptests .....	94
Abb. 2.5.12: Zeitliche Entwicklung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser während eines Pumptests .....	94
Abb. 2.5.13: Darstellung der NA4-Grundwasseranalysen in einem modifizierten Piper-Diagramm .....	95
Abb. 2.5.14: Darstellung der NA5-Grundwasseranalysen in einem modifizierten Piper-Diagramm .....	96
Abb. 2.5.15: Darstellung der Oberflächenwässer im Raum Ruprechtov in einem modifizierten Piper-Diagramm .....	96
Abb. 2.5.16: Typische Urangelhalte in Grund- und Oberflächenwasser.....	97
Abb. 2.5.17: Schemazeichnung der bei Porenwasserextraktion eingesetzten Druckzelle.....	106
Abb. 2.5.18: pH-Wert - Entwicklung im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	106
Abb. 2.5.19: Entwicklung der Uran-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	107
Abb. 2.6.1: Uran-Speziation in den Systemen U-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O (links) und U-O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O (rechts, PCO <sub>2</sub> = 10 <sup>-2</sup> bar) .....	109
Abb. 2.6.2: Gemessene Löslichkeiten für Uraninit.....	110
Abb. 2.6.3: Stabilitätsdiagramm log[Na <sup>+</sup> ]/[H <sup>+</sup> ] gegen log[H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> ] bei 25°C und 1 bar Druck.....	111
Abb. 2.6.4: Konzentration von vierwertigen und sechswertigen Uranspezies in Anhängigkeit des Eh-Wertes für Grundwasser NA4 .....	114
Abb. 2.7.1: Experimentell bestimmte R <sub>s</sub> - und R <sub>d</sub> -Werte in Abhängigkeit des pH-Wertes .....	120
Abb. 2.7.2: Berechnete Kationenaustauschkonstanten für Probe 1 (NA4-33) und Probe 2 (NA4-36) in Abhängigkeit des pH-Wertes.....	121
Abb. 2.7.3: R <sub>d</sub> -Werte in logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit des pH-Wertes .....	124

Abb. 2.8.1:	Modellierung des Grundwasserspiegels in den tertiären Sedimenten am Standort Ruprechtov.....	127
Abb. 2.8.2:	Modellierung des Grundwasserspiegels im Granit-Aquifer am Standort Ruprechtov.....	127
Abb. 2.8.3:	Probennahmestellen (Punkte) für flache Grund- und Oberflächenwässer in der Umgebung von Ruprechtov .....	130
Abb. 2.8.4:	Zusammensetzung an stabilen Isotopen verschiedener Wasserproben im Raum Ruprechtov .....	132
Abb. 2.9.1:	Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Roll Front.....	143
Abb. 2.9.2:	Relative Aktivitätsverteilung von <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U und <sup>230</sup> Th im Sediment einer Roll-Front-Anreicherung .....	145
Abb. 2.9.3:	Charakterisierung der Urananreicherung in einem Roll-Front-System anhand der Radionuklid-Aktivitätsverhältnisse.....	146
Abb. 2.9.4:	Konzentrationsverteilung und <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U-Aktivitätsverhältnis im Grundwasser entlang der Roll-Front-Anreicherung.....	147
Abb. 2.9.5:	Entwicklung der Uran-Konzentration und der Isotopenverhältnisse im Grundwasser in einem Roll-Front-System als Konzentrations-Aktivitätsdiagramm .....	147
Abb. 2.9.6:	Radionuklidverteilung in Sedimenten schneller und langsamer Systeme .....	148
Abb. 2.9.7:	Aktivitätsverhältnisse von gelöstem Uran in schnellen und langsamen Systemen .....	148
Abb. 2.9.8:	Auf Basis der bisherigen Ergebnisse entwickeltes Szenario der Uran-Mobilisierung und -Rückhaltung am Standort Ruprechtov .....	151
Abb. 2.9.9:	Typisches Szenario für die Radionuklidfreisetzung aus einem Endlager und den Transport durch das Deckgebirge.....	153
Abb. 3.1.1:	Übersichtskarte des Wackersdorfer Braunkohlenreviers mit den Lokationen festgestellter Urananreicherungen.....	155
Abb. 3.1.2:	Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1 : 25.000 (TK 6739 - NW-Blattrand) mit Lage des Projektgebietes .....	156
Abb. 3.1.3:	Blick von der B85 Richtung NNE auf die Bohrung B2.....	157

Abb. 3.1.4:	Bohrarbeiten am Standort Heselbach; hier: Bohrung B2 .....	158
Abb. 3.1.5:	Messung der Gamma-Strahlung an Sedimenten der Bohrungen B1 - B4 am Standort Heselbach mit einem Differential-Spektrometer .	159
Abb. 3.1.6:	Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B1 .....	159
Abb. 3.1.7:	Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B2 .....	160
Abb. 3.1.8:	Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B3 .....	160
Abb. 3.1.9:	Gamma-Profil (Mitte), geologisches Profil (links) sowie Ausbau (rechts) der Bohrung B4 .....	161
Abb. 3.2.1:	Geologische Übersichtskarte der Oberpfalz zwischen Schwandorf und Regensburg mit Verlauf des Bayerischen Pfahls .....	162
Abb. 3.2.2:	Geologische Detailkarte des Projektgebietes Heselbach mit Lage der Bohrung B2 .....	164
Abb. 3.2.3:	Geologische Korrelation der Aufschlussbohrungen im Untersuchungs- gebiet Heselbach.....	166
Abb. 3.3.1:	Geologische Profilaufnahme der Bohrung B1 .....	167
Abb. 3.3.2:	Geologische Profilaufnahme der Bohrung B2 .....	168
Abb. 3.3.3:	Geologische Profilaufnahme der Bohrung B4 .....	168
Abb. 3.3.4:	Geologische Profilaufnahme der Bohrung B3 .....	169
Abb. 3.3.5:	Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B1 .....	170
Abb. 3.3.6:	Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B2 .....	170
Abb. 3.3.7:	Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B3 .....	171
Abb. 3.3.8:	Aus Elementanalysen berechnete Gesteinszusammensetzung der Bohrung B4 .....	171
Abb. 3.3.9:	Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B1.....	172
Abb. 3.3.10:	Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B2.....	172

Abb. 3.3.11:	Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B3.....	173
Abb. 3.3.12:	Elementkorrelationen im Teufenprofil der Bohrung B4.....	173
Abb. 3.3.13:	Aktivitätsverteilung von $^{235}\text{U}$ entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4...	174
Abb. 3.3.14:	Konzentrationsverteilung von Uran (ICP-Messung) entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4 .....	175
Abb. 3.3.15:	Aktivitäten von Isotopen der Uranzerfallsreihe an Proben der Bohrungen B1 - B4 .....	176
Abb. 3.3.16:	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - gegen $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse für Proben der Bohrungen B1 - B4 .....	176
Abb. 3.3.17:	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - gegen $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse für Proben aus dem Braunkohlehorizont.....	177
Abb. 3.4.1:	Grundwassermessstelle B2.....	178
Abb. 3.4.2:	„On-site“-gemessene Fe-Gehalte im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 .....	179
Abb. 3.4.3:	„On-site“-gemessene S-Gehalte im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 .....	180
Abb. 3.4.4:	Darstellung der Grundwasseranalysen (B1 - B4) in einem modifizierten Piper-Diagramm .....	180
Abb. 3.4.5:	Uran-Konzentrationsverteilung im Grundwasser entlang der Profillinie B3 - B2 - B1 - B4 .....	182
Abb. 3.4.6:	Aktivitätsverhältnisse von Isotopen der Uranzerfallsreihe in verschiedenen Wasserproben.....	184
Abb. 3.6.1:	Schematisches geologisch-hydrogeologisches Profil des Untersuchungsgebietes Heselbach mit modellhafter Darstellung des Urantransportes.....	190
Abb. 4.1.1:	Basis der Tertiär-Schichten im Projektgebiet Ruprechtov .....	195
Abb. 4.1.2:	Lage der Granitoberfläche im Projektgebiet Ruprechtov.....	196
Abb. 4.1.3:	Mächtigkeitkarte des Kaolinhorizontes im Projektgebiet Ruprechtov .	196
Abb. 4.1.4:	Aus den Tiefenlinienplänen rekonstruiertes Profil entlang der angenommenen U-Transportrichtung - Variante A.....	197

Abb. 4.1.5:	Aus den Tiefenlinienplänen rekonstruiertes Profil entlang der angenommenen U-Transportrichtung - Variante B.....	197
Abb. 6.2.1:	Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (2 - 10 m).....	248
Abb. 6.2.2:	Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (10 - 18 m).....	249
Abb. 6.2.3:	Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (18 - 26 m).....	250
Abb. 6.2.4:	Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (26 - 34 m).....	251
Abb. 6.2.5:	Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (34 - 38,40 m)...	252
Abb. 6.2.6:	Al- (links), B- (Mitte) und Ba- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	258
Abb. 6.2.7:	Ca- (links), Ce- (Mitte) und Co- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	259
Abb. 6.2.8:	Cu- (links), Fe- (Mitte) und K- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	260
Abb. 6.2.9:	La- (links), Mg- (Mitte) und Mn- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	261
Abb. 6.2.10:	Mo- (links), Na- (Mitte) und Nd- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	262
Abb. 6.2.11:	Ni- (links), Pb- (Mitte) und Pr-Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	263
Abb. 6.2.12:	S- (links), Sm- (Mitte) und Sr- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	264
Abb. 6.2.13:	TC- (links), Th- (Mitte) und Ti- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	265
Abb. 6.2.14:	U- (links) und Zn- (rMitte) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	266
Abb. 6.2.15:	Cr- (links) und Dy- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	267
Abb. 6.2.16:	Er- (links) und Eu- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	267
Abb. 6.2.17:	Gd- (links) und Hf- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	267

Abb. 6.2.18: Ho- (links) und Li- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	268
Abb. 6.2.19: Lu- (links) und Sb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	268
Abb. 6.2.20: Sn- (links) und Tl- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	268
Abb. 6.2.21: V- (links) und Yb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie .....	269
Abb. 6.2.22: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Al; rechts: Ca) .....	269
Abb. 6.2.23: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Cu; rechts: Fe) .....	269
Abb. 6.2.24: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Mg; rechts: Mn) .....	270
Abb. 6.2.25: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: S; rechts: Sr) .....	270
Abb. 6.2.26: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: U; rechts: Zn) .....	270
Abb. 6.2.27: Al- (links) und As- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	275
Abb. 6.2.28: Be- (links) und Ca- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	275
Abb. 6.2.29: Ce- (links) und Cr- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	275
Abb. 6.2.30: Fe <sup>2+</sup> - (links) und Fe <sup>3+</sup> - (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	276
Abb. 6.2.31: Fe <sub>ges</sub> - (links) und K- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	276
Abb. 6.2.32: La- (links) und Mo- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	276
Abb. 6.2.33: Na- (links) und Ni- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	277

Abb. 6.2.34: P- (links) und Pb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	277
Abb. 6.2.35: Si- (links) und Th- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	277
Abb. 6.2.36: Ti- (links) und TOC- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	278
Abb. 6.2.37: U- (links) und V- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	278
Abb. 6.2.38: Zn-Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie .....	278
Abb. 6.2.39: Entwicklung der Gesamt-Alkalinität im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	283
Abb. 6.2.40: Entwicklung der Al-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	283
Abb. 6.2.41: Entwicklung der Ba-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	283
Abb. 6.2.42: Entwicklung der Ca-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	284
Abb. 6.2.43: Entwicklung der Cl-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	284
Abb. 6.2.44: Entwicklung der Feges-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	284
Abb. 6.2.45: Entwicklung der K-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	285
Abb. 6.2.46: Entwicklung der Li-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	285
Abb. 6.2.47: Entwicklung der Mg-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	285
Abb. 6.2.48: Entwicklung der Mn-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	286
Abb. 6.2.49: Entwicklung der Na-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	286

Abb. 6.2.50: Entwicklung der Sges-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	286
Abb. 6.2.51: Entwicklung der SO <sub>4</sub> -Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	287
Abb. 6.2.52: Entwicklung der Si-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	287
Abb. 6.2.53: Entwicklung der SiO <sub>2</sub> -Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	287
Abb. 6.2.54: Entwicklung der Sr-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	288
Abb. 6.2.55: Entwicklung der TIC-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	288
Abb. 6.2.56: Entwicklung der TOC-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4).....	288
Abb. 6.2.57: Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B1 - Heselbach .....	294
Abb. 6.2.58: Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B2 - Heselbach .....	294
Abb. 6.2.59: Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B3 - Heselbach .....	295
Abb. 6.2.60: Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B4 - Heselbach .....	295





## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1.1:	Koordinaten der Aufschlussbohrungen am Standort Ruprechtov .....	6
Tab. 2.1.2:	Übersicht der in NA4 und NA5 eingesetzten geophysikalischen Bohrloch-Verfahren bzw. daraus abgeleitete Größen .....	10
Tab. 2.1.3:	Programm für Detailuntersuchungen an Kernmaterial der Bohrung NA 4 .....	15
Tab. 2.2.1:	Stratigraphische Abfolge der Sedimentations- / Vulkanismus-Phasen ..	19
Tab. 2.2.2:	Lithologische Übersicht der Sedimentausbildung im Sokolov-Becken...	20
Tab. 2.2.3:	Übersicht über die geologische Abfolge im Hroznetín-Teil des Sokolov-Beckens.....	21
Tab. 2.3.1:	Statistischer Vergleich der Hauptelementverteilung in den drei wichtigsten Gruppen magmatischer Gesteine des Projektgebietes. ....	29
Tab. 2.3.2:	Statistischer Vergleich der Spurenelementverteilung in den drei wichtigsten Gruppen magmatischer Gesteine des Projektgebietes .....	32
Tab. 2.4.1:	Röntgendiffraktometrisch ermittelter Mineralbestand von Sedimentproben der Bohrung NA4 - Kurzform.....	47
Tab. 2.4.2:	Überblick über analysierte Dünnschliffe an Sedimentproben der Bohrung NA4 .....	50
Tab. 2.4.3:	Probenauswahl für mineralogische Detailuntersuchungen .....	53
Tab. 2.4.4:	Röntgendiffraktometrisch ermittelte Mineralbestände .....	56
Tab. 2.4.5:	Konzentration von Radionukliden in Proben der Bohrung NA4.....	59
Tab. 2.4.6:	Hydraulische Durchlässigkeiten (Laborwerte) ausgewählter Sedimentproben der Bohrung NA4 .....	67
Tab. 2.4.7:	Porositäten und spezifische Oberflächen ausgewählter Proben des Bohrkerns NA5 .....	68
Tab. 2.4.8:	Aus Grundwasserspiegeländerungen beim Abpumpen abgeleitete hydraulische Durchlässigkeiten .....	69
Tab. 2.4.9:	TC-, TIC- und TOC-Gehalte von Proben des Bohrkerns NA4.....	77

Tab. 2.4.10:	Verfahrensschritte bei zwei unterschiedlichen Sequentiellen Extraktionsmethoden.....	79
Tab. 2.4.11:	Angewandte Verfahrensschritte und Ergebnisse der sequentiellen Extraktion .....	80
Tab. 2.4.12:	Ergebnisse der radiometrischen Messungen der Bohrkerne NA4 und NA5 .....	83
Tab. 2.5.1:	Spezifikation der On-site-Messungen mit dem Spektrophotometer .....	89
Tab. 2.5.2:	On-Site gemessene Parameter im Grundwasser der Messstelle NA4...	98
Tab. 2.5.3:	On-Site gemessene Parameter im Grundwasser der Messstelle NA5...	99
Tab. 2.5.4:	Ergebnisse der Kolloidmessung an Grundwässern aus den Messstellen NA4 (Probe 1) und NA5 (Probe 2).....	100
Tab. 2.5.5:	Aktivitätsverhältnisse in Grundwasser- und Porenwasserproben .....	101
Tab. 2.5.6:	Übersicht der zur Porenwasserextraktion eingesetzten Proben.....	102
Tab. 2.5.7:	Versuchsparameter der Porenwasserextraktion .....	103
Tab. 2.6.1:	Sättigungsindices von Uran(IV)-Mineralen .....	113
Tab. 2.6.2:	Sättigungsindex von Ningyoit in Abhängigkeit der Phosphatkonzentration.....	113
Tab. 2.7.1:	Vergleich der Kationenaustauschkapazitäten (KAK) mit den mittels HCl extrahierten Kationen .....	117
Tab. 2.7.2:	Chemische Zusammensetzung, pH- und Eh-Werte der 1N HCl-Extraktions-lösung von Probe 1 und Probe 2.....	118
Tab. 2.7.3:	Chemische Zusammensetzung, pH- und Eh-Wert für Grundwasser (GW) und Deionisiertes Wasser (DW) nach Reaktion mit Probe 1 bzw. Probe 2 .....	119
Tab. 2.7.4:	Uran-Konzentration, pH-Wert, Anorganischer Kohlenstoff (IC) sowie Gesamter Organischer Kohlenstoff (TOC) nach 28 Tagen in GW und DW nach Reaktion mit Probe 1 und Probe 2.....	120
Tab. 2.8.1:	Zusammensetzung stabiler Isotope in flachen Grund- und Oberflächenwässern in der Umgebung von Ruprechtov.....	131
Tab. 2.8.2:	Isotopenzusammensetzung von Grundwässern und einem der Oberflächenwässer im Raum Ruprechtov.....	134

Tab. 3.1.1:	Ausbau der Aufschlussbohrungen B1 - B4 am Standort Heselbach ....	157
Tab. 3.2.1:	Stratigraphische Tabelle zur Alterseinstufung der Schichtenfolgen am Standort Heselbach .....	163
Tab. 3.3.1:	Mittels ICP und $\alpha$ -Radiometrie ermittelte Urangehalte .....	175
Tab. 3.4.1:	On-site gemessene Parameter im Grundwasser der Meßstellen B1 bis B4 sowie im Steinberger See .....	179
Tab. 3.4.2:	Ergebnisse der chemischen Analyse von Grund- und Oberflächenwässern am Standort Heselbach.....	181
Tab. 3.4.3:	Radionuklidgehalte von Wasserproben aus dem Projektgebiet Heselbach - $\alpha$ -radiometrische Messungen.....	182
Tab. 3.4.4:	Mittels ICP und $\alpha$ -Radiometrie bestimmte Urankonzentrationen der Grundwässer .....	183
Tab. 3.5.1:	Grundwasserzusammensetzung für Speziationsrechnungen .....	185
Tab. 3.5.2:	Anteile der mobilen Uranspezies [%] für verschiedene Parameter- variationen .....	186
Tab. 3.6.1:	In-situ-Verteilungskoeffizienten .....	188
Tab. 6.1.1:	Probenübersicht Ruprechtov .....	228
Tab. 6.1.2:	Probenübersicht Heselbach .....	244
Tab. 6.2.1:	Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 1) .....	253
Tab. 6.2.2:	Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 2) .....	254
Tab. 6.2.3:	Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 3) .....	255
Tab. 6.2.4:	Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 4) .....	256
Tab. 6.2.5:	Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 5) .....	257
Tab. 6.2.6:	Röntgendiffraktometrisch ermittelter Mineralbestand von Sediment-, Basalt- und Granitproben (Ruprechtov).....	271
Tab. 6.2.7:	Ergebnisse der Elementanalysen an Grund- und Oberflächenwasser.	279

Tab. 6.2.8:	Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB1 .....	289
Tab. 6.2.9:	Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB2 .....	290
Tab. 6.2.10:	Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB3 .....	291
Tab. 6.2.11:	Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedim. der Bohrungen HB3 .....	292
Tab. 6.2.12:	Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB4 .....	293

## **6 Anhang**

### **6.1 Gesamt-Probenübersicht**

### **6.2 Profile und Tabellen**

**6.1 Gesamt-Probenübersicht; Stand: 31.08.2001**

**Tab. 6.1.1: Probenübersicht Ruprechtov**

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
<b>Wasserproben (Gewässer, NA4, NA5 - Grundwasser, Porenwasser)</b>									
VR 1	F	Stehendes Gewässer mit unterirdischem Zufluss	30.06.99	Velký rybník, Seemitte, oberflächennah	GRS	ICP	99080 / 21710	Tabelle	
VR 2	F	Stehendes Gewässer mit unterirdischem Zufluss	30.06.99	Velký rybník, Seemitte, ca. 3 m Tiefe	GRS FZJ	ICP RC	99080 / 21711	Tabelle	
RT1	F	Stehendes Gewässer	30.06.99	Teich, ca. 350 m ESE Ruprechtov, oberflächennah	GRS AGH	ICP SI	99080 / 21712	Tabelle T/H2/O18	
NA4- M1	F	GW-Mischprobe (Leerschöpfen des Bohrlochs)	13.07.99	Bohrung NA4, ca. 20 m Tiefe	GRS	ICP	99080 / 21742	Tabelle	
NA4-M2	F	GW-Mischprobe (Leerschöpfen des Bohrlochs)	15.07.99	Bohrung NA4, ca. 20 m Tiefe	GRS	ICP	99080 / 21743	Tabelle	
NA4-GW1	F	GW aus Filterstrecke	04.08.99	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	99080 / 21774	Tabelle	während P- Test (gestört)
NA5-GW1	F	GW aus Filterstrecke	04.08.99	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	99080 / 21775	Tabelle	PN während Pumpen-Test (gestört)

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4-GW2	F	GW aus Filterstrecke	28.09.99	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	99080/ 21993	Tabelle	1. reg. PN Einfl. Filter
NA5-GW2	F	GW aus Filterstrecke	28.09.99	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	99080/ 21994	Tabelle	1. reg. PN
NA4-GW3	F	GW aus Filterstrecke	04.11.99	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS FZJ AGH	ICP RC SI	99080/ 22182	Tabelle T/H2/O18	2. reg. PN Einfl. Filter
NA5-GW3	F	GW aus Filterstrecke	04.11.99	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS FZJ AGH	ICP RC SI	99080/ 22183	Tabelle T/H2/O18	2. reg. PN
NA4-GW4	F	GW aus Filterstrecke	20.01.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS EMN	ICP MA	2000-009/ 22565	Tabelle	
NA5-GW4	F	GW aus Filterstrecke	20.01.00	NA5; 19,2 - 21,2 m	--	--	--	--	PN nicht möglich
NA4-GW5/1	F	GW aus Filterstrecke	14.03.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-023/ 22834	Tabelle	Bei Pump- Beginn
NA4-GW5/2	F	GW aus Filterstrecke	14.03.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-023/ 22835	Tabelle	Nach 4h Abpumpen mit 0,8l/min
NA5-GW5	F	GW aus Filterstrecke	14.03.00	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2000-023/ 22836	Tabelle	
NA4-GW6/1	F	GW aus Filterstrecke	23.05.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23101	Tabelle	Bei Pump- Beginn
NA4-GW6/2	F	GW aus Filterstrecke	23.05.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23102	Tabelle	Nach 3 h Abpumpen



Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4-GW6/3	F	GW aus Filterstrecke	23.05.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23103	Tabelle	Nach 6 h Abpumpen
NA4-GW6/4	F	GW aus Filterstrecke	24.05.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23104	Tabelle	Nach 15 h ohne Pumpen
NA5-GW6	F	GW aus Filterstrecke	24.05.00	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2000-041/ 23105	Tabelle	
NA4-GW7/1	F	GW aus Filterstrecke	29.08.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23406	Tabelle	Bei Pump- Beginn
NA4-GW7/2	F	GW aus Filterstrecke	29.08.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23407	Tabelle	Nach 3 h Abpumpen
NA4-GW7/3	F	GW aus Filterstrecke	29.08.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000-041/ 23408	Tabelle	Nach 3 h ohne Pumpen
NA5-GW7	F	GW aus Filterstrecke	29.08.00	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2000-041/ 23409	Tabelle	
NA4-GW8/1	F	GW aus Filterstrecke	07.11.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000- 074/23664	Tabelle	
NA4-GW8/2	F	GW aus Filterstrecke	07.11.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2000- 074/23665	Tabelle	
NA4-GW8/3	F	GW aus Filterstrecke	08.11.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS AGH	ICP SI	2000- 074/23666	Tabelle Bericht	C13
NA4-GW8 - CC	F	GW aus Filterstrecke	07.11.00	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS TU-BS	ICP ICP	2000- 074/23668	Tabelle Tabelle	Analysen- Vergleich
NA5-GW8	F	GW aus Filterstrecke	07.11.00	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS AGH	ICP SI	2000- 074/23667	Tabelle Bericht	C13

