„Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in NRW“

3. Sitzung des begleitenden Arbeitskreises

10. März 2016

Tagesordnung (Hauptpunkte)

TOP 1: Begrüßung, Tagesordnung, Protokoll AK2

TOP 2: Projektstand

TOP 3: Zwischenbericht

TOP 4: Zustand der BHV

TOP 5: Hydrogeologisches System und Modellierungen

TOP 6: Mögliche tagnahe Beeinflussungen

TOP 7: Grubenwasserkonzept

TOP 8: Sonstiges / Ausblick

(2) PROJEKTSTAND

Kernfragen an das Gutachten

1. Wie sind die Grundannahmen, die damals Basis der Entscheidungen gewesen waren, heute zu bewerten?

2. Sind aktuell und künftig Gefährdungen, insbesondere des Grund- und Oberflächenwassers im Einzugsbereich der Steinkohlenbergwerke zu befürchten? Welche Maßnahmen müssten ggf. ergriffen werden, um diesen zu begegnen?

3. Wie muss das Monitoring erweitert werden, um ggf. auftretende Gefährdungen frühzeitig zu erkennen?

Weitere Fragen an das Gutachten

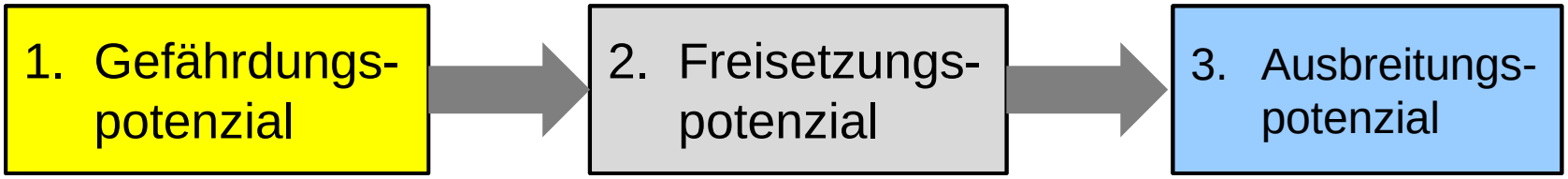
4. **Gibt es zusätzlichen Untersuchungsbedarf?**

5. **Prüfung von Auffälligkeiten an der Tagesoberfläche (Bewertung vorhandene Gutachten)**

6. **Welches Risiko geht von PCB und den Substituten aus? (Aufgabenerweiterung 23.01.2015)**
   - Mobilisierbarkeit und mögliche Stofftransporte (Berücksichtigung Grubenwasserkonzept)
   - Einträge in tiefe und flache Grund- und Oberflächengewässer
   - Grundlage sind die vorliegenden Messprogrammen und ggf. weitere Untersuchungen
   - Ist eine Anpassung des Monitorings erforderlich?

Vorgehensweise Risikoabschätzung

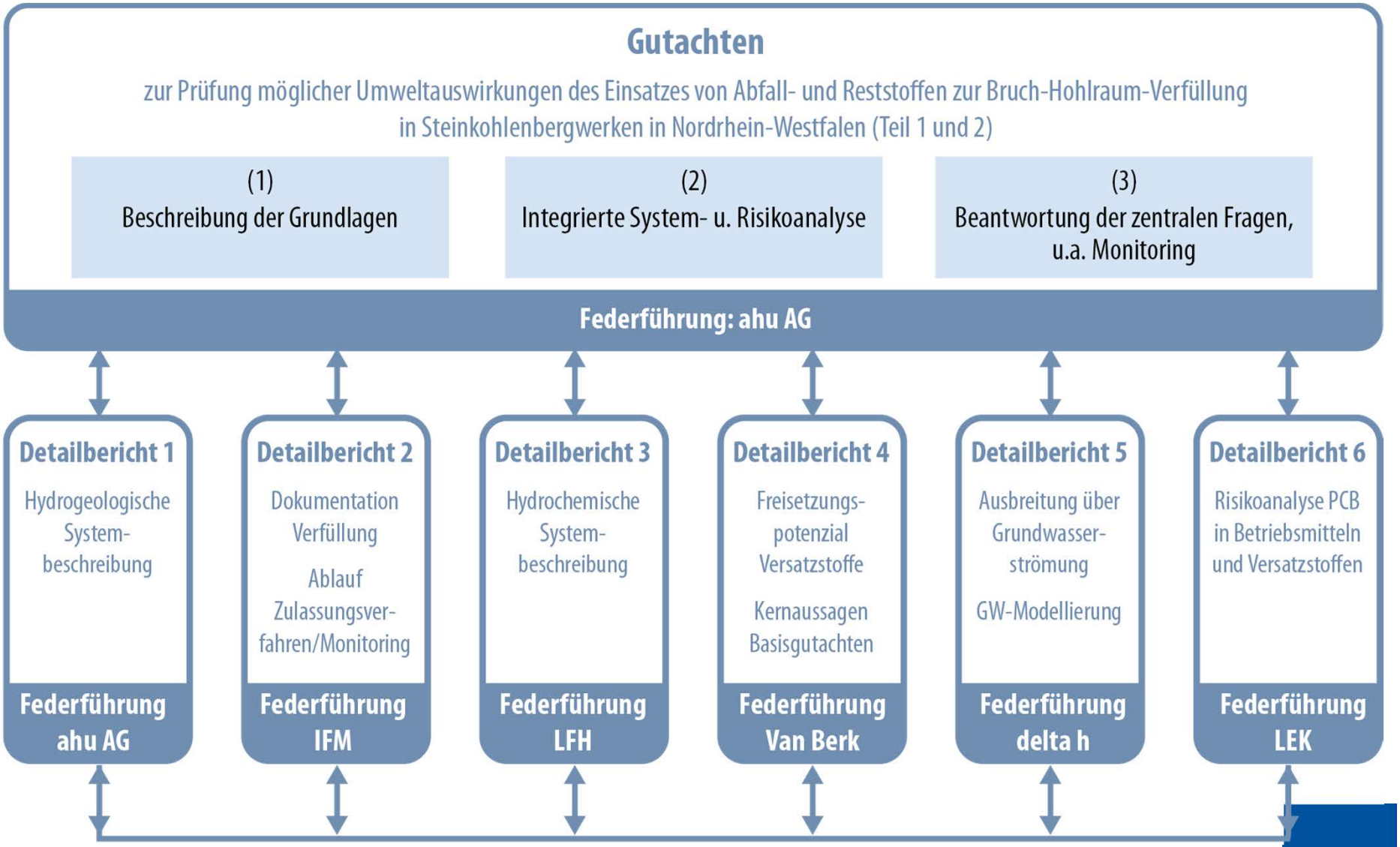
Gibt es aktuell und künftig Gefährdungen (Risiko) durch die BW?