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4-GW9/1-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24277	Tabelle	Analyse nach 2 Monaten
NA4-GW9/1-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24277	Tabelle	Analyse nach 3 Monaten
NA4-GW9/1-C	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24277	Tabelle	
NA4-GW9/1-U	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24277	Tabelle	
NA4-GW9/2-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24278	Tabelle	Analyse nach 2 Monaten
NA4-GW9/2-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24278	Tabelle	Analyse nach 3 Monaten
NA4-GW9/2-C	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24278	Tabelle	
NA4-GW9/2-U	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA4; 34,5 - 36,5 m	GRS	ICP	2001- 014/24278	Tabelle	
NA5-GW9-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2001- 014/24279	Tabelle	Analyse nach 2 Monaten
NA5-GW9-N	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2001- 014/24279	Tabelle	Analyse nach 3 Monaten
NA5-GW9-C	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2001- 014/24279	Tabelle	
NA5-GW9-U	F	GW aus Filterstrecke	06.03.01	NA5; 19,2 - 21,2 m	GRS	ICP	2001- 014/24279	Tabelle	
NA4-PW1	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 33,28 - 33,33 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 01-00005 PW1	Tabelle	BGS-Beh. Beschädigt; geringe Menge

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4-PW2	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 34,71 - 34,76 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 06-00010 PW2	Tabelle	
NA4-PW3	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 34,88 - 34,93 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 11-00015 PW3	Tabelle --	
NA4-PW4	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 36,02 - 36,07 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 16-00020 PW4	Tabelle	
NA4-PW5	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 36,39 - 36,44 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 21-00025 PW5	Tabelle	
NA4-PW6	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 36,64 36,69 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 26-00030 PW6	Tabelle	
NA5-PW7	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 37,18 - 37,23 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 31-00035 PW7	Tabelle	
NA5-PW8	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 37,67 - 37,72 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 36-00040 PW8	Tabelle	
NA5-PW9	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 37,92 - 37,97 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 41-00045 PW9	Tabelle	
NA5-PW10	F	Porenwasser aus 5-st. Extr.	21.02.00	NA4; 38,22 - 38,27 m	BGS FZJ	ICP RC	06356/000 46-00050 PW10	Tabelle	

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
<b>Gesteins- / Feststoffproben, allgemein</b>									
VG 1	S	Anstehender Granit	30.06.99	Böschung Bahnübergang, SE-Ufer Velký rybník	GRS	XRD,U,Th	99081 / 21713	Tabelle	XRD-F
VG 1	S	Anstehender Granit	30.06.99	Böschung Bahnübergang, SE-Ufer Velký rybník	Asse	GAGHa		54 counts / 600 s	
HG 1	S	Kaolinisierter Granit	01.07.99	Hajek-Site (ehem. U-/ Kaolin-Abbau)					
HG 2	S	Kaolinisierter Granit	01.07.99	Hajek-Site (ehem. U-/ Kaolin-Abbau)	GRS	XRD,U,Th	99081 / 21714	Tabelle	XRD-F
HB 1	S	Basalt	01.07.99	Hajek-Site (ehem. U-/ Kaolin-Abbau)	GRS	XRD,U,Th	99081 / 21715	Tabelle	XRD-F
RB 1	S	Basalt	01.07.99	Aufgelassener Steinbruch, ca. 150 m E Ortschaft Ruprechtov	GRS	XRD,U,Th	99081 / 21716	Tabelle	XRD-F
BEN1	S	Bentonit zur Ringraum- Verfüllung	13.07.99	Bohrfirma GIS	TU	WA		Bericht	(pulvrig, Sackware)
BEN2	S	Bentonit zur Ringraum- Verfüllung	15.07.99	Bohrfirma GIS	TU	WA		Bericht	(Pellets, Sackware)

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
<b>Sedimentproben NA4</b>									
NA4 - 3,06-3,66	S	Kernstück Gesteinsstück	20.09.99	NA4; 3,06 - 3,66 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 3,71-3,78	S	Kernstück S/T	20.09.99	NA4; 3,71 - 3,78 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22146 RFA1	Tabelle Tabelle	
NA4 - 4,33-4,37	S	Kernstück	20.09.99	NA4; 4,33 - 4,37 m	GRS/TU FZJ iBMB	ICP,XRD, RC RFA	99111 / 22162 RFA2	Tabelle	Oberflächen- nah
NA4 - 4,70-4,71	S	Kernstück Gesteinsstück	20.09.99	NA4; 4,70 - 4,71 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 5,54-5,57	S	Kernstück sandige Lage	20.09.99	NA4; 5,54 - 5,57 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 6,81-6,86	S	Kernstück T	20.09.99	NA4; 6,81 - 6,86 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22147 RFA3	Tabelle Tabelle	
NA4 - 7,48-7,55	S	Kernstück grobkörnig	20.09.99	NA4; 7,48 - 7,55 m	TU	KG,DS		Aufnahme	
NA4 - 8,10-8,11	S	Kernstück Grobkies	20.09.99	NA4; 8,10 - 8,11 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 8,57-8,63	S	Kernstück T/Kohle	20.09.99	NA4; 8,57 - 8,63 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22148 RFA4	Tabelle Tabelle	
NA4 - 11,64-11,75	S	Kernstück verf. Asche	20.09.99	NA4; 11,64 - 11,75 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22149 RFA5	Tabelle Tabelle	

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 14,54-14,64	S	Kernstück T/gk Lage	20.09.99	NA4; 14,54 - 14,64 m	GRS/TU	KG,DS		Aufnahme	
NA4 - 17,15-17,22	S	Kernstück T/S	20.09.99	NA4; 17,15 - 17,22 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22150 RFA6	Tabelle Tabelle	
NA4 - 19,21-19,25	S	Kernstück	23.11.99	NA4; 19,21 - 19,25 m	TU	Kf	K7	8,6 E-10 m/s	
NA4 - 19,30-19,35	S	Kernstück	20.09.99	NA4; 19,30 - 19,35 m	GRS/TU iBMB	XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22152 RFA7	Tabelle Tabelle	Grauer Horizont
NA4 - 19,30-19,35	S	Kernstück	20.09.99	NA4; 19,30 - 19,35 m	GRS/TU iBMB	XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22151 RFA8	Tabelle Tabelle	Ox. heller Horizont
NA4 - 19,42-19,46	S	Kernstück	23.11.99	NA4; 19,42 - 19,46 m	TU	Kf	K8	1,2 E-10 m/s	
NA4 - 20,26-20,35	S	Kernstück verw. Turffit/ Kohle	20.09.99	NA4; 20,26 - 20,35 m	GRS/TU iBMB	KG,DS,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22153 RFA9	Tabelle Tabelle	
NA4 - 21,22-21,28	S	Kernstück verw. Kristalltuffit	20.09.99	NA4; 21,22 - 21,28 m	GRS/TU iBMB	DS,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22154 RFA10	Tabelle Tabelle	
NA4 - 22,29-22,34	S	Kernstück Kristalltuffit/Ton	20.09.99	NA4; 22,29 - 22,34 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 25,00-25,10	S	Kernstück verf. Asche	20.09.99	NA4; 25,00 - 25,10 m	GRS/TU iBMB	ICP,TC RFA	99111 / 22155 RFA11	Tabelle Tabelle	
NA4 - 26,58-26,61	S	Kernstück blaugr. Turffit	20.09.99	NA4; 26,58 - 26,61 m	TU	Kf	K2	2,8 E-11 m/s	

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 26,86-26,89	S	Kernstück ge-gr. Tuffit	20.09.99	NA4; 26,86 - 26,89 m	GRS/TU iBMB	XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22156 RFA12	Tabelle Tabelle	
NA4 - 26,90-26,94	S	Kernstück Kristalltuffit	20.09.99	NA4; 26,90 - 26,94 m	TU	Kf	K1	8,9 E-11 m/s	
NA4 - 29,65-29,68	S	Kernstück Kristalltuffit	20.09.99	NA4; 29,65 - 29,68 m	TU	DS		Aufnahme	
NA4 - 29,72-29,76	S	Kernstück Kristalltuffit	20.09.99	NA4; 29,72 - 29,76 m	TU	Kf	K3	2,1 E-11 m/s	
NA4 - 32,45-32,55	S	Kernstück Ton/Schluff	20.09.99	NA4; 32,45 - 32,55 m	GRS FZJ TU iBMB TU-BS	ICP,XRD RC SE RFA KAK	99111 / 22163 SE1(B) 2000-012/ 22694-98 RFA13 9652-1/2	Tabelle Tabelle Tabelle Tabelle	Oberhalb PVC-Kerntour, XRD-F
NA4 - 32,64-32,73	S	Kernstück T/Tuffit	20.09.99	NA4; 32,64 - 32,73 m	GRS/TU iBMB	KG,XRD,ICP,TC RFA	99111 / 22157 RFA14	Tabelle Tabelle	
NA4 - 33,00-33,04	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 33,00 - 33,04 m	TU-BS	KAK	9673-1/2	Tabelle	
NA4 - 33,04-33,08	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 33,04 - 33,08 m	FZJ	BET	[FZJ1]	Kurz- bericht	„0“-Probe
NA4 - 33,16-33,28	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 33,16 - 33,28 m	EMN	MA			„0“-Probe zurückgestellt

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 33,28-33,33	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 33,28 - 33,33 m	BGS FZJ GRS TU iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC SE RFA KAK	06355- 00001 PWS1 2000-032/ 23106 2000-050/ 23262-66 RFA15 9642	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	„0“-Probe;
NA4 - 33,33-33,38	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 33,33 - 33,38 m	US	ASEM	A1,A2, A3/1	Prelimin. Results	„0“-Probe
NA4 - 33,67-33,71	S	PVC-Kernstück	15.10.99	NA4; 33,50 - 33,74 m	TU	Kf	K4	(2,40 E-12 m/s)	Kein Auslauf aus Abschn. 33,50-33,74
NA4 - 33,74-33,78	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 33,74 - 33,78 m	GRS iBMB TU-BS	ICP,XRD,CEC,TC(S E) RFA KAK	99081 / 21777 RFA16 9653-1/2	Tabelle Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 34,00-34,18	S	PVC-Kernstück	15.10.99	NA4; 34,00 - 34,18 m	TU	Kf		---	zerbrochen
NA4 - 34,18-34,22	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 34,18 - 34,22 m	GRS iBMB	ICP,XRD,CEC,TC (SE) RFA	99081 / 21778 RFA17	Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 34,30-34,34	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 34,30 - 34,34 m	GRS iBMB	ICP,XRD,CEC,TC (SE) RFA	99081 / 21779 RFA18	Tabelle Tabelle	Low Level



Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 34,50-34,68	S	Cross-check- sample NA4-1 PVC-Kernstück, Kohlenton mit Kies	20.09.99/ 23.11.99	NA4; 34,50 - 34,68 m	½ → NRI ½ → GRS +  FZJ TU  iBMB	ICP,XRD  RC SE  RFA	CC1,D8 99111 / 22158 SE2(B) 2000-012/ 22699-703 RFA19	Tabelle  Tabelle Tabelle	Homogene Probe aus BK- Mitte – low- level XRD-F
NA4 - 34,68-34,71	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 34,68 - 34,71 m	FZJ	AR	[FZJ2]	Kurz- bericht	Log-Peak
NA4 - 34,71-34,76	S	PVC-Kernstück	20.09.99  24.05.00	NA4; 34,71 - 34,76 m	BGS  FZJ GRS	PWE  RC ICP,XRD,CEC,SE	06355- 00002 PWS2 2000-032/ 23107 RFA20 9643	PW- Bericht  Tabelle  Tabelle Tabelle	Log-Peak;      
NA4 - 34,76-34,88	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 34,76 - 34,88 m	EMN	MA			Log-Peak zurückgestellt
NA4 - 34,88-34,93	S	PVC-Kernstück	20.09.99  24.05.00	NA4; 34,88 - 34,93 m	BGS  FZJ GRS  TU  iBMB TU-BS	PWE (anaer.)  RC,BET,AR ICP,XRD,CEC  SE  RFA KAK	06355- 00003 PWS3 2000-032/ 23108 2000-050/ 23267-71 RFA21 9644	PW- Bericht  Tabelle  Tabelle Tabelle	Log-Peak;      
NA4 - 34,93-34,98	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 34,93 - 34,98 m	US	ASEM	B2/1a,1b	Prelimin. Results	Log-Peak
NA4 - 35,43-35,47	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 35,43 - 35,47 m	FZJ GRS	RC ICP,XRD,CEC,SE	[FZJ3]	Kurz- bericht	

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 35,47-35,51	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 35,47 - 35,51 m	GRS iBMB	ICP,XRD,CEC, TC,(SE) RFA	99081 / 21780 RFA22	Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 35,51-35,75	S	PVC-Kernstück	15.10.99	NA4; 35,51 - 35,75 m	TU	Kf		---	Kohle; kein Probekörper möglich
NA4 - 35,51-35,59	S	Reststück	11.00	NA4; 35,51 - 35,59 m	TU-BS	KAK	9655-1/2	Tabelle	Zurückgestellt
NA4 - 35,80-35,84	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 35,80 - 35,84 m	TU-BS	KAK	9675-1/2	Tabelle	Zurückgestellt
NA4 - 35,84-35,88	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 35,84 - 35,88 m	GRS iBMB	ICP,XRD,CEC, (SE) RFA	99081 / 21781 RFA23	Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 36,02-36,07	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 36,02 - 36,07 m	BGS FZJ GRS iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC,SE RFA KAK	06355- 00004 PWS4 2000-032/ 23109 RFA24 9645	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	Log-Peak;
NA4 - 36,07- 36,20	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 36,07 - 36,20 m	TU-BS	KAK	9676a1/2 9676b1/2	Tabelle	Zurückgestellt
NA4 - 36,24-36,36	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 36,24 - 36,36 m	EMN	MA			Log-Peak zurückgestellt
NA4 - 36,36-36,39	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 36,36 - 36,39 m	FZJ	BET	[FZJ4]	Kurz- bericht	Log-Peak

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 36,39-36,44	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 36,39 - 36,44 m	BGS FZJ GRS TU iBMB TU-BS	PWE (anaer.) RC ICP,XRD,CEC SE RFA KAK	06355- 00005 PWS5 2000-032/ 23110 2000-050/ 23272-76 RFA25 9646	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	Log-Peak;
NA4 - 36,44-36,49	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 36,44 - 36,49 m	US	ASEM	C3/1a,1b,1c, 1d	Zwischen- Bericht	Log-Peak
NA4 - 36,49-36,54	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 36,49 - 36,54 m	GRS iBMB	ICP,XRD,CEC, (SE) RFA	99081 / 21782 RFA26	Tabelle Tabelle	Log-Peak XRD-F
NA4 - 36,64-36,69	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 36,64 - 36,69 m	BGS FZJ GRS iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC,SE RFA KAK	06355- 00006 PWS6/8b 2000-032/ 23111 RFA27/32 9647	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	
NA4 - 36,69-36,80	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 36,69 - 36,80 m	TU-BS	KAK	9678a1/2 9678b1/2	Tabelle	
NA4 - 36,80-36,92	S	Reststück	11.00	NA4; 36,80 - 36,92 m	TU-BS	KAK	9656-1/2	Tabelle	
NA4 - 36,94-36,98	S	PVC-Kernstück	15.10.99	NA4; 36,80 - 37,08 m	TU	Kf	K5	3,6 E-11 m/s	Aus Abschn. 36,80-37,08
NA4 - 37,08-37,13	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 37,08 - 37,13 m	FZJ GRS	RC,AR ICP,XRD,CEC,SE	[FZJ5]	Kurz- bericht	

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 37,18-37,23	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 37,18 - 37,23 m	BGS FZJ GRS TU iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC SE RFA KAK	06355- 00007 PWS7 2000-032/ 23112 2000-050/ 23277-81 RFA28 9648	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle Tabelle	
NA4 - 37,23-37,30	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 37,23 - 37,30 m	TU-BS	KAK	9680a1/2 9680b1/2	Tabelle	zurückgestellt
NA4 - 37,37-37,41	S	PVC-Kernstück	15.10.99	NA4; 37,30 - 37,50 m	TU	Kf	K6	1,9 E-11 m/s	Aus Abschn. 37,30-37,50
NA4 - 37,50-37,55	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 37,50 - 37,55 m	GRS iBMB TU-BS	ICP,XRD,CEC, (SE) RFA KAK	99081 / 21783 RFA29 9654-1/2	Tabelle Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 37,55-37,67	S	Cross-check- sample NA4-2 PVC-Kernstück fS-mS; U-T	20.09.99/ 23.11.99	NA4; 37,55 - 37,67 m	1/2 → NRI 1/2 → GRS FZJ TU iBMB	ICP,XRD RC SE RFA	CC2,D9 99111 / 22159 SE3(B,D) 2000-012/ 22704-08 RFA30	Tabelle Tabelle Tabelle Tabelle	Homogene Probe aus BK- Mitte – Peak- Flanke XRD-F
NA4 - 37,67-37,72	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 37,67 - 37,72 m	BGS FZJ GRS iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC,SE RFA KAK	06355- 00008 PWS8 2000-032/ 23113 RFA31 9649	PW- Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	

Proben-Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN-Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs-Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 37,72-37,75	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 37,72 - 37,75 m	TU-BS	KAK	9681-1/2	Tabelle	
NA4 - 37,75-37,80	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 37,75 - 37,80 m	FZJ GRS	RC ICP,XRD,CEC,SE	[FZJ6]	Kurz-bericht	Zwischentief (Rand)
NA4 - 37,80-37,88	S	PVC-Kernstück	07.06.00	NA4; 37,80 - 37,88 m	US EMN	SMA SOR		Kurz-bericht	
NA4 - 37,88-37,92	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 37,88 - 37,92 m	FZJ	BET,AR	[FZJ7]		Peak (zurückgel.)
NA4 - 37,92-37,97	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 37,92 - 37,97 m	BGS FZJ GRS TU iBMB TU-BS	PWE (anaer.) RC ICP,XRD,CEC SE RFA KAK	06355-00009 PWS9 2000-032/ 23114 2000-050/ 23282-86 RFA33 9650	PW-Bericht Tabelle Tabelle Tabelle	Peak; Peak;
NA4 - 37,97-38,02	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 37,97 - 38,02 m	US	ASEM	D4/1a,1b,1c	Zwischen-Bericht	Peak
NA4 - 38,02-38,14	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 38,02 - 38,14 m	EMN	MA			Peak zurückgestellt
NA4 - 38,14-38,19	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 38,14 - 38,19 m	FZJ GRS	RC,AR,BET ICP,XRD,CEC,SE	[FZJ8]		Zwischentief
NA4 - 38,19-38,22	S	PVC-Kernstück T/Tuffit	23.11.99	NA4; 38,19 - 38,22 m	GRS FZJ TU iBMB	ICP RC SE RFA	99111 / 22245 SE4(B,D) 2000-012/ 22709-13 RFA34	Tabelle Tabelle Tabelle	XRD-F

Proben-Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN-Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs-Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
NA4 - 38,22-38,27	S	PVC-Kernstück	20.09.99 24.05.00	NA4; 38,22 - 38,27 m	BGS FZJ GRS TU iBMB TU-BS	PWE RC ICP,XRD,CEC SE RFA KAK	06355-00010 PWS10 2000-032/23115 2000-050/23287-91 RFA35 9651	PW-Bericht Tabelle Tabelle Tabelle Tabelle	
NA4 - 38,27-38,30	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 38,27 - 38,30 m	FZJ	BET,AR	[FZJ9]		zurückgestellt
NA4 - 38,30-38,35	S	PVC-Kernstück	20.09.99	NA4; 38,30 - 38,35 m	GRS iBMB TU-BS	ICP,XRD,CEC, (SE) RFA KAK	99081 / 21784 RFA36 9657-1/2	Tabelle Tabelle Tabelle	XRD-F
NA4 - 38,35-38,40	S	PVC-Kernstück	12.00	NA4; 38,35 - 38,40 m	TU-BS	KAK	9682-1/2	Tabelle	
<b>Sedimentproben NA5</b>									
NA5 - 33,90-34,10	S	Cross-check-sample NA5-C1	27.09.99	NA5; 33,90 - 34,10 m	GRS FZJ iBMB	ICP,XRD RC RFA	99111 / 22160 [CC3] RFA37	Tabelle Tabelle	Low-Level (von NRI)
NA5 - 34,55-34,60	S	Kernstück	23.05.00	NA5; 34,55 - 34,60 m	GRS US EMN I.U.T ?	ICP,XRD ASEM MA,SOR RC		Kurzbericht	
NA5 - 34,87-34,89	S	Cross-check-sample NA5-C2	27.09.99	NA5; 34,87 - 34,89 m	GRS FZJ iBMB	ICP,XRD RC RFA	99111 / 22161 [CC4] RFA38	Tabelle Tabelle	Peak ! (von NRI)

Tab. 6.1.2: Probenübersicht Heselbach

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
<b>Wasserproben (Grundwasser, Pegel HB1, HB2, HB3 und HB4, Oberflächenwasser)</b>									
HB1-GW1	F	GW aus Filterstrecke	16.03.00	HB1; 1,70 - 4,70 m	GRS	ICP	2000-023/ 22837	Tabelle	
HB2-GW1	F	GW aus Filterstrecke	16.03.00	HB2; 3,70 - 7,70 m	GRS	ICP	2000-023/ 22838	Tabelle	
HB3-GW1	F	GW aus Filterstrecke	16.03.00	HB3; 5,80 - 8,80 m	GRS	ICP	2000-023/ 22839	Tabelle	
HB4-GW1	F	GW aus Filterstrecke	16.03.00	HB4; 0,50 - 2,50 m	GRS	ICP	2000-023/ 22840	Tabelle	
HB1-GW2	F	GW aus Filterstrecke	03.01.01	HB1; 1,70 - 4,70 m	GRS I.U.T.	ICP RC	2000- 074/24069 00082.2	Tabelle PB 00082	
HB2-GW2	F	GW aus Filterstrecke	03.01.01	HB2; 3,70 - 7,70 m	GRS I.U.T.	ICP RC	2000- 074/24070 00082.3	Tabelle PB 00082	
HB3-GW2	F	GW aus Filterstrecke	04.01.01	HB3; 5,80 - 8,80 m	GRS I.U.T.	ICP RC	2000- 074/24071 00082.4	Tabelle PB 00082	
SBS1-OW1	F	Steinberger See, Oberflächenw.	04.01.01	Ufer, nahe DAGH	GRS I.U.T.	ICP RC	2000- 074/24072 00082.1	Tabelle PB 00082	
HB1-GW3	F	GW aus Filterstrecke	23.07.01	HB1; 1,70 - 4,70 m	GRS	ICP	2001-014/ 24846		
HB3-GW3	F	GW aus Filterstrecke	23.07.01	HB3; 5,80 - 8,80 m	GRS	ICP	2001-014/ 24847		

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
<b>Sedimentproben HB1 bis HB4</b>									
HB1-1,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 1,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-1,80	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 1,80 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-2,15	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 2,15 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-1	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB1; 2,50 - 2,60 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 1
HB1-2,90	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 2,90 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-2	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB1; 3,20 - 3,30 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 2
HB1-3,65	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 3,65 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-4,35	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 4,35 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-4,60	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 4,60 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-4,80	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 4,80 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB1-5,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB1; 5,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-1,60	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 1,60 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-2,40	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 2,40 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-3,40	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 3,40 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-1	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB2; 4,55 - 4,65 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 1
HB2-2	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB2; 5,30 - 5,40 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 2
HB2-5,60	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 5,60 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-5,80	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 5,80 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-6,30	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 6,30 m	CLZ	RFA		Tabelle	



Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
HB2-7,20	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 7,20 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB2-7,70	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB2; 7,70 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-2,20	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 2,20 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-3,20	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 3,20 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-4,20	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 4,20 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-4,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 4,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-5,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 5,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-1	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB3; 6,70 - 6,80 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 1
HB3-7,40	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 7,40 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-2	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB3; 7,60 - 7,70 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 2
HB3-8,25	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 8,25 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-8,80	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 8,80 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-9,30	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 9,30 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-9,60	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 9,60 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB3-10,10	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB3; 10,10 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-0,35	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 0,35 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-1	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB4; 0,60 - 0,70 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 1
HB4-0,80	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 0,80 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-1,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 1,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-2	S	Kernabschnitt	11.04.00	HB4; 1,70 - 1,80 m	CLZ I.U.T.	RFA RC		Tabelle Tabelle	Peak 2

Proben- Bezeichnung	F / S	Beschreibung	PN- Zeitpunkt	PN-Ort	Labor / Institut	Untersuchungs- Umfang	Labor-Nr.	Ergebnis	Bemerkung
HB4-2,10	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 2,10 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-3,05	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 3,05 m	CLZ	RFA		Tabelle	
HB4-3,50	S	Kernabschnitt	09.04.01	HB4; 3,50 m	CLZ	RFA		Tabelle	

### In der Tabelle verwendete Abkürzungen:

ASEM Elektronenmikroskop	AGH University of Technology, Krakow, PL
BET Spez. Oberfläche	CLZ TU-Clausthal, Mineralogisches Institut
CEC Kationenaustauschkapazität	EMN Ecole des Mines, Nantes, F
DS Dünnschliff	FZJ Forschungszentrum Jülich
GAGHa GAGHa-Szintillometrie	iBMB TU-Braunschweig, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
ICP Elementanalytik	I.U.T. Inst. f. Umwelttechnologien, Berlin
Kf Kf-Wert	NRI Nuclear Research Institute, Rez, CZ
KG Korngröße	TU TU-Braunschweig, Angewandte Geologie
MA Mikrobielle Aktivität	TU-BS TU-Braunschweig, Geochemie, Abfallanalytik
PWE Porenwasserextraktion	US University of Silesia, Katowice, PL
RC Radiochemie	
RFA Röntgenfluoreszenz-Analyse	
SE Sequentielle Extraktion	
SI Stabile Isotope	
SMA Schwermineral-Anreicherung	
SOR Sorptions-Versuche	
TC Kohlenstoff	
WA Wasseraufnahme	
XRD Röntgendiffraktometrie	

## 6.2 Profile und Tabellen

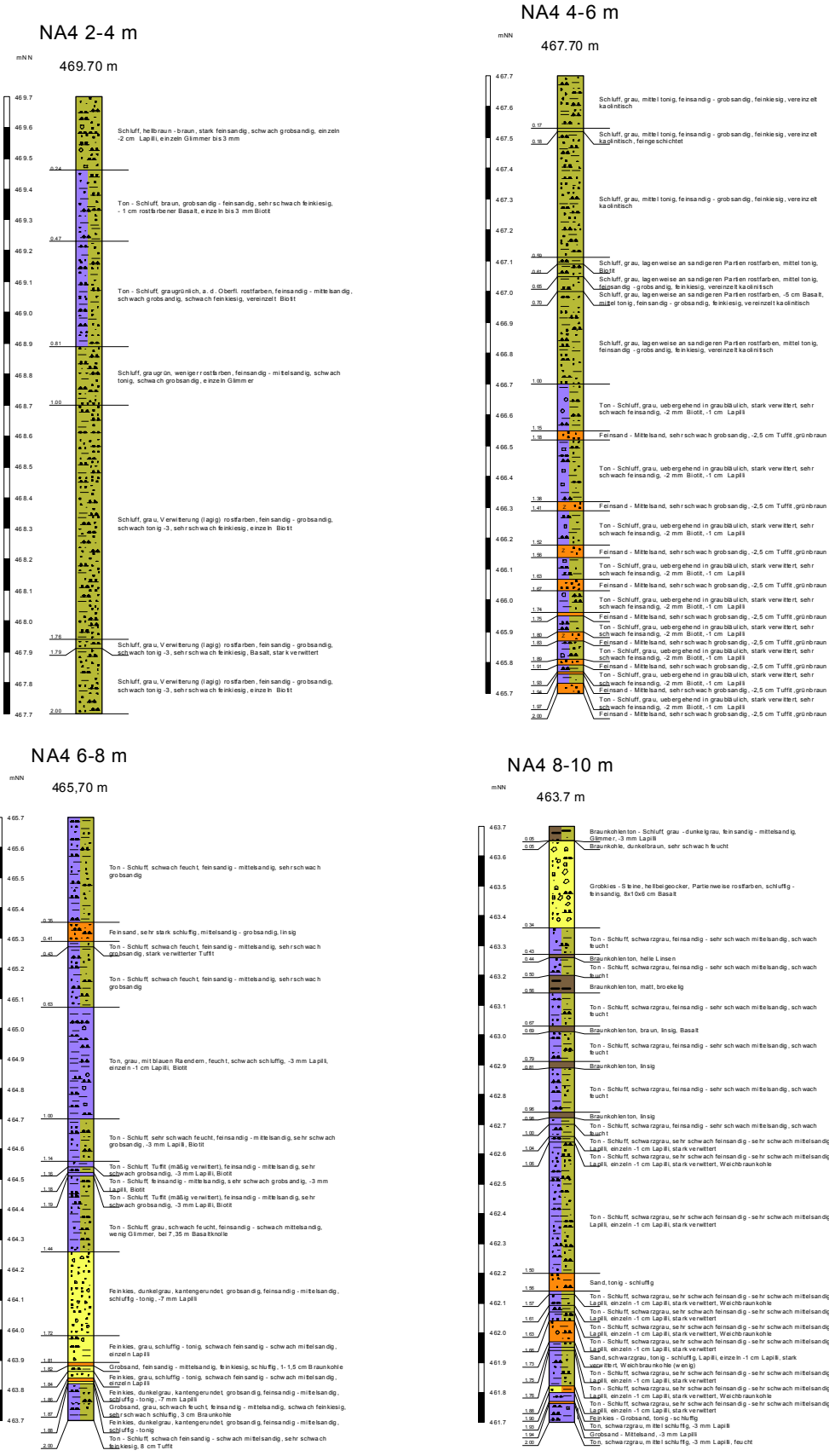


Abb. 6.2.1: Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (2 - 10 m)



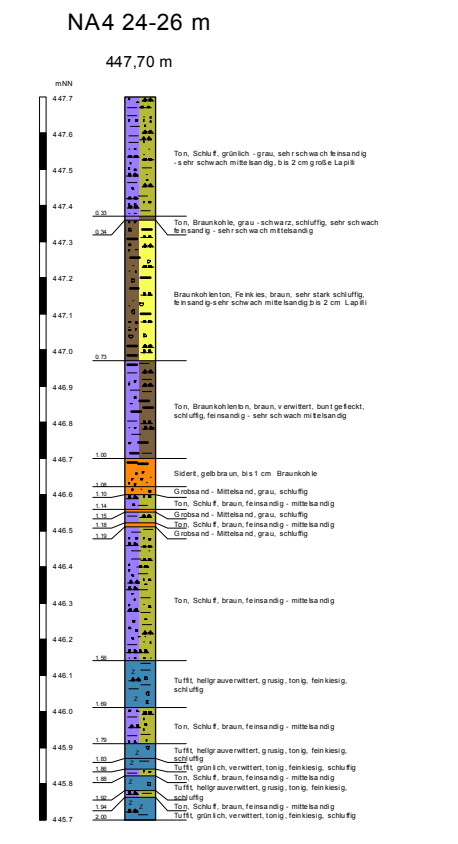
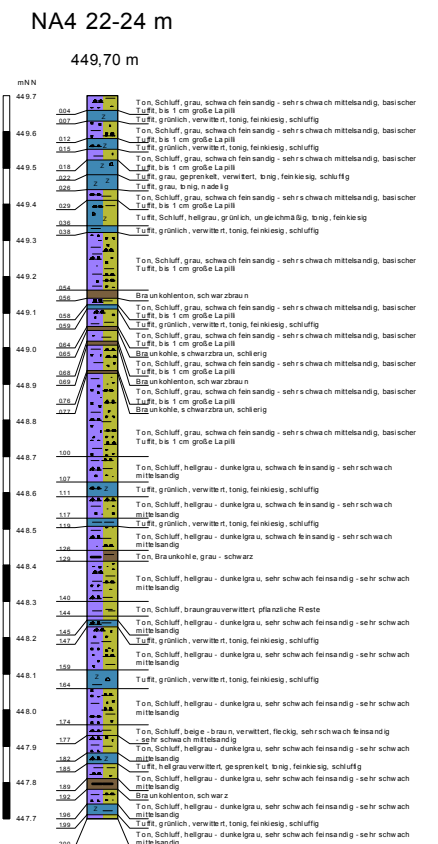
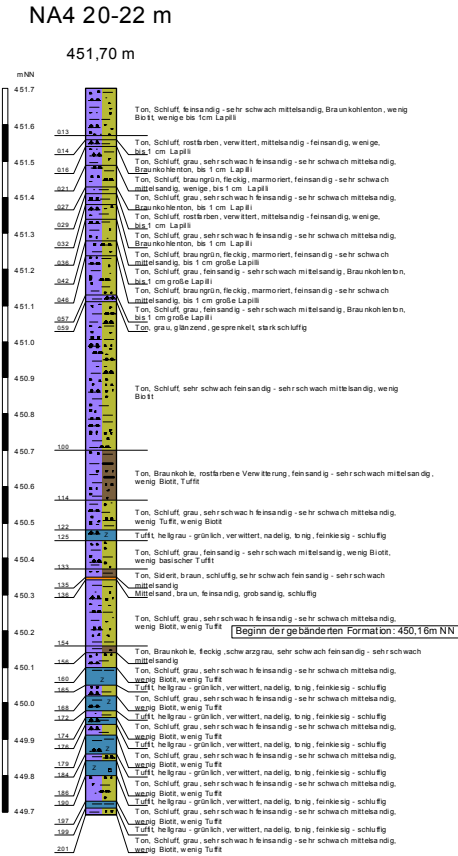
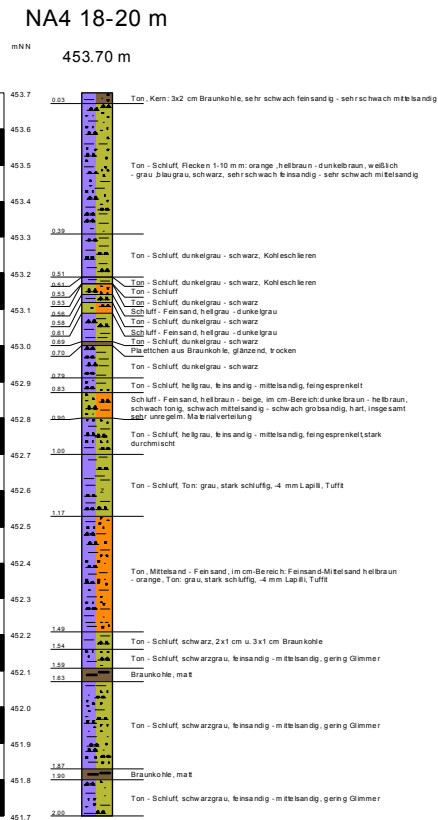
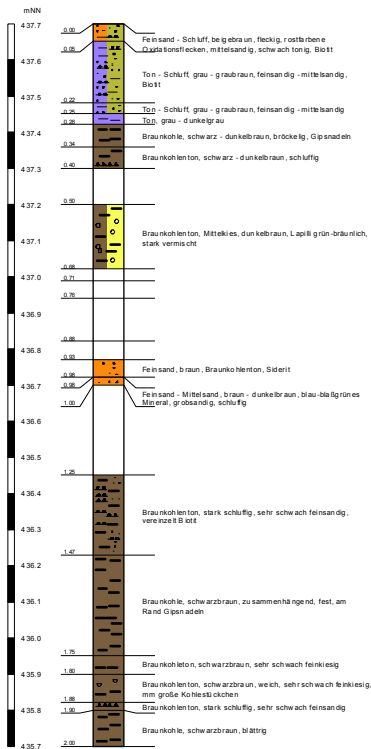


Abb. 6.2.3: Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (18 - 26 m)



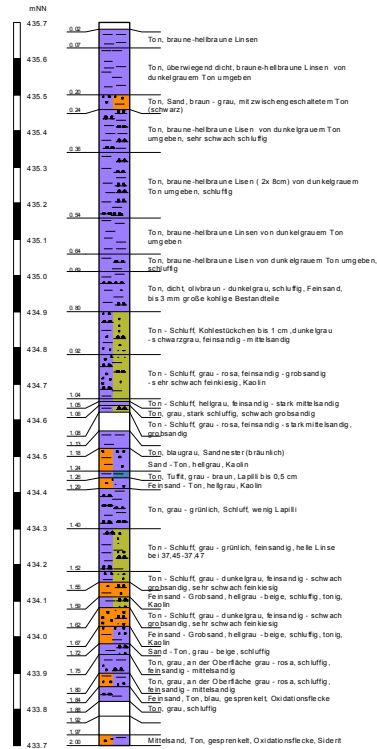
NA4 34-36 m

437,70 m



NA4 36-38 m

435,70 m



NA4 38-38,40 m

433,70 m

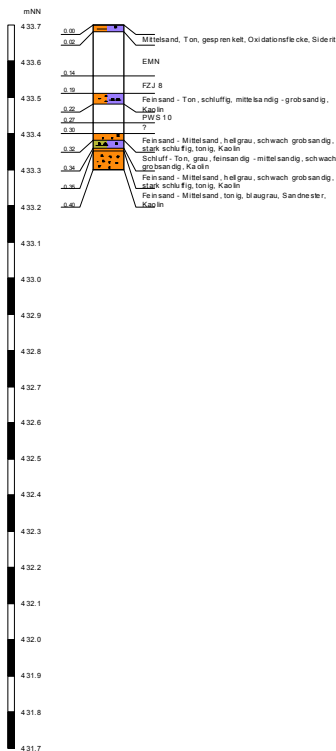


Abb. 6.2.5: Detaillierte Bohrkernbeschreibung der Bohrung NA4 (34 - 38,40 m)

**Tab. 6.2.1:** Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 1)

Tiefe [m]	Bez.	Al [mg/kg]	B [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Ce [mg/kg]	Co [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]
3,74		70.270	13.226	6095	24.247	246	48		260
4,35									
6,84		79.874	11.711	2.606	20.975	199	52		386
8,60		115.382	588	705	8.002	120	10		170
11,70		13.383	8.621	154	10.335	21	6		
17,18		43.650	2.004	255	16.666	54	7		20
19,30		78.850	2.425	468	15.468	168	58		273
19,35		86.152	7.289	2.008	14.415	195	86		264
20,30		72.033	2.043	528	15.294	187	54		270
21,25		95.980	6.471	2.071	17.225	200	22		108
25,00		26.592	66	281	22.637	99	16		55
26,87		65.533	10.050	331	23.360	151	105		366
32,50									
32,69		81.794	41.298		15.071				
33,30	PWS1	78.666	1.727	385	13.687	215	73	386	232
33,76		78.250	1.756	541	12.307	155	114	142	441
34,20		69.174	1.185	830	11.818	111	76	137	297
34,32		9.115		166	9.245	23	13	167	94
34,59		81.865	1.273	571	12.008	167	41		163
34,73	PWS2	98.944	619	421	7.719	100	51		182
34,90	PWS3	74.516	411	460	12.445	209	81	3.470	151
35,49		13.373		223	14.157	120	10	225	120
35,86		53.746		566	7.064	45	17	113	119
36,02	PWS4	77.987	182	372	5.535	90	40		169
36,41	PWS5	98.879	1.494	438	6.623	133	85	1.003	276
36,51		97.392	4.880	505	4.818	30	36	97	194
36,66	PWS6	91.778	234	433	5.763	126	57	122	184
37,20	PWS7	78.473	69	433	3.990	79	29	115	103
37,52		90.115	9.758	311	1.933	109	12	66	56
37,61		93.925	10.581	433	4.777	192	18		114
37,69	PWS8	95.874	490	185	2.013	91	41	48	105
37,94	PWS9	91.117		258	7.589	148	39	94	120
38,20									
38,24	PWS10	8.9120		329	3.216	66	29	19	27
38,32		100.900	22.622	636	2.677	145	16	100	69



**Tab. 6.2.2:** Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 2)

Tiefe [m]	Bez.	Fe [mg/kg]	K [mg/kg]	La [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	Na [mg/kg]	Nd [mg/kg]
3,74		11.4479		133	1.3216	3.257	22	9.243	93
4,35									
6,84		87.220	10.368	102	11.327	2.199	5	8.708	84
8,60		6.1703	7.264	55	6.967	2.147	5	2.096	46
11,70		371.012		12	6.420	14.202	5	4.327	12
17,18		254.380		30	7.376	9.387	4	880	23
19,30		83.606	8.136	81	16.509	1.319	10	1.231	70
19,35		47.375	7.689	100	10.154	421	15	5.212	79
20,30		75.213	6.800	91	13.919	1.185	9		76
21,25		27.725	13.900	112	14.014	290	5	4.225	69
25,00		322.312		60	9.781	13.890	7		38
26,87		111.087		70	14.187	2.978	5	4.807	70
32,50									
32,69		76.450	10.294		10.962	1.779		25.592	
33,30	PWS1	84.850	6.203	108	11.411	5.654		934	91
33,76		37.643	4.958	85	7120	156	24		181
34,20		45.156	8.542	75	6.604	455	12	811	47
34,32		45.981		13		175	72		91
34,59		71.346	57.269	87	8.096	1.212	25	1.326	72
34,73	PWS2	47.236	9.302	52	5.927	2.755		176	26
34,90	PWS3	41.358	8.778	105	7.054	2.356	365	785	79
35,49		64.263	2.594	52	1.312	344	27		292
35,86		89.060	5.936	28	865	234	16		45
36,02	PWS4	97.977	7.792	76	2.606	4.772			51
36,41	PWS5	43.371	12.328	86	1.787	2.297	391	903	66
36,51		26.004	11.857	38		122	15	2.940	73
36,66	PWS6	70.447	9.750	84	2.149	3.769	92		61
37,20	PWS7	22.821	8.668	59	1.335	1.111	126		32
37,52		15.440	10.117	46		154	8	5.929	134
37,61		21.170	6.391	76	3.304	450	11	5.589	70
37,69	PWS8	34.646	7.203	59	2.089	1.754			69
37,94	PWS9	45.501		82	3.599	2.851			64
38,20									
38,24	PWS10	34.055	10.908	27	2.745	1.750			10
38,32		21.292	14.763	68	1.434	339	8	13.830	96

**Tab. 6.2.3:** Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 3)

<b>Tiefe</b> [m]	<b>Bez.</b>	<b>Ni</b> [mg/kg]	<b>Pb</b> [mg/kg]	<b>Pr</b> [mg/kg]	<b>S</b> [mg/kg]	<b>Sm</b> [mg/kg]	<b>Sr</b> [mg/kg]	<b>Th</b> [mg/kg]	<b>Ti <sup>1)</sup></b> [mg/kg]
3,74		180	42	30	2.251	16	873	29	79.614
4,35									24.840
6,84		55	49	23	3.153	14	648	31	88.736
8,60		35	61	14		10	213	35	28.434
11,70		38	19	4		4		18	1.113
17,18		29	33	7		5	27	22	7.436
19,30		63	42	20	10.474	12	255	31	96.569
19,35		71	51	24	13.281	13	334	34	99.880
20,30		65	38	22	8.366	13	243	29	94.510
21,25		50	32	22		11	1.044	43	71.569
25,00		66	23	11		6	84	22	13.706
26,87		46	26	20		12	106	28	106.982
32,50									33.550
32,69					6.544		251		27.730
33,30	PWS1	407	807	29	6.929	19	305	24	15.180
33,76		161	39	28	14.149	19	113	29	164.939
34,20		77	22	14	7.450	8	528	19	110.389
34,32		68	8	7	60.245	38		17	8.587
34,59		53	39	21	38.558	13	197	33	69.058
34,73	PWS2	128	401	12	16.564	14	235	19	9.683
34,90	PWS3	1.762	7.677	27	14.533	21	346	24	13.830
35,49		94	22	18	84.356	13		13	3.615
35,86		29	33	9	97.906	6		21	14.772
36,02	PWS4	95	145	18	75.626	17	184	24	6.599
36,41	PWS5	1.566	186	22	22.397	26	245	29	12.780
36,51		63	56	13	19.325	8		24	63.715
36,66	PWS6	199	54	21	49.955	14	236	27	13.410
37,20	PWS7	70		14	2.860	15	227	13	12.080
37,52		46	38	14	1.197	10		31	34.319
37,61		36	47	20	1.062	13	96	32	34.750
37,69	PWS8	114		24	4.006	170	86	19	9.650
37,94	PWS9	89	194	23	4.818	23	220	21	27.720
38,20									17.770
38,24	PWS10	46	217	9	1.853	12	215	13	19.000
38,32		57	46	20		12		33	63.718

<sup>1)</sup> Normalschrift = mit verbessertem Standard neu gemessene Proben, übrige Proben kursiv

**Tab. 6.2.4:** Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 4)

Tiefe [m]	Bez.	U [mg/kg]	Zn [mg/kg]	TC [%]	Li [mg/kg]	V [mg/kg]	Sn [mg/kg]	Eu [mg/kg]	Gd [mg/kg]
3,74		14	204	1,804					
4,35				1,327					
6,84		14	310						
8,60		18	272	2,273					
11,70		12	98	9,957					
17,18		13	237	2,387					
19,30		16	170	7,8					
19,35		26	279	2,84					
20,30		14	155	2,142					
21,25		16	175	0,145					
25,00		12	328	8,484					
26,87		13	209	2,304					
32,50				1,688					
32,69				1,925					
33,30	PWS1	22	486		50	3.612	240	26	21
33,76		32	322	1,267					
34,20		11	131	0,796					
34,32		23	62	50,8					
34,59		25	199	8,669					
34,73	PWS2	27	126		93	3.082	259	23	16
34,90	PWS3	28	505		49	2.420	228	27	25
35,49		31	88	46,36					
35,86		5	141	25,06					
36,02	PWS4	31	161		74	3.114	199	25	17
36,41	PWS5	31	767		91	3.083	209	25	18
36,51		33	182	1,631					
36,66	PWS6	34	919		88	2.037	171	24	19
37,20	PWS7	66	189		133	2.235	226	22	15
37,52		117	102	0,336					
37,61		67	164	0,322					
37,69	PWS8	117	112		123	1.873	235	26	16
37,94	PWS9	176			94	2.404	240	23	25
38,20				0,264					
38,24	PWS10	215			88	1.517	198	19	13
38,32		126	100	0,338					

**Tab. 6.2.5:** Ergebnisse der ICP-Analytik an Sedimentproben der Bohrung NA4 (Teil 5)

Tiefe [m]	Bez.	Dy [mg/kg]	Ho [mg/kg]	Er [mg/kg]	Yb [mg/kg]	Lu [mg/kg]	Hf [mg/kg]	Tl [mg/kg]	Sb [mg/kg]
3,74									
4,35									
6,84									
8,60									
11,70									
17,18									
19,30									
19,35									
20,30									
21,25									
25,00									
26,87									
32,50									
32,69									
33,30	PWS1	17	28	8,6	40	14	173	13	21
33,76									
34,20									
34,32									
34,59									
34,73	PWS2	14	31	5,8	45	14	192	15	23
34,90	PWS3	18	27	6,8	40	14	177	14	19
35,49									
35,86									
36,02	PWS4	13	31	7,7	46	14	182	15	24
36,41	PWS5	15	28	7,8	41	14	169	16	24
36,51									
36,66	PWS6	14	29	7,1	42	14	197	14	22
37,20	PWS7	13	29	7,2	43	13	182	14	20
37,52									
37,61									
37,69	PWS8	17	30	7,2	42	13	180	16	24
37,94	PWS9	16	28	6,6	41	11	166	15	28
38,20									
38,24	PWS10	10	23	5,8	32	12	141	13	19
38,32									

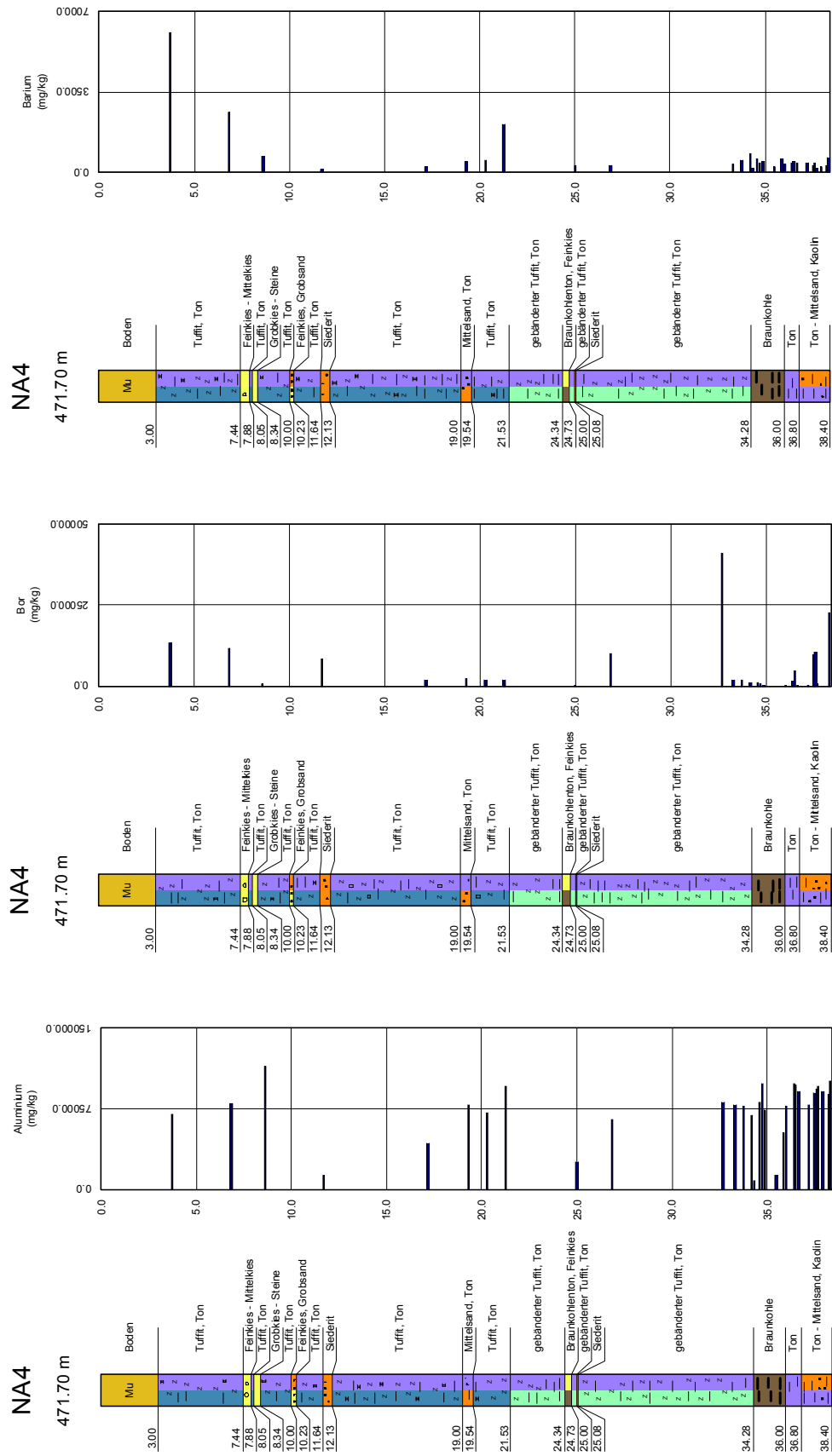


Abb. 6.2.6: Al- (links), B- (Mitte) und Ba- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

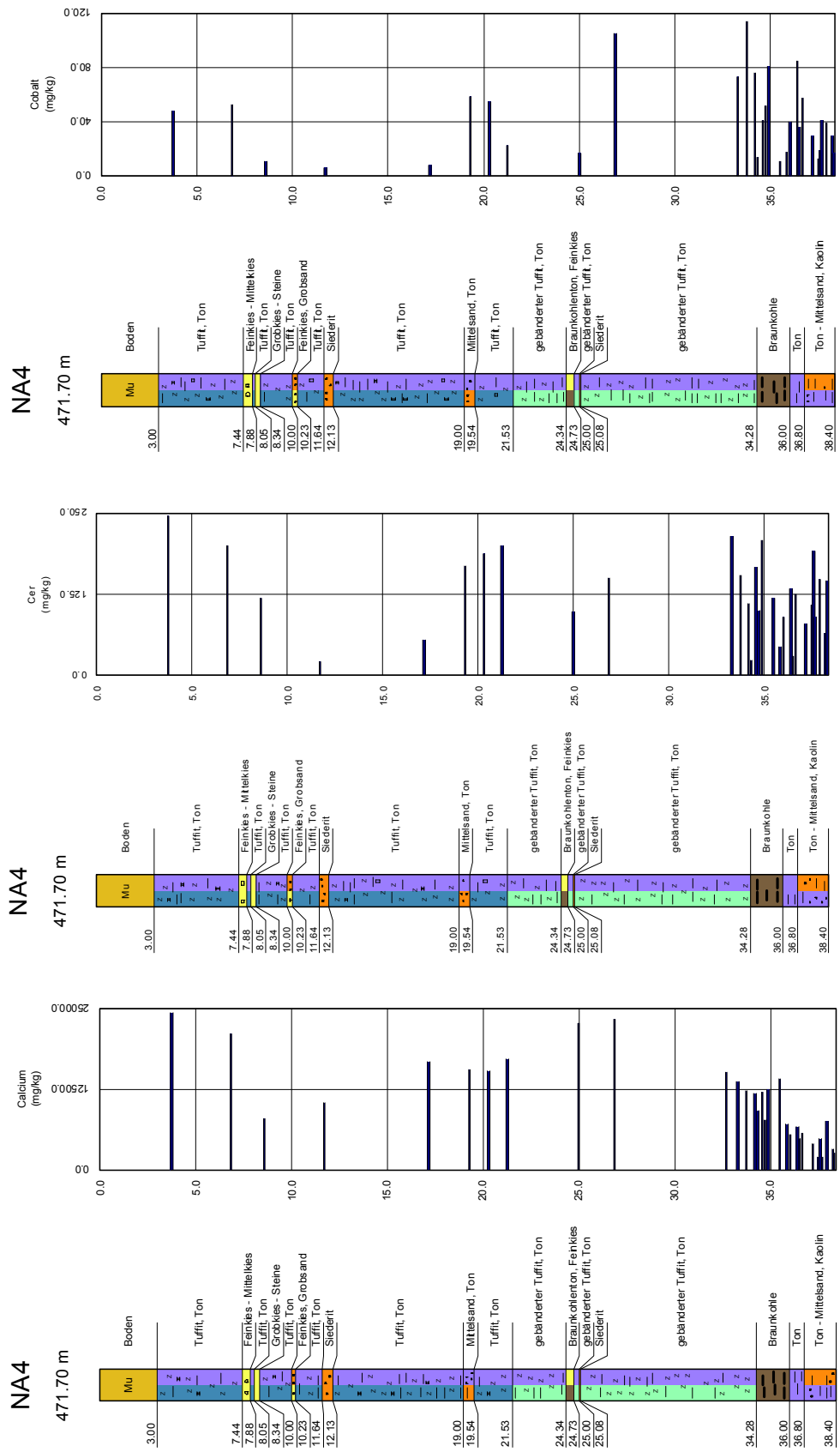


Abb. 6.2.7: Ca- (links), Ce- (Mitte) und Co- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

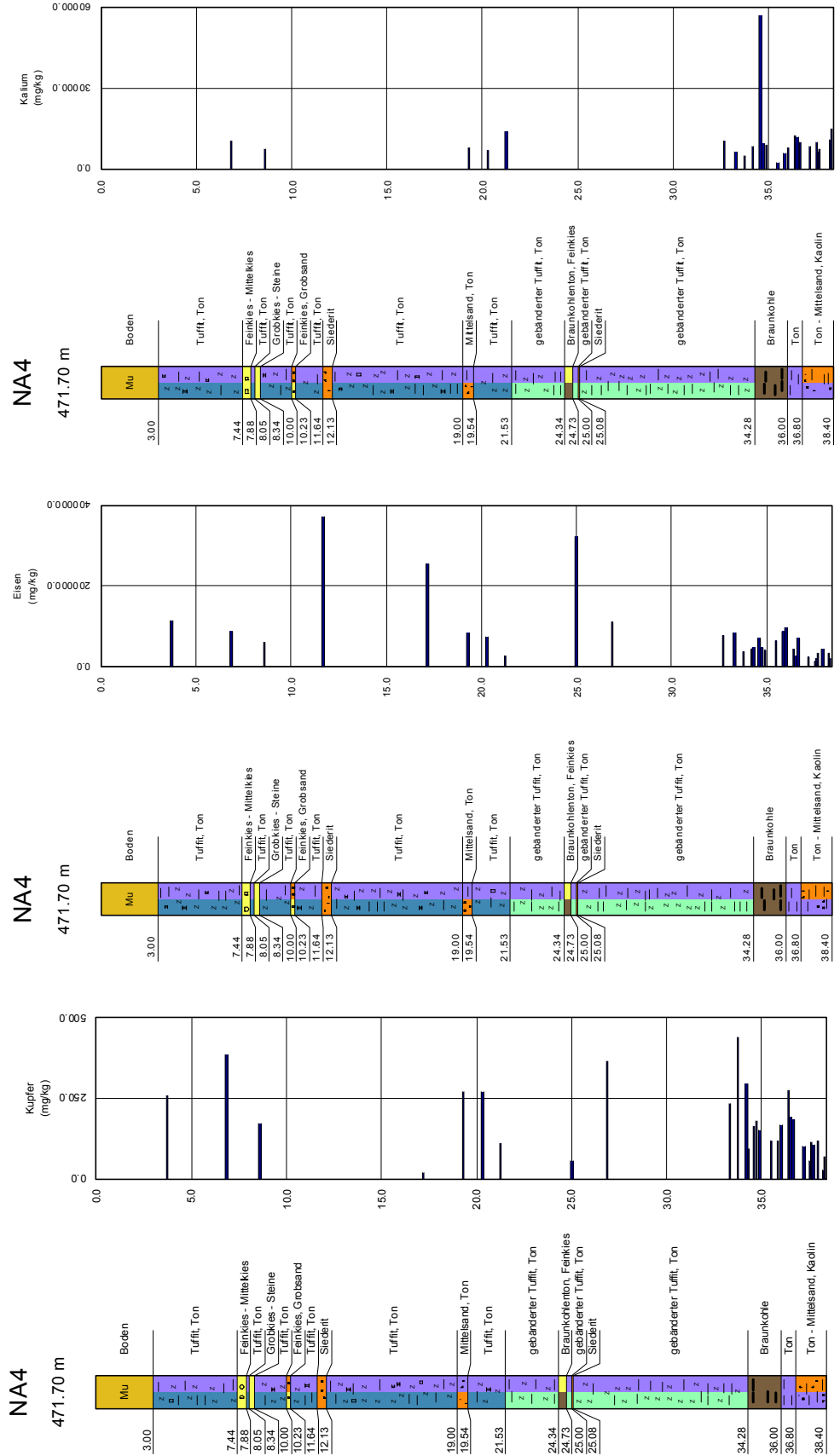


Abb. 6.2.8: Cu- (links), Fe- (Mitte) und K- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

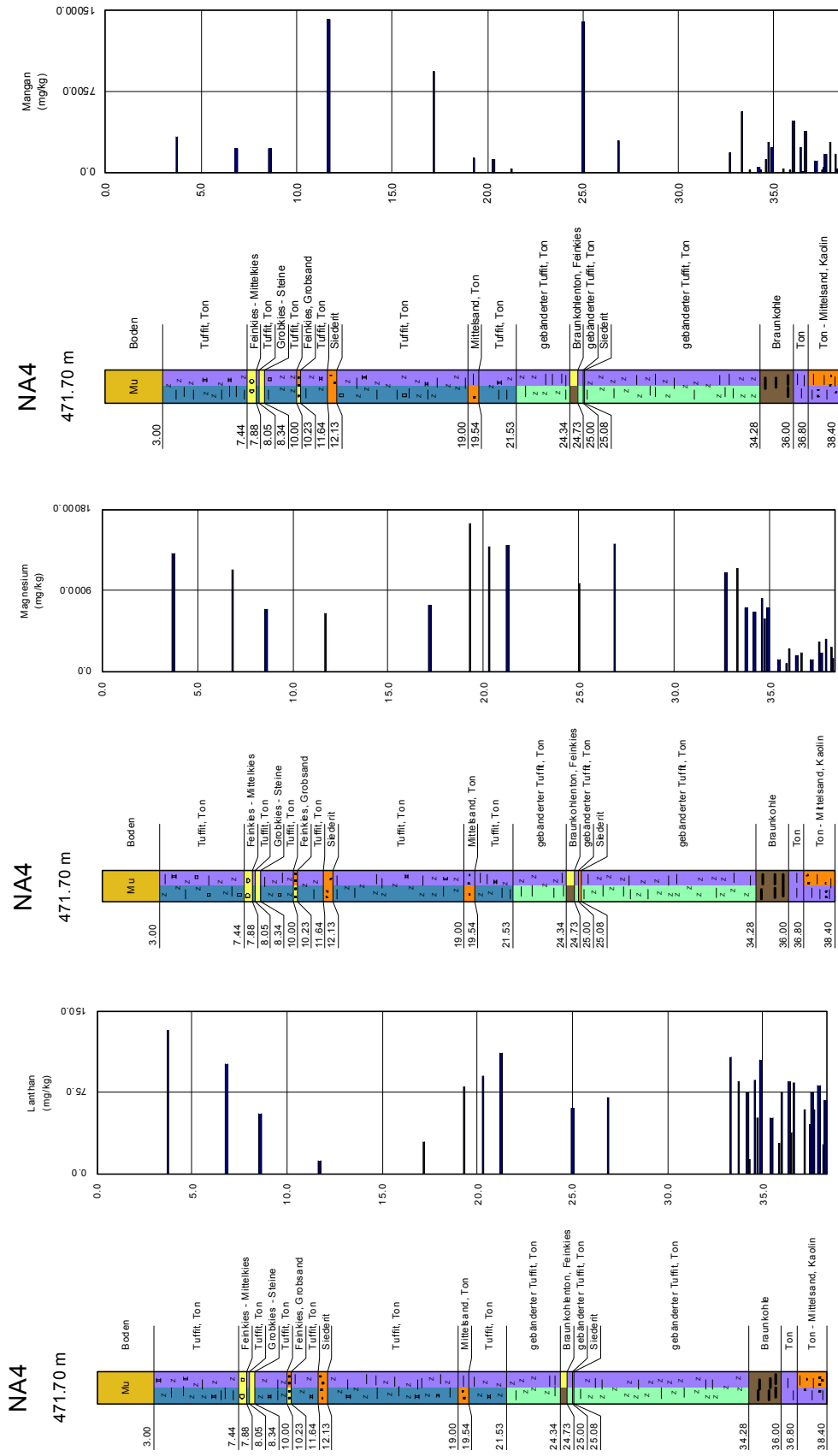


Abb. 6.2.9: La- (links), Mg- (Mitte) und Mn- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie



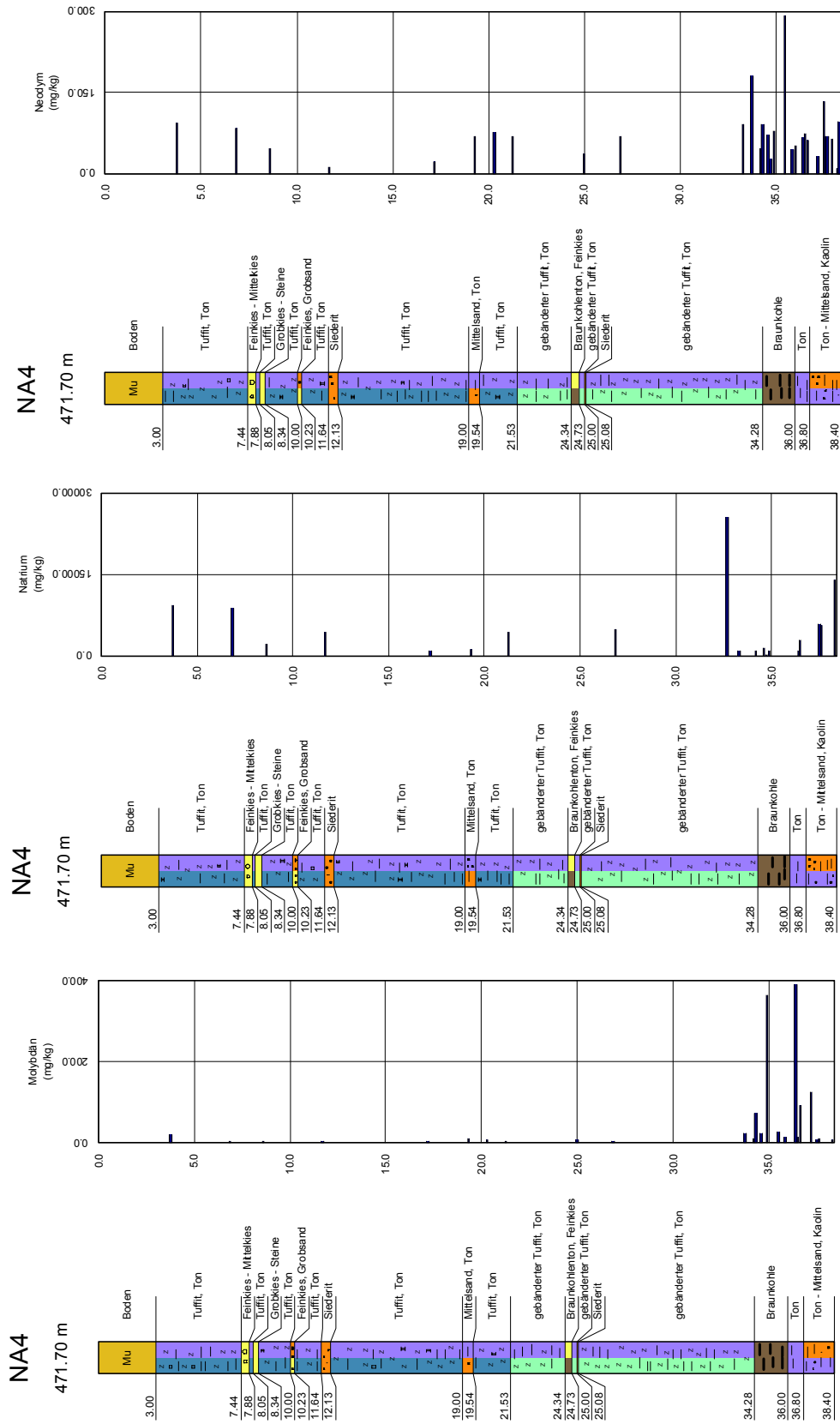


Abb. 6.2.10: Mo- (links), Na- (Mitte) und Nd- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

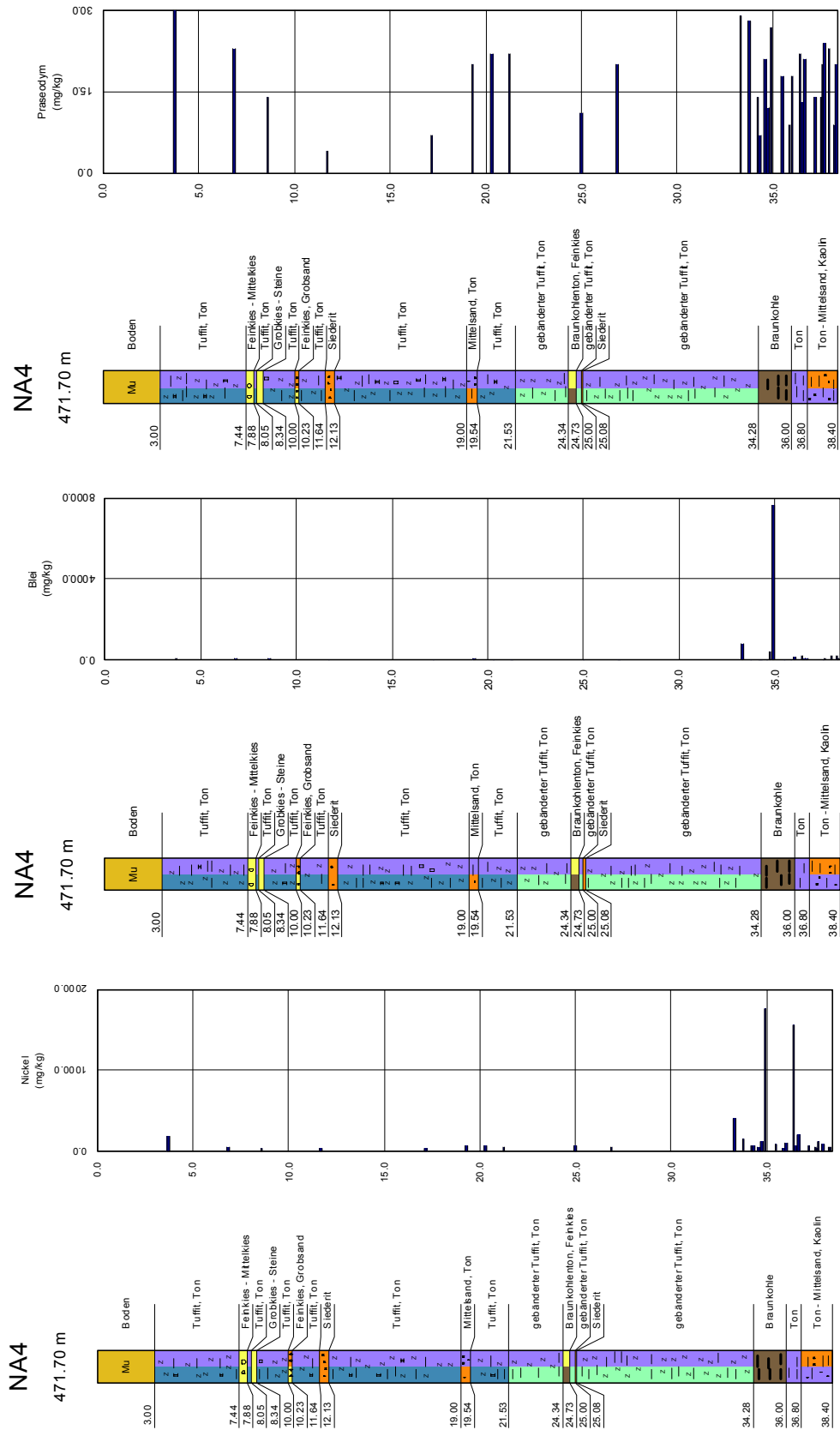


Abb. 6.2.11: Ni- (links), Pb- (Mitte) und Pr-Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

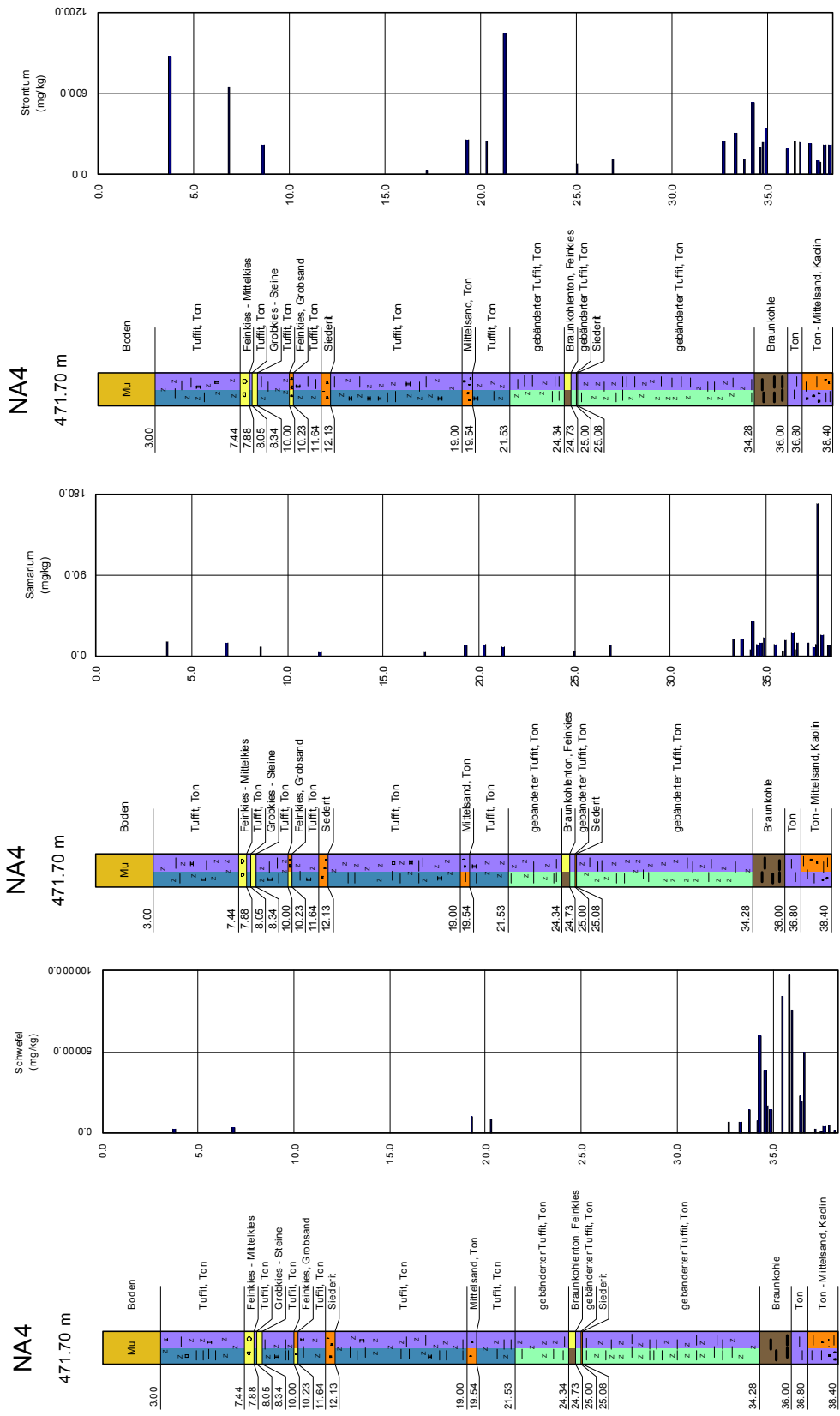


Abb. 6.2.12: S- (links), Sm- (Mitte) und Sr- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

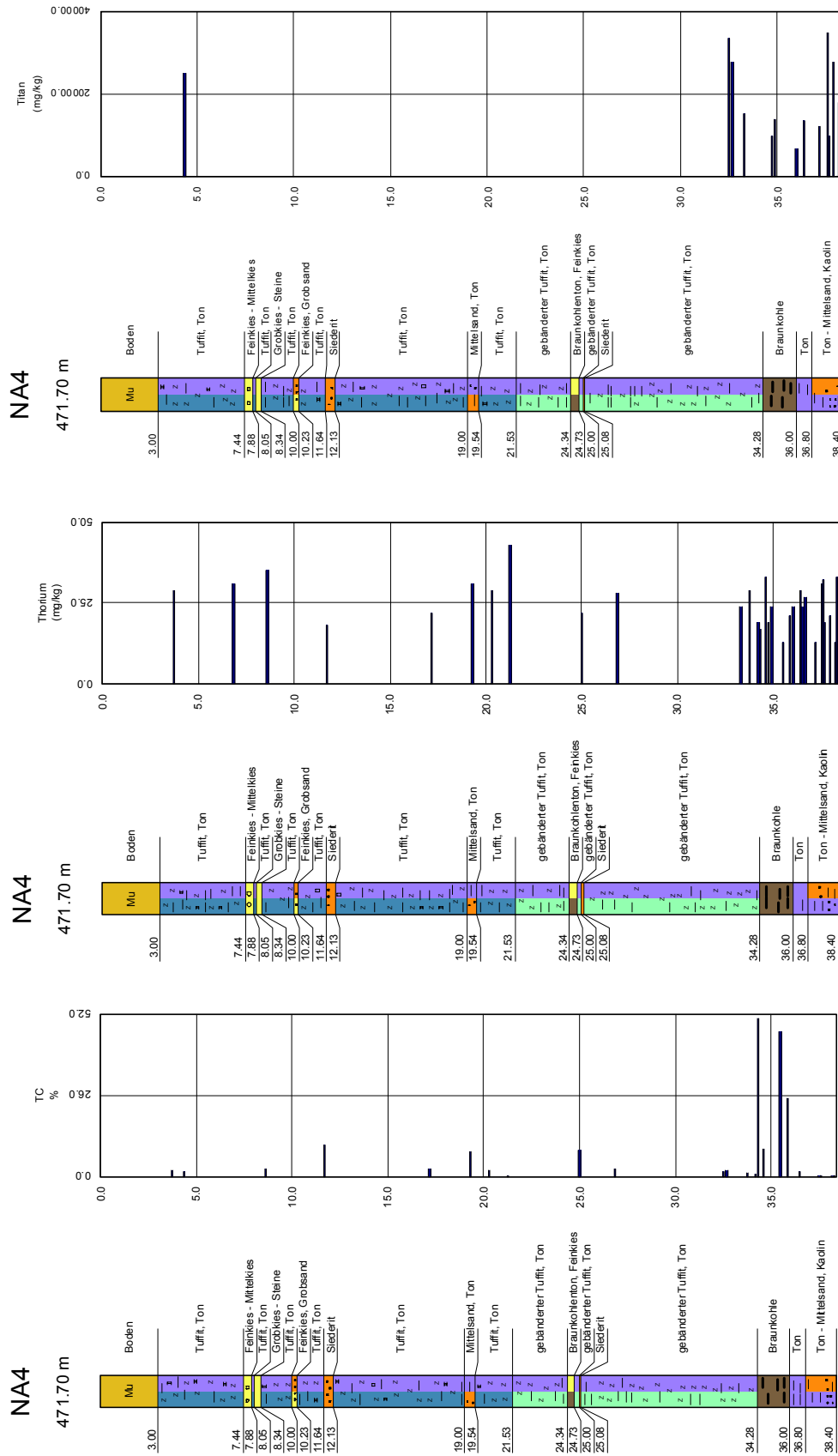


Abb. 6.2.13: TC- (links), Th- (Mitte) und Ti- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

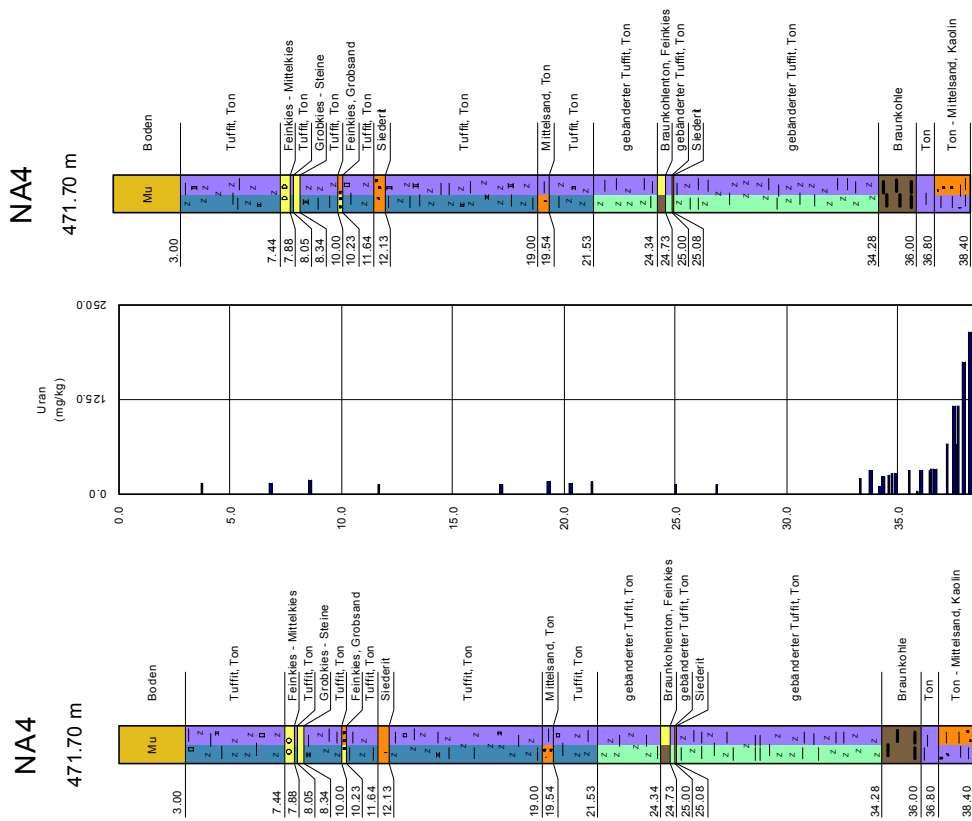
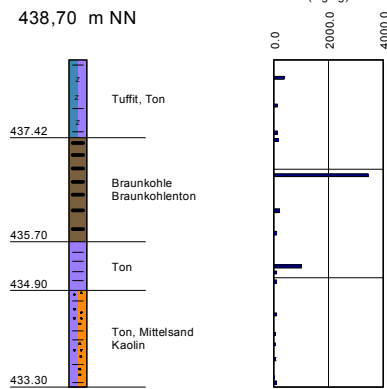
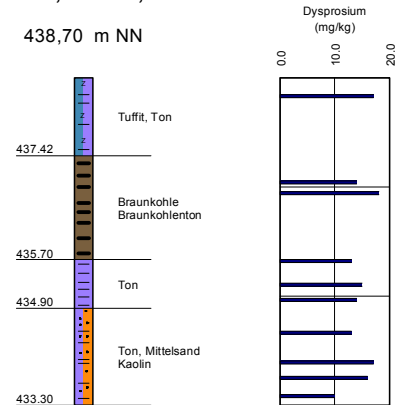


Abb. 6.2.14: U- (links) und Zn- (rMitte) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m

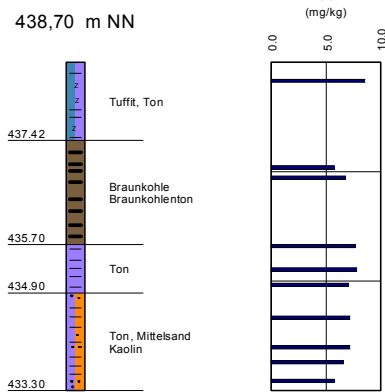


NA4 33,00-38,40 m

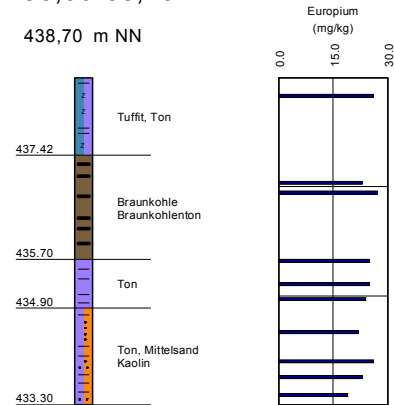


**Abb. 6.2.15:** Cr- (links) und Dy- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m

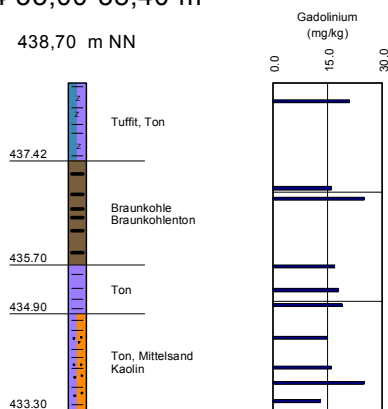


NA4 33,00-38,40 m

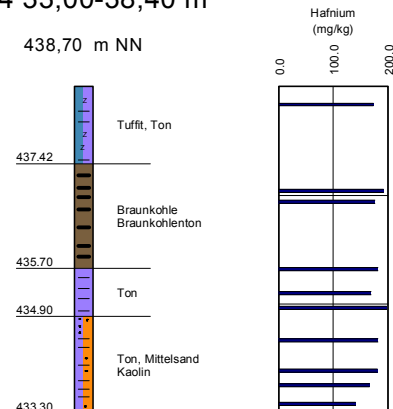


**Abb. 6.2.16:** Er- (links) und Eu- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m



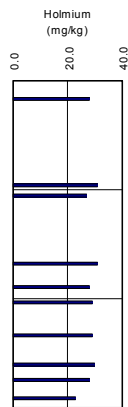
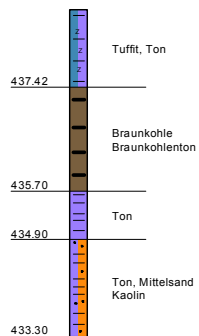
NA4 33,00-38,40 m



**Abb. 6.2.17:** Gd- (links) und Hf- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN



NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN

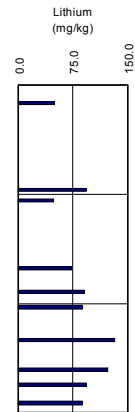
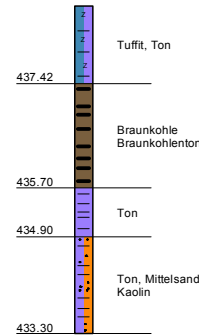
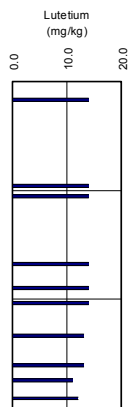
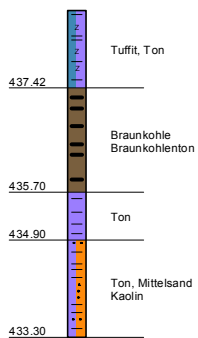


Abb. 6.2.18: Ho- (links) und Li- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN



NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN

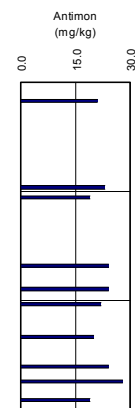
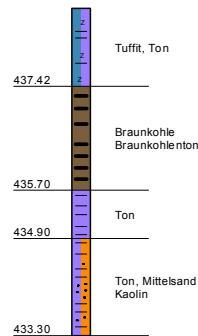
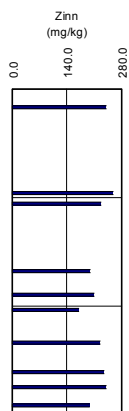
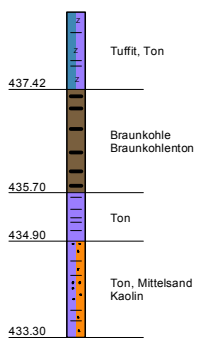


Abb. 6.2.19: Lu- (links) und Sb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN



NA4 33,00-38,40 m

438,70 m NN

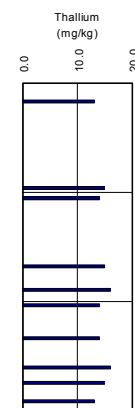
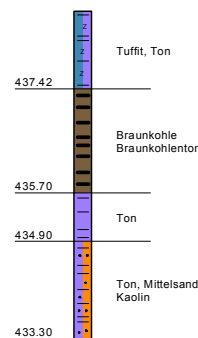
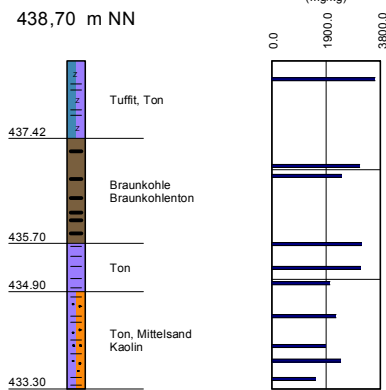


Abb. 6.2.20: Sn- (links) und Tl- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

NA4 33,00-38,40 m



NA4 33,00-38,40 m

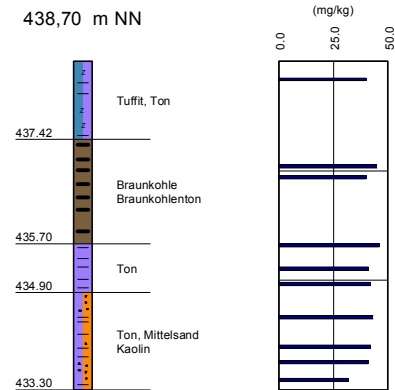


Abb. 6.2.21: V- (links) und Yb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA4 in Korrelation zur Lithologie

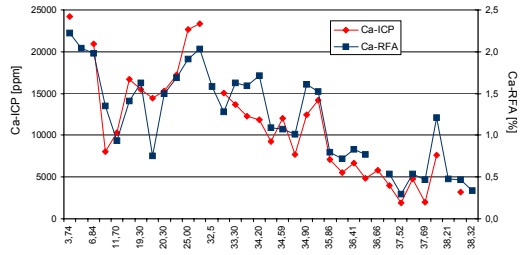
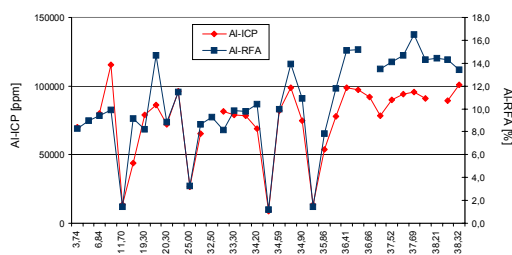


Abb. 6.2.22: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Al; rechts: Ca)

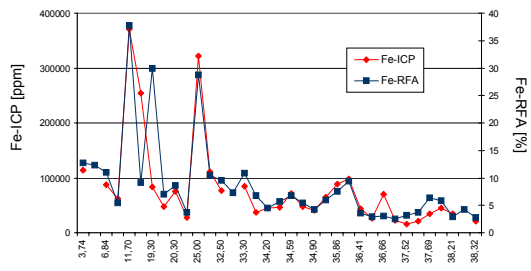
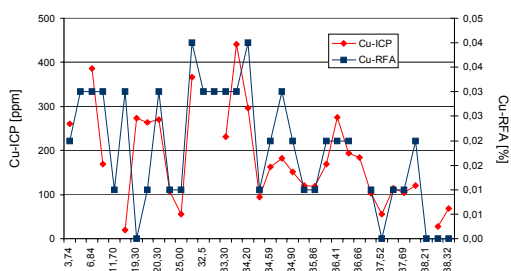
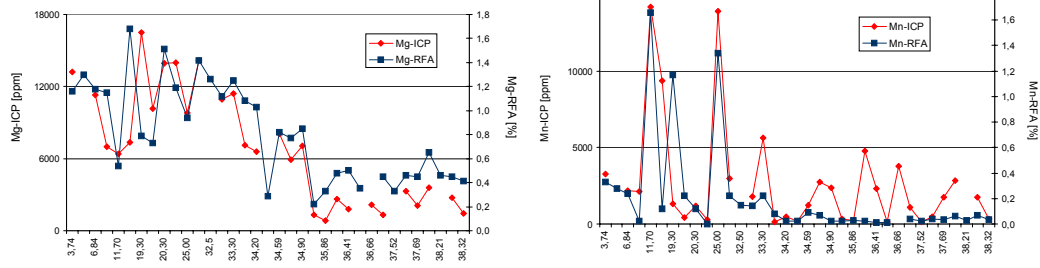
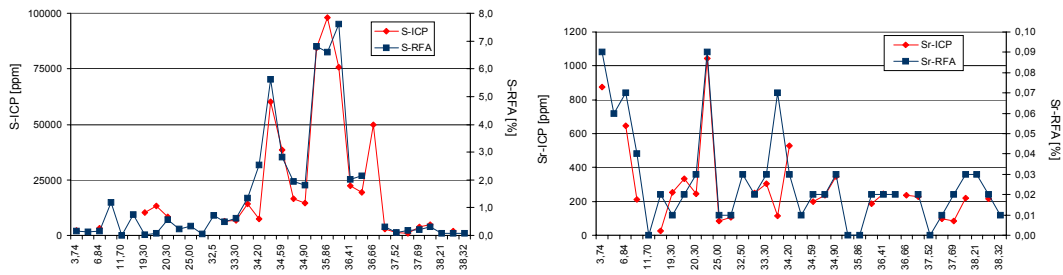


Abb. 6.2.23: Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Cu; rechts: Fe)

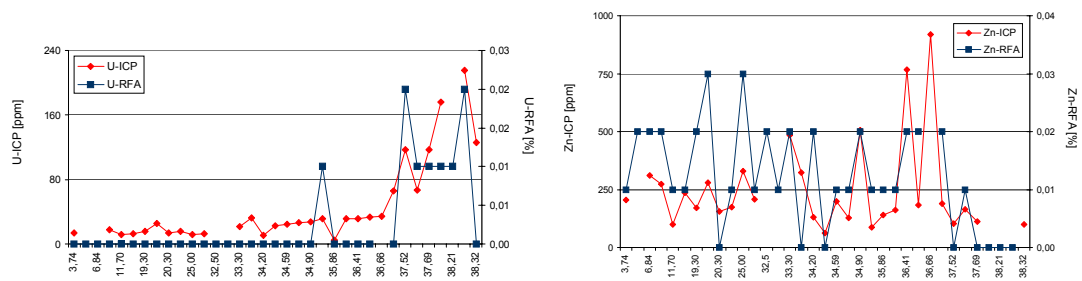




**Abb. 6.2.24:** Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: Mg; rechts: Mn)



**Abb. 6.2.25:** Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: S; rechts: Sr)



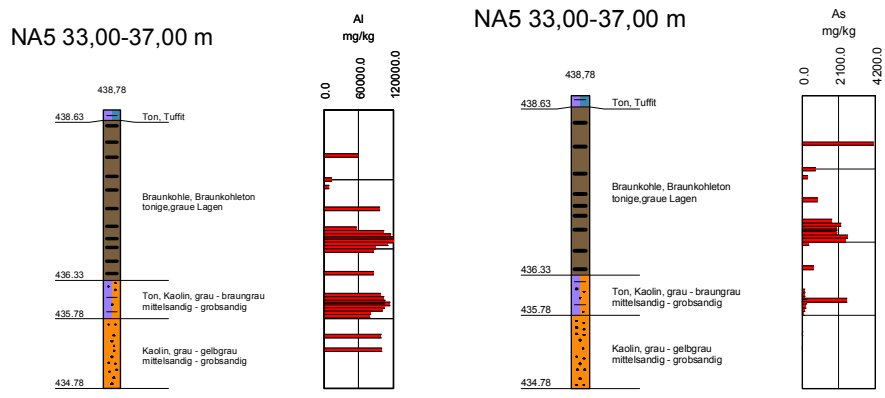
**Abb. 6.2.26:** Gegenüberstellung von RFA- und ICP-Analysen an Sedimentproben des Bohrkerns NA4 (links: U; rechts: Zn)



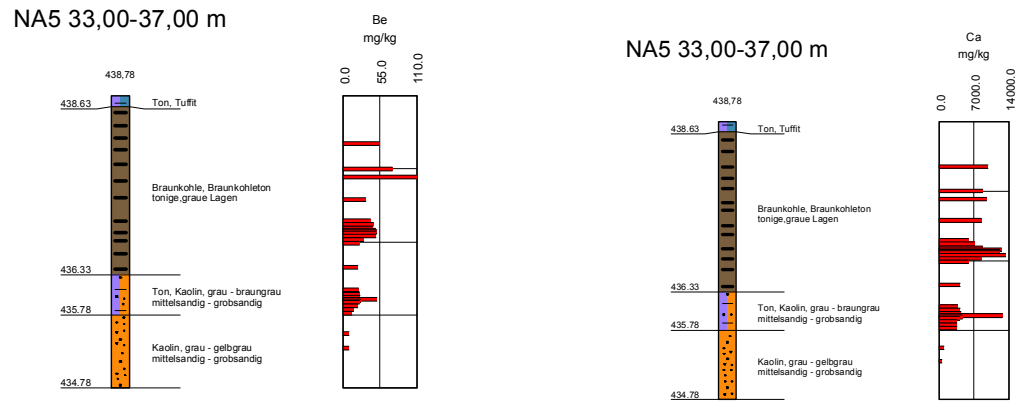




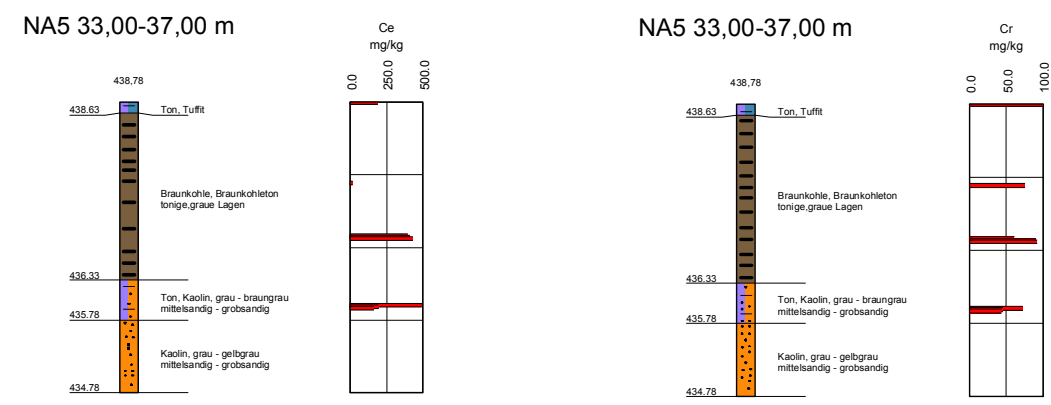
Mineral	Chem. Formel	03.71-03.78	04.33-04.37	06.81-06.86	08.57-08.63	11.64-11.75	17.15-17.22	19.30-19.35a	19.30-19.35b	20.26-20.35	21.22-21.28	25.00-25.10	26.86-26.89	32.45-32.55	32.64-32.73	33.28-33.33	33.74-33.78	34.18-34.22	34.30-34.34	34.50-34.68	34.71-34.76	34.88-34.93	35.47-35.51	35.84-35.88	36.02-36.07	36.39-36.44	36.49-36.54	36.64-36.69	37.18-37.23	37.50-37.55	37.55-37.67	37.67-37.72	37.92-37.97	38.19-38.22	38.22-38.27	38.30-38.35	NA5-CC3	NA5-CC4	Granite VR	K.Granite Hal	Basalt Hal	Basalt Rup								
Ba-U-Oxide	Ba <sub>3</sub> UO <sub>6</sub> (U.VI)																																																	
Fourmarierite	PbU <sub>4</sub> O <sub>13</sub> 4H <sub>2</sub> O (U.VI)																																																	
Na-U-Oxide	Na <sub>2</sub> UO <sub>4</sub> (U.VI)																																																	
Schoepite	UO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O (U.VI)																																																	
Uraninite	UO <sub>2.25</sub> (U.IV)																			X																														



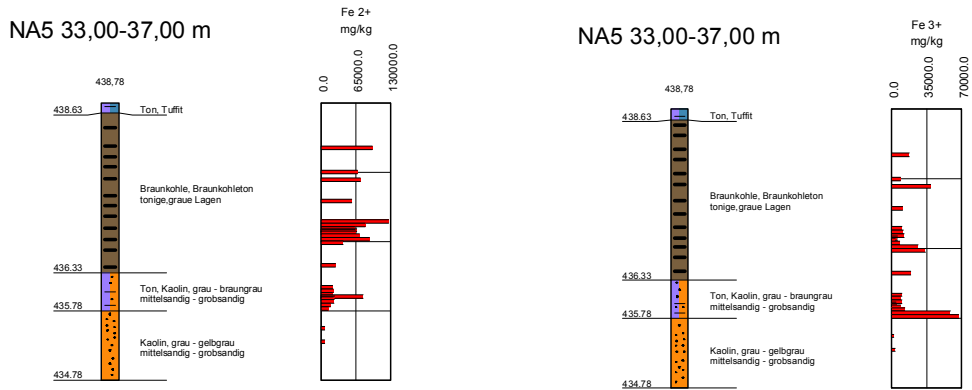
**Abb. 6.2.27:** Al- (links) und As- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie



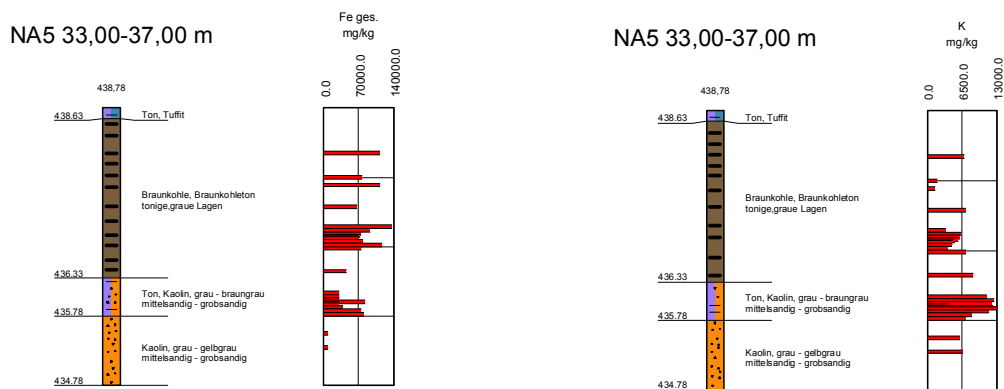
**Abb. 6.2.28:** Be- (links) und Ca- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie



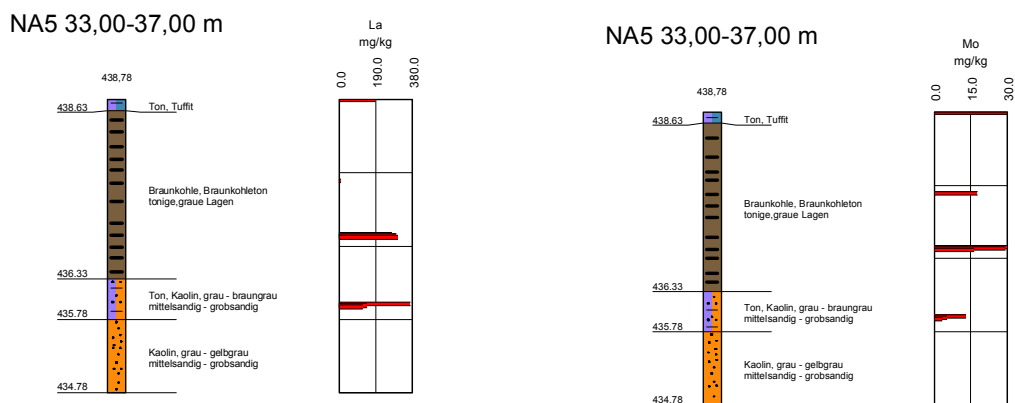
**Abb. 6.2.29:** Ce- (links) und Cr- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie



**Abb. 6.2.30:** Fe<sup>2+</sup>- (links) und Fe<sup>3+</sup>- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

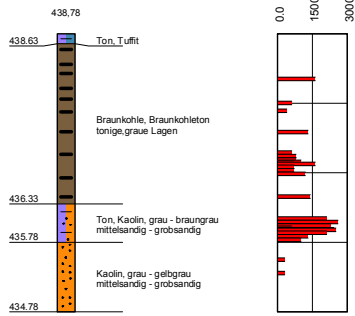


**Abb. 6.2.31:** Fe<sub>ges</sub>- (links) und K- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

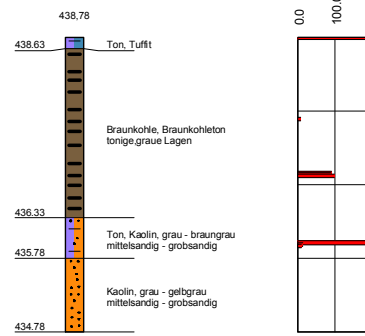


**Abb. 6.2.32:** La- (links) und Mo- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

NA5 33,00-37,00 m

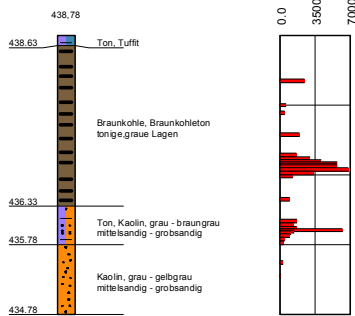


NA5 33,00-37,00 m

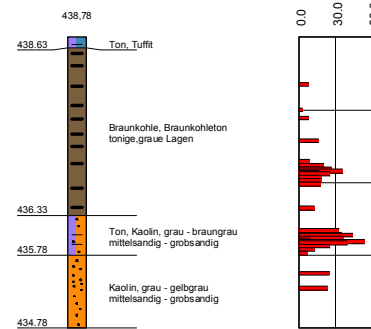


**Abb. 6.2.33:** Na- (links) und Ni- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

NA5 33,00-37,00 m

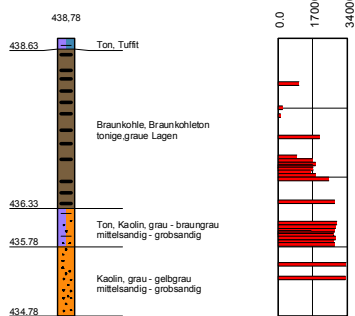


NA5 33,00-37,00 m

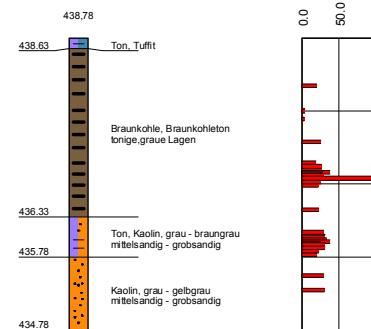


**Abb. 6.2.34:** P- (links) und Pb- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

NA5 33,00-37,00 m



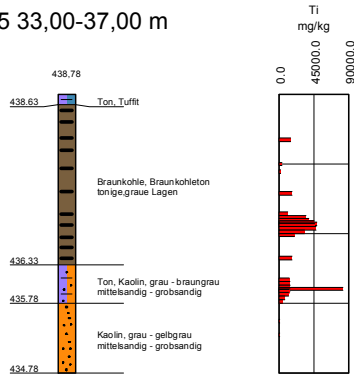
NA5 33,00-37,00 m



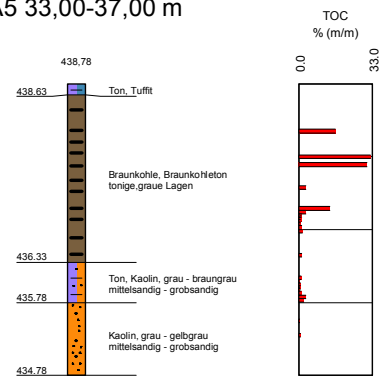
**Abb. 6.2.35:** Si- (links) und Th- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie



NA5 33,00-37,00 m

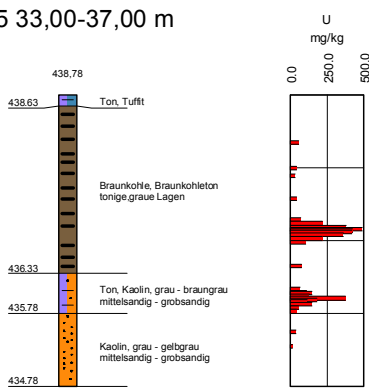


NA5 33,00-37,00 m

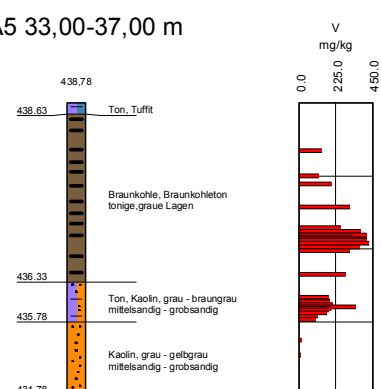


**Abb. 6.2.36:** Ti- (links) und TOC- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

NA5 33,00-37,00 m

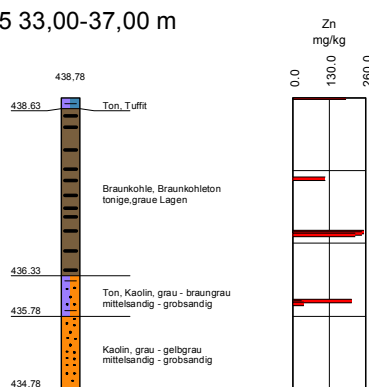


NA5 33,00-37,00 m



**Abb. 6.2.37:** U- (links) und V- (rechts) Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

NA5 33,00-37,00 m



**Abb. 6.2.38:** Zn-Gehalte von Sedimentproben der Bohrung NA5 in Korrelation zur Lithologie

**Tab. 6.2.7: Ergebnisse der Elementanalysen an Grund- und Oberflächenwasser [mg/l - sofern nicht anders angegeben]**

**a) Oberflächenwasser**

	Datum	Al	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	La	Na	Ni	P	Pb	S	SO <sub>4</sub>
VR1-OW1	30.06.99	0,147	0,037	0,025	25,8	0,020		0,075			7,1	0,066	6,91	0,008			8,6	0,349		0,079	11,2	34
VR2-OW1	30.06.99	0,169	0,042	0,031	24,7	0,032		0,085		0,087	5,8	0,068	5,58	0,012			7,5	0,447		0,072	15,7	47
RT1-OW1	30.06.99	0,201	0,076	0,040	39,7	0,029		0,102		0,007	28,7	0,087	13,66	0,007			17,6	0,364		0,056	28,4	85

	Datum	Sr	Th	Ti	U	V	Zn	Zr	Cl	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	C <sub>ges</sub>	TIC
VR1-OW1	30.06.99	0,140		0,122	0,0009	0,007	0,015	0,024	13,1		3,95				
VR2-OW1	30.06.99	0,136		0,116	0,0006	0,013	0,035	0,015	11,9	11,9	0,09				
RT1-OW1	30.06.99	0,242		0,164	0,0090	0,018	0,016	0,021	34,8	8,7	3,42				

**b) Grundwassermeßstelle NA4**

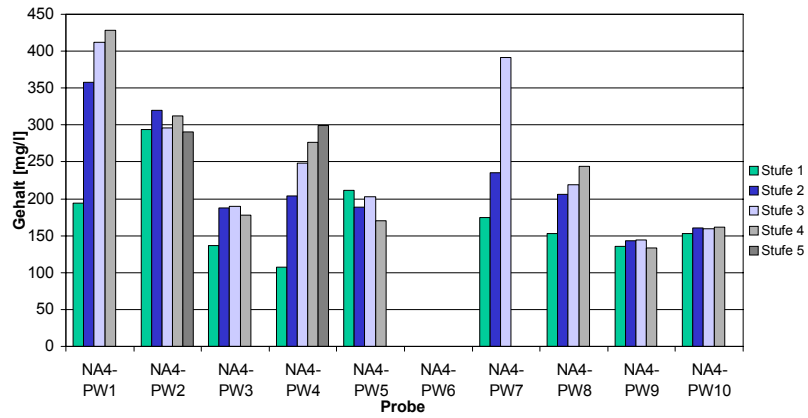
	Datum	Al	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	La	Na	Ni	P	Pb	S	SO <sub>4</sub>
NA4-M1	13.07.99	0,362	0,091	0,249	61,8	0,029		0,104		0,010	15,2	0,251	27,7	0,104			21,1	0,247		0,068	20,1	60
NA4-M2	15.07.99	0,245	0,085	0,108	37,3	0,022		0,129		0,037	14,6	0,248	17,7	0,013			179,2	0,193		0,068	42,3	127
NA4-GW1	04.08.99	0,323	0,468	0,098	54,8	0,023		0,115			13,3	0,280	24,6	0,008			25,0	0,256		0,037	9,7	29
NA4-GW2	28.09.99	0,275	0,268	0,151	54,3	0,031		0,137		0,016	13,7	0,278	24,5	0,140			23,1	0,228		0,101	7,0	21
NA4-GW3	04.11.99	0,297	0,060	1,106	55,7	0,028		0,201		0,033	13,7	0,329	24,2	0,116			26,9	0,225		0,090	7,3	22
NA4-GW4	20.01.00	0,398	0,336	0,185	52,3		0,00010	0,006		1,566	12,2	0,365	23,1	0,174			26,5	0,001	0,086		4,3	13
NA4-GW5/1	14.03.00	0,456	0,327	0,143	52,0		0,00013	0,005	0,0002	1,416	13,3	0,388	23,1	0,181			25,4	0,001	0,018		5,3	15
NA4-GW5/2	14.03.00	0,466	0,338	0,121	49,5		0,00007	0,005	0,0004	1,408	12,3	0,378	23,1	0,157			23,0	0,002	0,014		8,7	26
NA4-GW6/1	23.05.00	0,394	0,699	0,319	55,1	0,016			0,319		16,0	0,134	24,2	0,138	0,041	0,001	22,2	0,030		0,607	8,4	25
NA4-GW6/2	23.05.00	0,410	0,776		53,4				0,004		15,5	0,131	25,4	0,147	0,016	0,001	21,5			0,039	9,8	29
NA4-GW6/3	23.05.00	0,425	0,672		59,5	0,007					13,7	0,135	26,1	0,167	0,011		22,5			0,012	9,9	30
NA4-GW6/4	24.05.00	0,464	0,948	0,023	56,4				0,010		10,1	0,142	26,6	0,202	0,008		21,7				9,6	29
NA4-GW7/1	29.08.00	0,371	0,716	0,020	61,5		0,00200	0,057	0,030		18,2	0,140	26,9	0,213	0,016	0,001	24,3	0,023		0,037	9,3	28
NA4-GW7/2	29.08.00	0,384	1,583	0,002	56,2		0,00700		0,057		10,6	0,141	24,0	0,151	0,012		20,7			0,056	10,7	32
NA4-GW7/3	29.08.00	0,383	0,745		56,0		0,00100		0,069		10,7	0,135	23,3	0,073	0,014		22,1	0,037		0,060	9,7	29
NA4-GW8/1	07.11.00	0,314	2,767	0,112	54,6						18,3	0,112	25,0	0,144		0,002	29,7			0,025	8,7	26
NA4-GW8/2	07.11.00	0,399	4,321	0,093	52,0					0,011	13,1	0,120	25,2	0,235		0,002	28,2			0,024	8,3	25
NA4-GW8/3	08.11.00	0,334	5,520	0,096	50,6					0,016	13,3	0,091	24,5			0,002	23,0			0,089	8,3	25
NA4-GW8-CC	07.11.00	0,393	8,077	0,128	56,5					2,046	14,1	0,114	25,1	0,669	0,003	0,003	25,0			0,035	8,3	25
NA4-GW9/1-N	06.03.01x	0,296	0,049	0,125	52,6					2,509	13,3		25,1				23,5				4,0	12
NA4-GW9/1-N	06.03.01y	0,304	0,047	0,132	52,4					2,260	12,9		23,9				22,9				6,8	21
NA4-GW9/1-C	06.03.01	0,262	0,035	0,121	48,0					2,084	12,0		21,5				20,5				6,4	19
NA4-GW9/1-U	06.03.01	0,288	0,050	0,116	52,1					0,047	13,1		23,4				22,8				7,1	21
NA4-GW9/2-N	06.03.01x	0,278	0,041	0,119	52,9					0,534	14,6		27,6				24,2				5,2	16
NA4-GW9/2-N	06.03.01y	0,298	0,035	0,128	53,8					0,022	13,9		25,1				22,9				8,2	25
NA4-GW9/2-C	06.03.01																					
NA4-GW9/2-U	06.03.01	0,293	0,046	0,142	53,7						13,8		24,0				22,0				6,9	21
NA4-GW10	26.04.01																					
NA4-GW11	11.07.01																					
NA4-GW12	29.08.01																					

**b) Grundwassermeßstelle NA4 (Fortsetzung)**

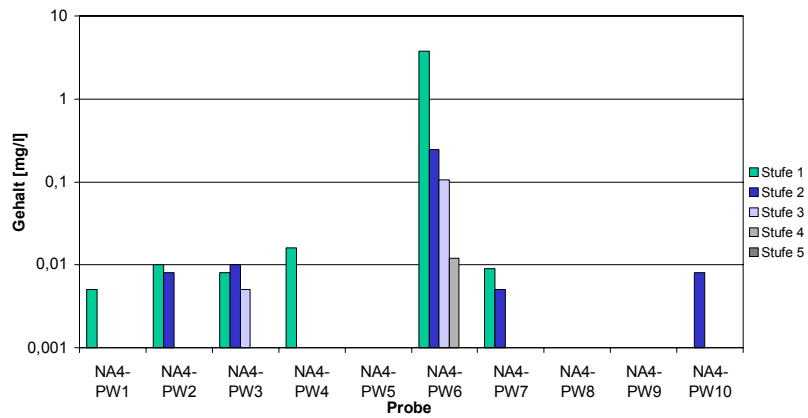
	Datum	Sr	Th	Ti	U	V	Zn	Zr	Cl	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	C <sub>ges</sub>	TIC
NA4-M1	13.07.99	0,460		0,206	0,00200	0,012	0,018	0,040	6,1	8,5	3,26				
NA4-M2	15.07.99	0,272		0,169	0,00500	0,024	0,015	0,023	169,8	4,7	2,15				
NA4-GW1	04.08.99	0,407		0,190	0,00200	0,023	0,019	0,018	3,0	3,0	1,78				
NA4-GW2	28.09.99	0,407		0,119	0,00040	0,027	0,137	0,017	4,2	12,0	1,24		341		
NA4-GW3	04.11.99	0,417		0,202	0,00100	0,046	0,032	0,020	3,8	7,9	1,97		343		
NA4-GW4	20.01.00	0,475	0,0003		0,00004	0,003	0,079		6,8			3,6	362		
NA4-GW5/1	14.03.00	0,495	0,0004		0,00006	0,0004	0,071		5,2		0,15	36,1	345		
NA4-GW5/2	14.03.00	0,493	0,0004		0,00010	0,0003	0,081		3,6			37,7	334		
NA4-GW6/1	23.05.00	0,435				0,042	1,185		4,2			3,3	338		
NA4-GW6/2	23.05.00	0,432				0,031			3,4			1,0	333		
NA4-GW6/3	23.05.00	0,440				0,030			6,5			3,0	333		
NA4-GW6/4	24.05.00	0,441				0,029			4,6			2,2	337		
NA4-GW7/1	29.08.00	0,471				0,027			4,5			30,4	340		
NA4-GW7/2	29.08.00	0,470				0,028	0,006		3,2			29,8	333		
NA4-GW7/3	29.08.00	0,473				0,028			4,3			34,3	334		
NA4-GW8/1	07.11.00	0,463		0,169					4,0			62,3	336		
NA4-GW8/2	07.11.00	0,469		0,173			0,497		3,0			34,3	332		
NA4-GW8/3	08.11.00	0,416		0,156					3,2			61,4	331		
NA4-GW8-CC	07.11.00	0,507		0,211			0,212		2,5						
NA4-GW9/1-N	06.03.01x														
NA4-GW9/1-N	06.03.01y														
NA4-GW9/1-C	06.03.01														
NA4-GW9/1-U	06.03.01														
NA4-GW9/2-N	06.03.01x								5,2			34,4	332	70,8	78,7
NA4-GW9/2-N	06.03.01y														
NA4-GW9/2-C	06.03.01														
NA4-GW9/2-U	06.03.01								3,0			47,8	182		
NA4-GW10	26.04.01														
NA4-GW11	11.07.01														
NA4-GW12	29.08.01														

**c) Grundwassermeßstelle NA5**

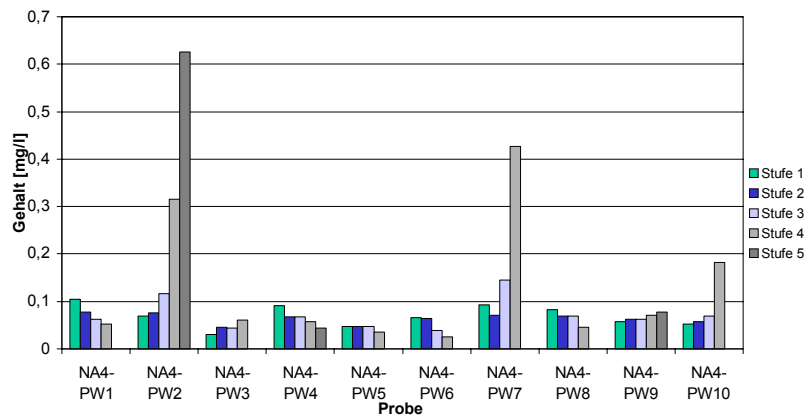
	Datum	Al	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	La	Na	Ni	P	Pb	S	SO <sub>4</sub>
NA5-GW1	04.08.99	0,360	0,043	0,071	54,0	0,027		0,131		0,067	11,2	0,274	21,5	0,009		125,3	0,241		0,071	29,0	87	
NA5-GW2	28.09.99	0,332	0,063	0,110	57,7	0,019		0,167		0,019	11,0	0,268	23,2	0,302		57,0	0,208		0,053	11,0	33	
NA5-GW3	04.11.99	0,318	0,060	0,107	58,1	0,025		0,208		0,064	11,9	0,314	22,8	0,361		60,2	0,191		0,073	9,1	27	
NA5-GW4	20.01.00																					
NA5-GW5	14.03.00	0,657	0,733	0,192	59,7		0,07	0,008	0,001	1,465	10,6	0,398	24,7	0,474		58,4	0,006	0,02		11,1	33	
NA5-GW6	24.05.00	0,371	2,192	0,154	43,4			0,028	0,019	0,043	11,4	0,120	26,5	0,135	0,013	0,001	51,3		0,071	13,1	39	
NA5-GW7	29.08.00	0,521	0,736		70,1					0,048	14,6	0,120	28,8	0,234	0,028		49,2	0,021		10,3	31	
NA5-GW8	07.11.00	0,437	2,251	0,128	62,4					0,015	15,5	0,110	27,4	0,493		0,002	51,3		0,035	10,7	32	
NA5-GW9-N	06.03.01x	0,532	0,044	0,141	67,4					1,628	12,1		29,8			43,0				5,2	16	
NA5-GW9-N	06.03.01y	0,409	0,047	0,155	61,7					1,634	11,8		27,0			42,3				8,2	25	
NA5-GW9-C	06.03.01	0,376	0,054	0,140	58,1					1,045	11,1		24,9			39,0				7,9	24	
NA5-GW9-U	06.03.01	0,323	0,042	0,126	61,5					0,014	12,1		25,6			42,8				7,8	24	
NA5-GW10	26.04.01																					
NA5-GW11	11.07.01																					
NA5-GW12	29.08.01																					
	Datum	Sr	Th	Ti	U	V	Zh	Zr	Cl	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	C <sub>gas</sub>	TIC							
NA5-GW1	04.08.99	0,352		0,241	0,0140	0,028	0,028	0,025	7,2	4,2	1,70											
NA5-GW2	28.09.99	0,393		0,219	0,0008	0,041	0,100	0,040	3,7	7,1	1,41		417									
NA5-GW3	04.11.99	0,402		0,180	0,0010	0,180	0,044	0,019	5,1	4,2	1,79		420									
NA5-GW4	20.01.00																					
NA5-GW5	14.03.00	0,530	0,0003		0,0010	0,002	0,090		6,6			1,9	443									
NA5-GW6	24.05.00	0,481				0,029	0,684		6,6			23,6	430									
NA5-GW7	29.08.00	0,532				0,027			8,8			33,4	448									
NA5-GW8	07.11.00	0,516		0,241					5,6				428									
NA5-GW9-N	06.03.01x																					
NA5-GW9-N	06.03.01y																					
NA5-GW9-C	06.03.01																					
NA5-GW9-U	06.03.01								7,1			27,9	424	87,4	93,5							
NA5-GW10	26.04.01																					
NA5-GW11	11.07.01																					
NA5-GW12	29.08.01																					



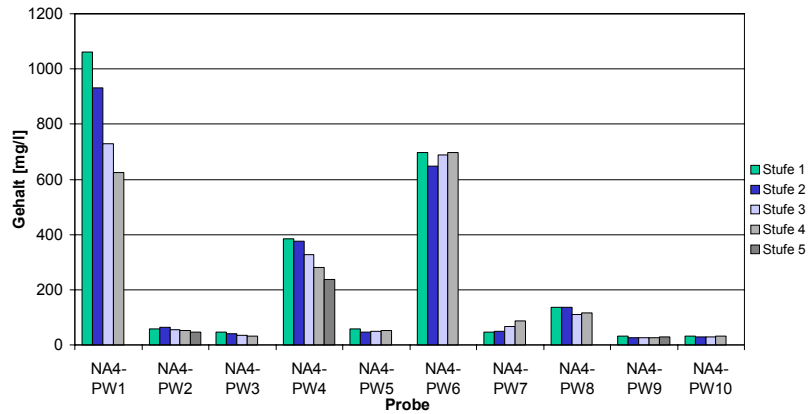
**Abb. 6.2.39:** Entwicklung der Gesamt-Alkalinität im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



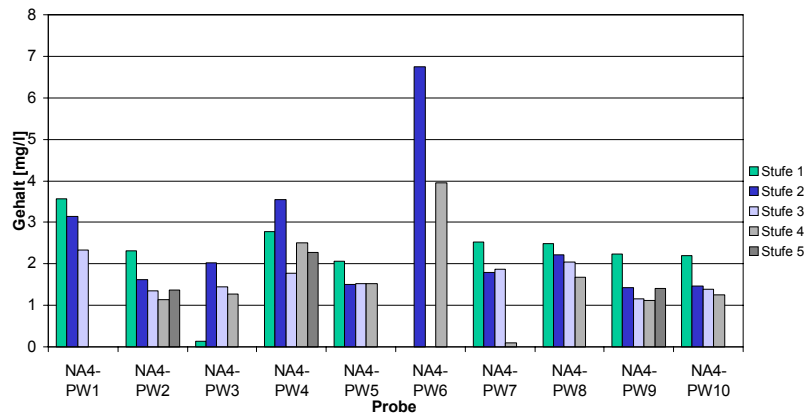
**Abb. 6.2.40:** Entwicklung der Al-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



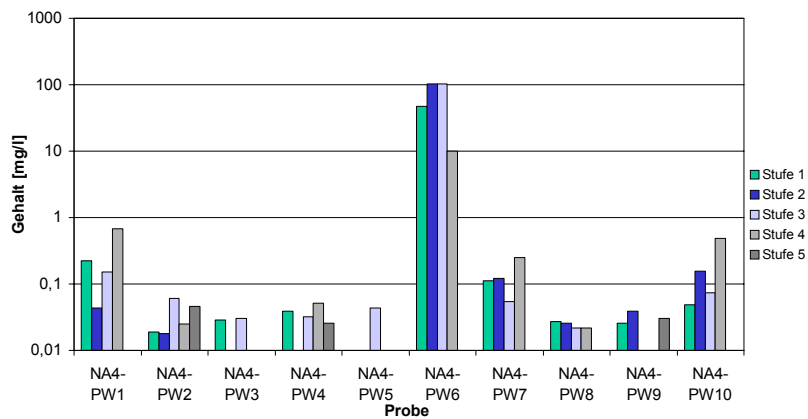
**Abb. 6.2.41:** Entwicklung der Ba-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



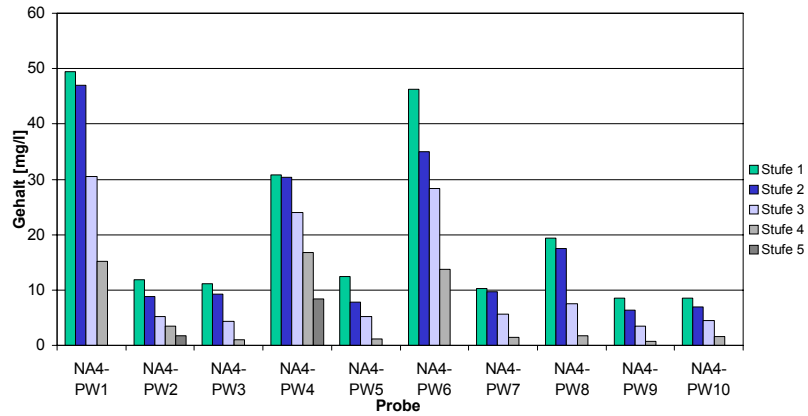
**Abb. 6.2.42:** Entwicklung der Ca-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



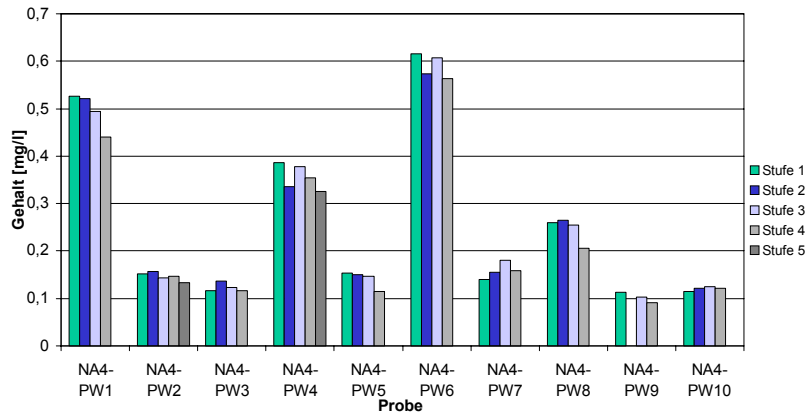
**Abb. 6.2.43:** Entwicklung der Cl-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



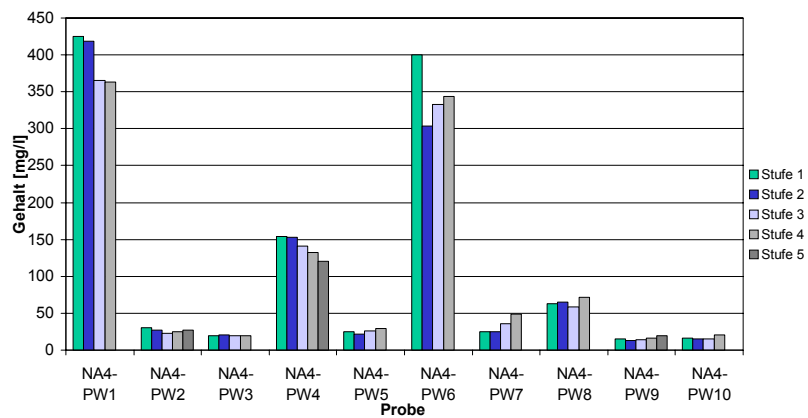
**Abb. 6.2.44:** Entwicklung der Fe<sub>ges</sub>-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



**Abb. 6.2.45:** Entwicklung der K-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)

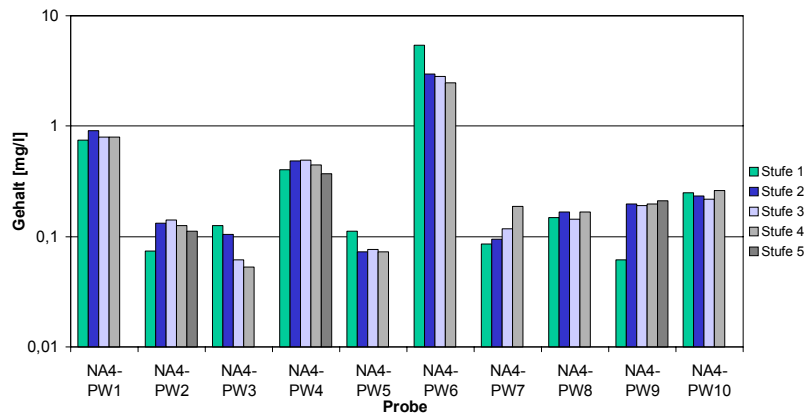


**Abb. 6.2.46:** Entwicklung der Li-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)

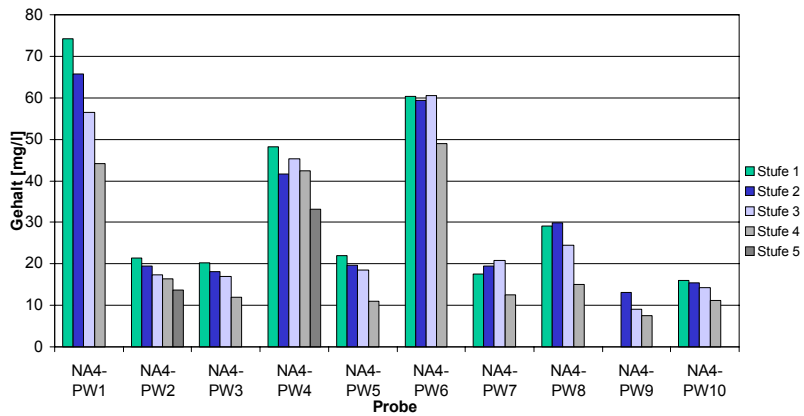


**Abb. 6.2.47:** Entwicklung der Mg-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)

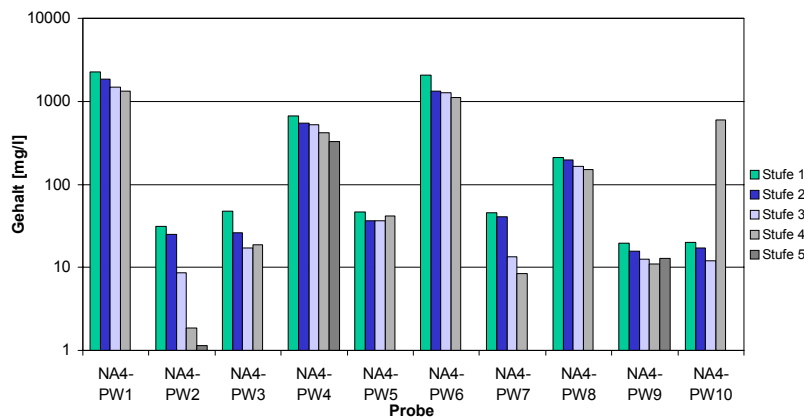




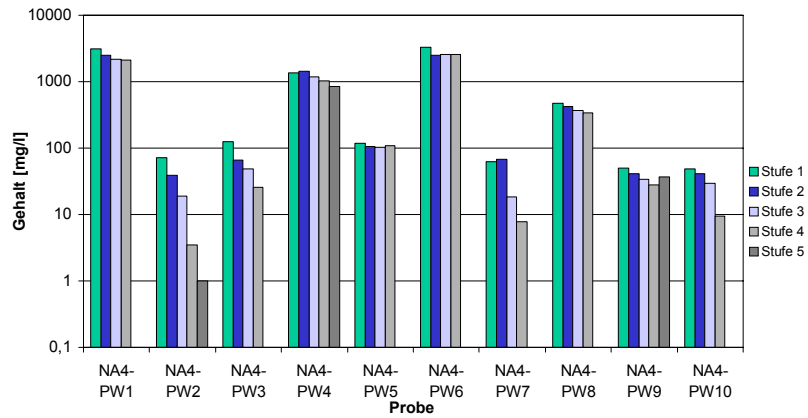
**Abb. 6.2.48:** Entwicklung der Mn-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



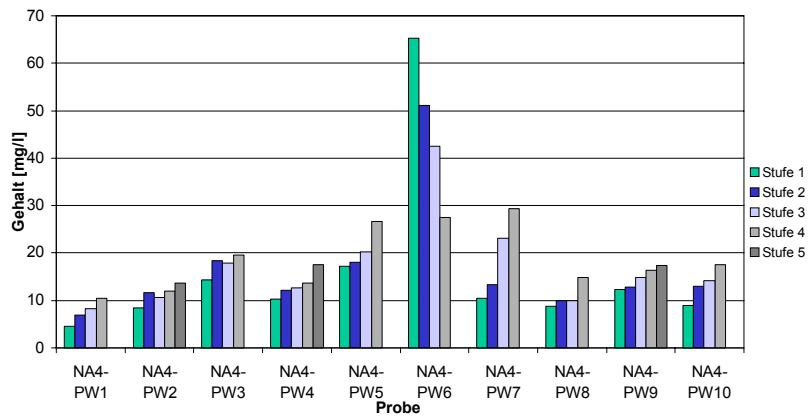
**Abb. 6.2.49:** Entwicklung der Na-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



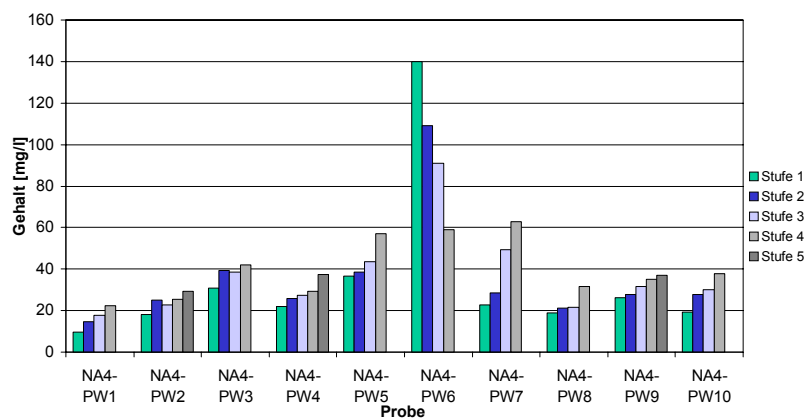
**Abb. 6.2.50:** Entwicklung der  $S_{ges}$ -Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



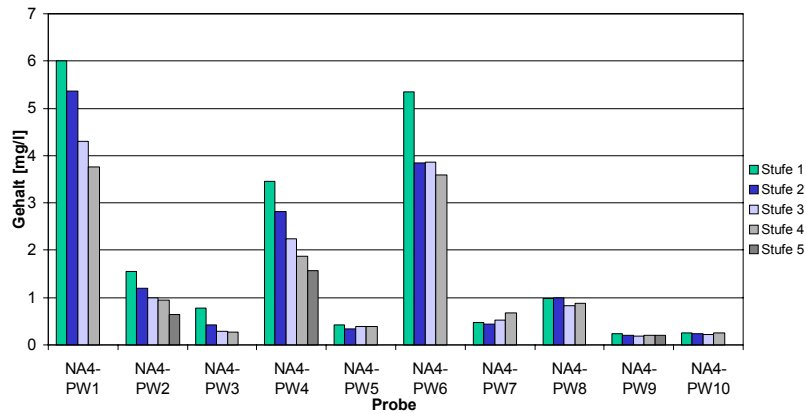
**Abb. 6.2.51:** Entwicklung der SO<sub>4</sub>-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



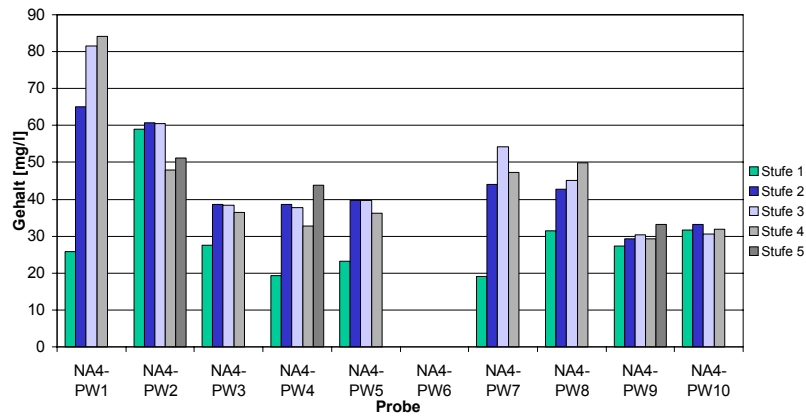
**Abb. 6.2.52:** Entwicklung der Si-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



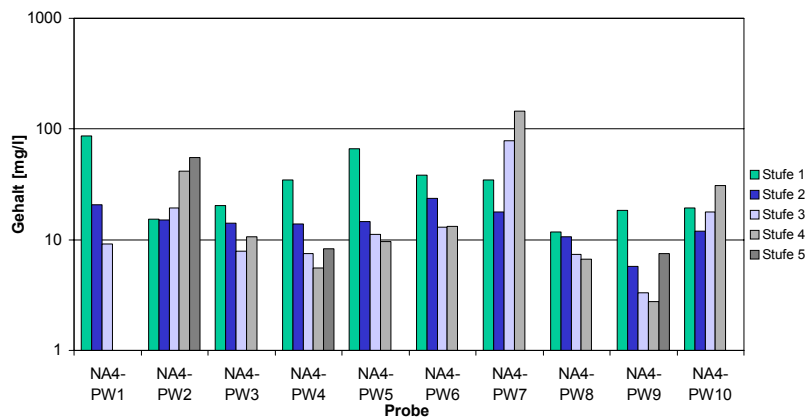
**Abb. 6.2.53:** Entwicklung der SiO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



**Abb. 6.2.54:** Entwicklung der Sr-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



**Abb. 6.2.55:** Entwicklung der TIC-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)



**Abb. 6.2.56:** Entwicklung der TOC-Konzentrationen im Verlauf der 5-stufigen Porenwasserextraktion ausgewählter Sedimentproben (NA4)

**Tab. 6.2.8:** Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB1

	HB1 1.50m	HB1 1.80m	HB1 2.15m	HB1-1	HB1 2.90m	HB1-2	HB1 3.65m	HB1 4.35m	HB1 4.60m	HB1 4.80m	HB1 5.50m
<b>Teufe (m)</b>	1,50	1,80	2,15	2,55	2,90	3,25	3,65	4,35	4,60	4,80	5,50
<b>Loss %</b>	71,55	68,74	57,25	47,87	25,41	39,36	0,61	8,45	3,74	1,30	1,22
<b>SiO2</b>	11,47	12,89	19,56	29,54	52,50	37,44	93,56	64,78	73,69	90,68	89,25
<b>TiO2</b>	0,15	0,18	0,31	0,45	0,39	0,27	0,15	0,49	0,37	0,16	0,21
<b>Al2O3</b>	8,45	9,34	12,59	11,08	12,58	14,34	3,53	18,15	12,51	4,26	5,90
<b>Fe2O3</b>	1,39	1,42	1,54	2,83	2,41	1,64	0,40	2,20	3,39	1,89	0,96
<b>MnO</b>	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>MgO</b>	0,28	0,33	0,42	0,39	0,37	0,61	< LLD	0,68	0,32	0,01	0,04
<b>CaO</b>	2,20	2,47	2,37	2,01	0,66	1,58	0,07	0,52	0,21	0,09	0,09
<b>Na2O</b>	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<b>K2O</b>	0,40	0,40	0,68	0,93	2,42	1,29	1,72	2,30	2,85	1,95	2,81
<b>P2O5</b>	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05	0,06	0,07	0,05
<b>Summe</b>	95,93	95,82	94,77	95,16	96,78	96,58	100,06	97,63	97,15	100,41	100,52
<b>ppm</b>											
<b>V</b>	233	328	1341	223	122	65	11	88	46	20	19
<b>Cr</b>	48	59	181	108	55	95	13	59	27	9	8
<b>Co</b>	26,7	28,8	18,4	56,5	32,8	10,8	0,78	5,07	2,51	1,81	1,36
<b>Ni</b>	123	108	103	99	65	111	14	65	15	15	13
<b>Cu</b>	19	38	71	59	15	72	< LLD	43	10	14	7
<b>Zn</b>	392	460	819	781	2168	421	13	140	82	45	26
<b>Ga</b>	7	7	11	14	7	12	2	20	11	3	2
<b>Rb</b>	40	46	76	86	116	151	54	280	166	69	94
<b>Sr</b>	75	79	93	106	87	69	60	82	86	66	83
<b>Y</b>	15	24	38	40	37	109	3	36	14	6	11
<b>Zr</b>	26	30	50	134	354	96	122	184	248	163	230
<b>Nb</b>	1	3	8	13	4	7	< LLD	4	3	< LLD	0
<b>Mo</b>	1,15	1,13	1,61	2,10	0,59	0,93	0,19	0,47	0,65	0,52	0,48
<b>Cs</b>	7,27	7,07	12,15	12,50	12,27	22,67	2,74	26,82	14,73	3,42	4,96
<b>Ba</b>	673	671	741	614	600	404	494	602	769	545	738
<b>La</b>	18,6	25,9	42,0	30,3	36,6	66,0	13,3	44,7	26,4	10,2	9,2
<b>Ce</b>	30,5	40,7	65,1	51,5	63,5	135,2	22,7	73,1	35,4	17,2	21,1
<b>Pr</b>	4,10	6,81	11,02	6,86	7,00	14,47	2,31	10,12	4,10	1,69	1,50
<b>Nd</b>	17,6	29,9	46,8	29,5	27,5	62,1	8,5	41,8	15,0	6,2	5,4
<b>Sm</b>	3,75	6,79	10,19	6,67	5,34	12,17	1,50	8,59	2,58	1,06	0,91
<b>Eu</b>	0,91	1,68	2,48	1,63	1,17	3,41	0,19	2,27	0,56	0,28	0,08
<b>Gd</b>	2,83	4,91	7,36	5,19	4,27	10,30	0,98	6,17	1,85	0,76	0,66
<b>Tb</b>	0,45	0,81	1,25	0,87	0,73	1,60	0,14	1,00	0,31	0,11	0,09
<b>Dy</b>	2,55	4,63	6,81	5,12	4,38	9,17	0,74	5,69	1,85	0,55	0,50
<b>Ho</b>	0,50	0,88	1,27	1,01	0,87	1,84	0,14	1,09	0,38	0,09	0,09
<b>Er</b>	1,24	2,10	2,97	2,50	2,12	4,54	0,31	2,63	0,98	0,22	0,23
<b>Tm</b>	0,20	0,34	0,45	0,41	0,34	0,69	0,04	0,40	0,16	0,03	0,04
<b>Yb</b>	1,26	2,13	2,79	2,52	2,10	4,30	0,26	2,53	1,05	0,20	0,23
<b>Lu</b>	0,20	0,32	0,40	0,38	0,31	0,66	0,04	0,37	0,16	0,03	0,04
<b>Hf</b>	0,84	0,96	1,52	2,96	6,21	2,37	2,27	3,45	4,19	2,27	3,49
<b>Pb</b>	10	14	22	25	26	31	17	60	28	18	27
<b>Th</b>	5	9	10	20	13	16	8	9	13	5	14
<b>U</b>	24,8	110	311	522	74,1	309	3,48	16,52	9,04	12,7	8,25
<b>U 235</b>				653		153					
<b>U 238</b>				668		153					

Tab. 6.2.9: Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB2

	HB2 1.60m	HB2 2.40m	HB2 3.40m	HB 2-1	HB 2-2	HB2 5.60m	HB2 5.80m	HB2 6.30m	HB2 7.20m	HB2 7.70m
<b>Teufe (m)</b>	1,60	2,40	3,40	4,60	5,35	5,60	5,80	6,30	7,20	7,70
<b>Loss %</b>	77,62	75,59	80,35	67,34	61,60	21,63	50,39	32,15	2,52	0,89
<b>SiO2</b>	9,44	10,93	7,05	14,16	16,58	57,17	26,66	39,22	80,82	90,64
<b>TiO2</b>	0,18	0,10	0,08	0,24	0,20	0,41	0,29	0,50	0,25	0,26
<b>Al2O3</b>	7,52	6,93	6,34	10,93	11,67	12,63	14,24	20,38	7,76	4,84
<b>Fe2O3</b>	1,00	1,65	0,87	1,92	1,89	1,85	1,71	3,09	4,77	1,18
<b>MnO</b>	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
<b>MgO</b>	0,24	0,20	0,22	0,35	0,32	0,38	0,53	0,34	0,13	< LLD
<b>CaO</b>	1,01	1,30	1,79	1,18	2,18	0,73	1,41	0,77	0,13	0,08
<b>Na2O</b>	0,02	0,01	0,01	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<b>K2O</b>	0,40	0,35	0,23	0,52	0,52	2,63	0,98	1,08	2,24	2,34
<b>P2O5</b>	0,03	0,09	0,04	0,09	0,16	0,05	0,05	0,05	0,04	0,08
<b>Summe</b>	97,47	97,14	97,00	96,73	95,12	97,49	96,27	97,57	98,65	100,31
<b>ppm</b>										
<b>V</b>	78	60	60	157	147	98	75	133	31	21
<b>Cr</b>	41	29	25	79	151	63	161	85	20	12
<b>Co</b>	11,9	16,2	12,0	28,8	47,6	20,2	42,3	27,4	1,54	0,77
<b>Ni</b>	87	90	61	73	102	42	117	92	11	9
<b>Cu</b>	21	23	11	53	56	18	50	74	5	11
<b>Zn</b>	637	335	435	909	531	973	452	169	30	16
<b>Ga</b>	8	5	4	9	8	9	13	20	9	5
<b>Rb</b>	42	28	24	59	83	125	129	101	100	75
<b>Sr</b>	45	44	48	60	67	92	65	58	68	71
<b>Y</b>	12	7	11	32	39	32	51	24	14	14
<b>Zr</b>	25	25	13	36	51	375	64	109	205	294
<b>Nb</b>	1	1	2	5	7	4	4	4	2	1
<b>Mo</b>	3,35	1,43	2,50	2,53	1,85	1,15	0,84	1,83	0,67	0,46
<b>Cs</b>	6,18	4,02	3,98	9,35	6,22	11,93	18,37	17,42	7,85	3,09
<b>Ba</b>	423	426	422	464	591	607	506	429	564	595
<b>La</b>	8,2	7,6	10,8	12,6	12,9	59,6	47,2	18,5	13,9	15,7
<b>Ce</b>	15,7	13,7	21,6	21,8	27,1	90,7	74,8	51,1	27,0	30,3
<b>Pr</b>	1,69	1,65	2,97	2,76	2,94	10,78	9,22	3,55	2,40	2,53
<b>Nd</b>	7,3	7,0	13,5	11,7	12,9	40,7	37,7	13,8	9,1	9,3
<b>Sm</b>	1,60	1,49	2,95	2,44	3,03	7,36	7,28	2,48	1,54	1,52
<b>Eu</b>	0,40	0,36	0,72	0,61	0,83	1,23	2,02	0,57	0,09	0,12
<b>Gd</b>	1,28	1,13	2,18	1,97	2,58	5,19	6,06	1,68	1,10	1,08
<b>Tb</b>	0,22	0,18	0,33	0,33	0,47	0,81	0,99	0,23	0,15	0,16
<b>Dy</b>	1,32	1,07	1,85	1,96	2,89	4,48	5,66	1,13	0,77	0,98
<b>Ho</b>	0,27	0,21	0,36	0,40	0,59	0,86	1,11	0,19	0,13	0,20
<b>Er</b>	0,76	0,55	0,91	0,99	1,52	2,12	2,63	0,46	0,31	0,50
<b>Tm</b>	0,12	0,09	0,14	0,16	0,26	0,34	0,40	0,06	0,04	0,08
<b>Yb</b>	0,78	0,63	0,93	1,03	1,74	2,15	2,45	0,39	0,27	0,46
<b>Lu</b>	0,12	0,10	0,14	0,15	0,26	0,32	0,36	0,06	0,03	0,06
<b>Hf</b>	0,79	0,71	0,40	0,77	1,24	5,74	1,71	2,48	3,33	4,78
<b>Pb</b>	12	8	6	22	22	31	37	83	29	24
<b>Th</b>	6	5	4	10	13	13	13	22	19	9
<b>U</b>	6,38	9,59	32,1	111	273	72,6	161	7,41	10,4	9,56
<b>U 235</b>				226	318					
<b>U 238</b>				237	318					

Tab. 6.2.10: Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB3

	HB3 2.20m	HB3 3.20m	HB3 4.20m	HB3 4.50m	HB3 5.50m	HB3-1	HB3 7.40m	HB3-2	HB3 8.25m
Teufe (m)	2,20	3,20	4,20	4,50	5,50	6,75	7,40	7,65	8,25
Loss %	3,89	6,19	9,01	41,75	66,21	57,20	40,25	36,27	12,74
SiO <sub>2</sub>	77,98	69,32	69,69	37,49	15,36	19,17	36,23	31,48	60,61
TiO <sub>2</sub>	0,50	0,62	0,60	0,38	0,25	0,28	0,45	0,52	0,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,55	14,52	14,06	12,13	9,29	13,68	13,95	21,30	18,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,32	5,43	1,80	1,81	1,30	1,41	1,95	1,87	1,82
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,25	0,29	0,33	0,40	0,39	0,42	0,41	0,57	0,53
CaO	0,24	0,33	0,51	1,63	2,18	2,47	1,46	1,91	0,56
Na <sub>2</sub> O	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
K <sub>2</sub> O	1,58	1,33	1,67	0,97	0,52	0,60	1,31	1,03	2,57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,05	0,07	0,06	0,16	0,13	0,20	0,10
Summe	98,39	98,14	97,73	96,63	95,56	95,42	96,14	95,16	97,98
ppm									
V	77	146	125	152	295	44	49	65	56
Cr	62	106	102	71	85	147	136	228	98
Co	3,48	4,67	4,55	11,0	7,11	3,57	4,85	5,11	5,13
Ni	21	23	49	50	93	74	120	103	45
Cu	25	48	40	31	28	46	96	92	24
Zn	26	29	37	139	291	147	306	419	79
Ga	13	17	18	16	14	12	12	18	16
Rb	102	96	106	82	52	68	111	115	147
Sr	58	68	72	77	75	94	146	112	104
Y	15	10	22	41	11	42	113	152	31
Zr	255	220	234	123	39	47	154	70	339
Nb	6	5	3	3	4	4	7	10	6
Mo	0,98	1,74	1,47	1,57	4,07	0,80	0,95	1,08	0,47
Cs	8,18	12,00	10,95	12,31	10,54	13,08	13,05	19,00	15,93
Ba	400	399	481	666	632	810	856	876	721
La	24,4	16,1	29,6	47,3	18,4	33,5	35,8	53,2	29,1
Ce	45,5	41,9	49,2	85,3	31,0	70,6	74,6	115,3	51,7
Pr	3,98	2,75	5,48	9,91	3,31	8,68	11,61	16,50	4,65
Nd	14,6	10,1	20,9	40,2	13,0	39,1	58,8	81,1	17,4
Sm	2,49	1,87	4,03	7,69	2,64	8,74	14,60	18,79	3,01
Eu	0,26	0,17	0,71	1,68	0,64	2,24	4,22	5,28	0,45
Gd	1,65	1,32	2,69	6,17	2,07	6,91	12,03	15,78	2,07
Tb	0,21	0,18	0,42	1,00	0,36	1,10	1,75	2,25	0,29
Dy	1,08	0,95	2,26	5,82	2,13	6,42	10,26	12,98	1,52
Ho	0,18	0,17	0,42	1,13	0,41	1,28	2,34	2,83	0,27
Er	0,39	0,41	1,00	2,78	1,07	3,23	6,38	7,60	0,66
Tm	0,05	0,07	0,15	0,43	0,17	0,54	1,09	1,27	0,09
Yb	0,31	0,41	0,96	2,73	1,17	3,52	7,38	8,31	0,59
Lu	0,04	0,06	0,14	0,40	0,18	0,56	1,30	1,45	0,09
Hf	4,47	3,82	3,66	2,73	1,16	1,44	3,93	2,19	4,05
Pb	26	32	36	29	14	26	31	48	36
Th	16	22	25	14	7	14	17	23	24
U	4,59	5,37	5,74	3,64	8,13	194	229	292	51,2
U 235						150		394	
U 238						147		377	

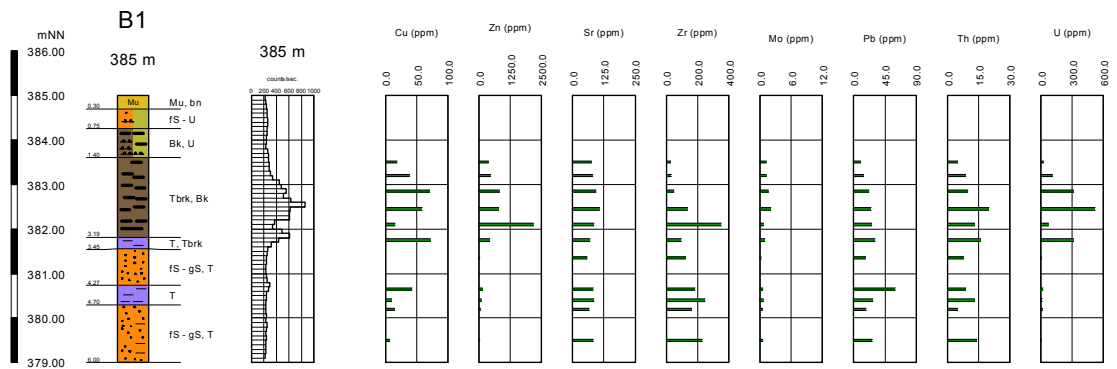
**Tab. 6.2.11:** Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedim. der Bohrungen HB3 (Forts.)

	<b>HB3 8.80m</b>	<b>HB3 9.30m</b>	<b>HB3 9.60m</b>	<b>HB3 10.10m</b>
<b>Teufe (m)</b>	8,80	9,30	9,60	10,10
<b>Loss %</b>	94,41	9,32	0,91	0,97
<b>SiO2</b>	3,30	50,30	90,88	90,28
<b>TiO2</b>	0,03	0,34	0,21	0,24
<b>Al2O3</b>	1,41	21,55	3,98	5,11
<b>Fe2O3</b>	0,42	11,72	1,84	0,63
<b>MnO</b>	0,00	0,01	0,01	0,01
<b>MgO</b>	0,05	0,77	< LLD	0,01
<b>CaO</b>	0,05	0,60	0,08	0,09
<b>Na2O</b>	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<b>K2O</b>	0,12	1,62	1,92	2,20
<b>P2O5</b>	0,01	0,18	0,09	0,04
<b>Summe</b>	99,78	96,42	99,93	99,58
<b>ppm</b>				
<b>V</b>	8	116	23	12
<b>Cr</b>	5	54	6	15
<b>Co</b>	0,51	5,86	1,58	1,22
<b>Ni</b>	4	30	9	18
<b>Cu</b>	3	22	7	< LLD
<b>Zn</b>	7	130	36	24
<b>Ga</b>	2	17	8	5
<b>Rb</b>	13	192	65	78
<b>Sr</b>	6	50	61	64
<b>Y</b>	3	16	10	9
<b>Zr</b>	7	73	222	275
<b>Nb</b>	1	7	0	< LLD
<b>Mo</b>	0,20	1,37	1,03	0,22
<b>Cs</b>	2,06	29,38	2,85	3,56
<b>Ba</b>	76	241	528	572
<b>La</b>	1,0	8,9	13,8	16,7
<b>Ce</b>	3,0	14,6	23,9	31,6
<b>Pr</b>	0,22	1,41	2,36	2,81
<b>Nd</b>	0,9	5,6	8,7	10,2
<b>Sm</b>	0,17	1,14	1,55	1,80
<b>Eu</b>	0,04	0,31	0,26	0,14
<b>Gd</b>	0,12	0,95	1,11	1,22
<b>Tb</b>	0,02	0,17	0,17	0,17
<b>Dy</b>	0,09	1,03	0,97	0,93
<b>Ho</b>	0,02	0,21	0,19	0,17
<b>Er</b>	0,04	0,51	0,48	0,42
<b>Tm</b>	0,01	0,08	0,08	0,07
<b>Yb</b>	0,03	0,49	0,51	0,42
<b>Lu</b>	0,00	0,07	0,08	0,06
<b>Hf</b>	0,19	1,54	3,13	4,20
<b>Pb</b>	3	37	19	26
<b>Th</b>	1	10	8	12
<b>U</b>	0,44	13,9	21,9	5,70
<b>U 235</b>				
<b>U 238</b>				

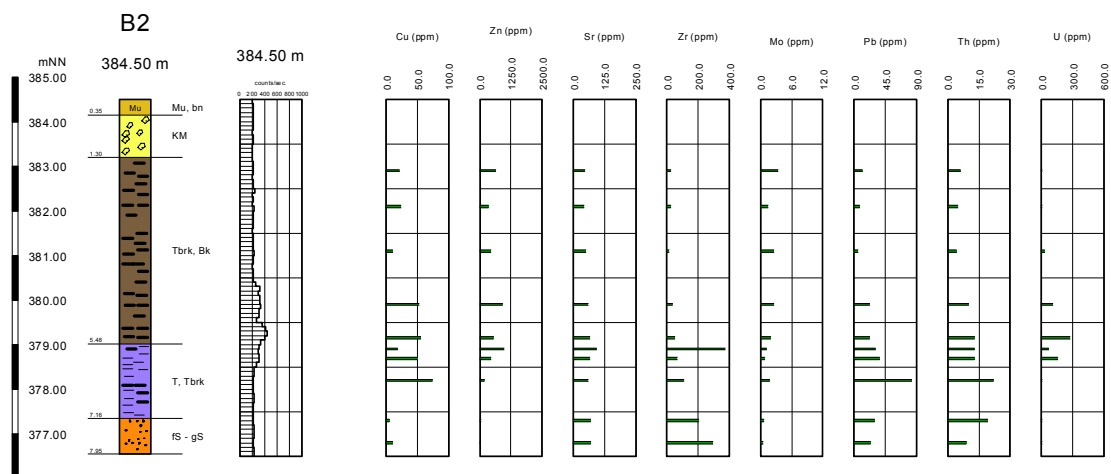
Tab. 6.2.12: Ergebnisse der RFA-Analysen an Sedimenten der Bohrung HB4

	HB4 0.35m	HB4-1	HB4 0.80m	HB4 1.50m	HB4-2	HB4 2.10m	HB4 3.05m	HB4 3.50m
<b>Teufe (m)</b>	0,35	0,65	0,80	1,50	1,75	2,10	3,05	3,50
<b>Loss %</b>	47,61	43,23	2,54	1,76	5,49	2,23	3,45	0,80
<b>SiO2</b>	29,64	33,41	82,29	86,27	67,12	81,32	77,26	90,47
<b>TiO2</b>	0,34	0,41	0,19	0,18	0,76	0,22	0,36	0,24
<b>Al2O3</b>	14,60	14,52	7,57	7,35	15,88	6,17	12,52	5,28
<b>Fe2O3</b>	1,75	1,96	3,36	1,40	4,50	6,21	1,65	0,51
<b>MnO</b>	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01
<b>MgO</b>	0,42	0,43	0,13	0,08	0,11	0,10	0,31	< LLD
<b>CaO</b>	1,49	1,47	0,17	0,14	0,22	0,13	0,19	0,07
<b>Na2O</b>	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<b>K2O</b>	1,01	0,87	2,78	2,97	2,75	2,20	2,50	2,67
<b>P2O5</b>	0,16	0,18	0,11	0,05	0,19	0,22	0,06	0,03
<b>Summe</b>	97,03	96,47	99,15	100,18	97,02	98,80	98,31	100,07
<b>ppm</b>								
<b>V</b>	71	75	70	30	75	123	48	21
<b>Cr</b>	86	108	35	19	44	27	24	8
<b>Co</b>	8,87	7,83	2,11	1,43	2,79	3,22	3,08	0,98
<b>Ni</b>	79	385	15	20	111	18	14	13
<b>Cu</b>	47	54	19	15	11	19	9	13
<b>Zn</b>	121	110	41	26	136	123	81	22
<b>Ga</b>	15	15	9	4	17	3	14	4
<b>Rb</b>	91	86	98	103	229	86	150	86
<b>Sr</b>	87	86	96	105	230	171	78	81
<b>Y</b>	19	28	11	10	25	11	15	13
<b>Zr</b>	76	130	93	78	367	196	180	226
<b>Nb</b>	9	11	1	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<b>Mo</b>	1,22	2,17	1,53	0,71	10,41	2,67	0,25	0,14
<b>Cs</b>	13,12	13,40	5,95	5,61	4,41	6,99	18,68	3,67
<b>Ba</b>	643	624	794	824	1216	722	574	707
<b>La</b>	12,6	31,4	17,5	11,6	12,8	11,6	20,0	12,3
<b>Ce</b>	20,6	55,7	30,7	23,5	32,9	27,2	35,1	23,4
<b>Pr</b>	2,33	6,50	3,12	2,02	2,19	2,01	3,19	2,00
<b>Nd</b>	9,6	27,3	12,1	7,7	8,0	7,8	11,6	7,5
<b>Sm</b>	1,97	5,56	2,26	1,40	1,41	1,44	1,96	1,22
<b>Eu</b>	0,46	1,24	0,41	0,31	0,09	0,23	0,25	0,14
<b>Gd</b>	1,49	4,17	1,49	1,01	1,01	1,03	1,36	0,87
<b>Tb</b>	0,25	0,64	0,22	0,16	0,14	0,14	0,19	0,13
<b>Dy</b>	1,45	3,70	1,04	0,88	0,73	0,76	1,02	0,78
<b>Ho</b>	0,31	0,71	0,16	0,18	0,13	0,15	0,19	0,16
<b>Er</b>	0,83	1,79	0,36	0,44	0,32	0,37	0,45	0,42
<b>Tm</b>	0,15	0,29	0,05	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06
<b>Yb</b>	1,02	1,91	0,28	0,39	0,30	0,42	0,40	0,40
<b>Lu</b>	0,16	0,30	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06	0,06
<b>Hf</b>	1,93	2,72	1,69	1,46	4,65	3,82	4,11	5,24
<b>Pb</b>	20	22	23	28	40	27	22	23
<b>Th</b>	12	13	17	9	17	12	4	7
<b>U</b>	185	373	28,3	12,3	74,8	47,5	10,1	3,55
<b>U 235</b>		689			115			
<b>U 238</b>		694			107			

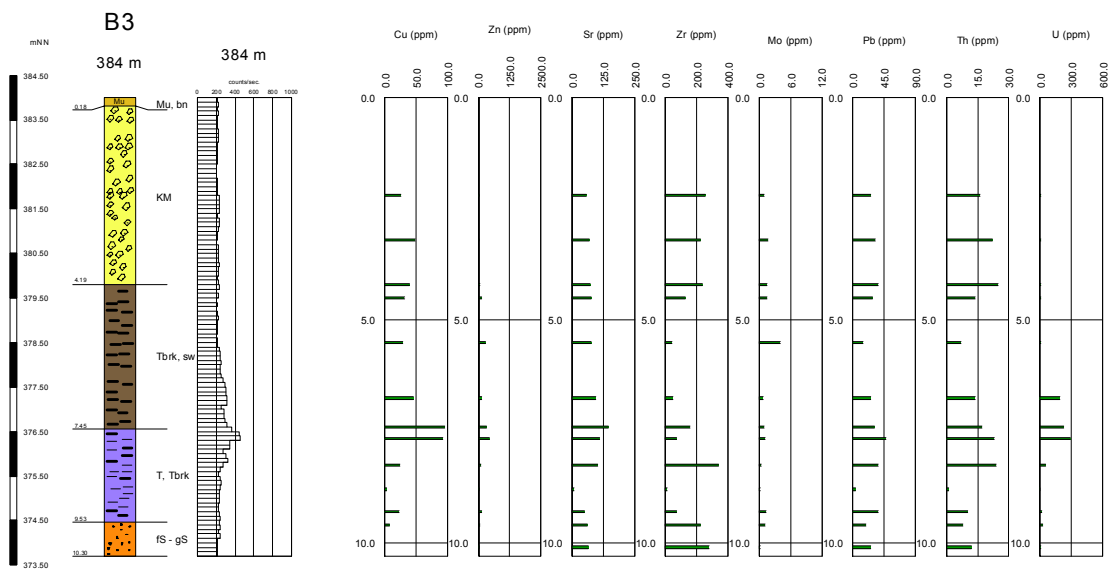




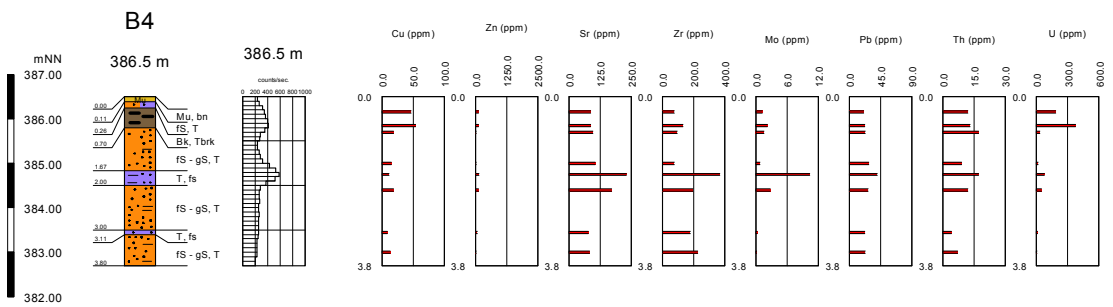
**Abb. 6.2.57:** Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B1 - Heselbach



**Abb. 6.2.58:** Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B2 - Heselbach



**Abb. 6.2.59:** Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B3 - Heselbach



**Abb. 6.2.60:** Geologisches Profil, Gamma-Messwerte und ausgewählte Elementgehalte in der Bohrung B4 - Heselbach

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

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

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

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

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

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**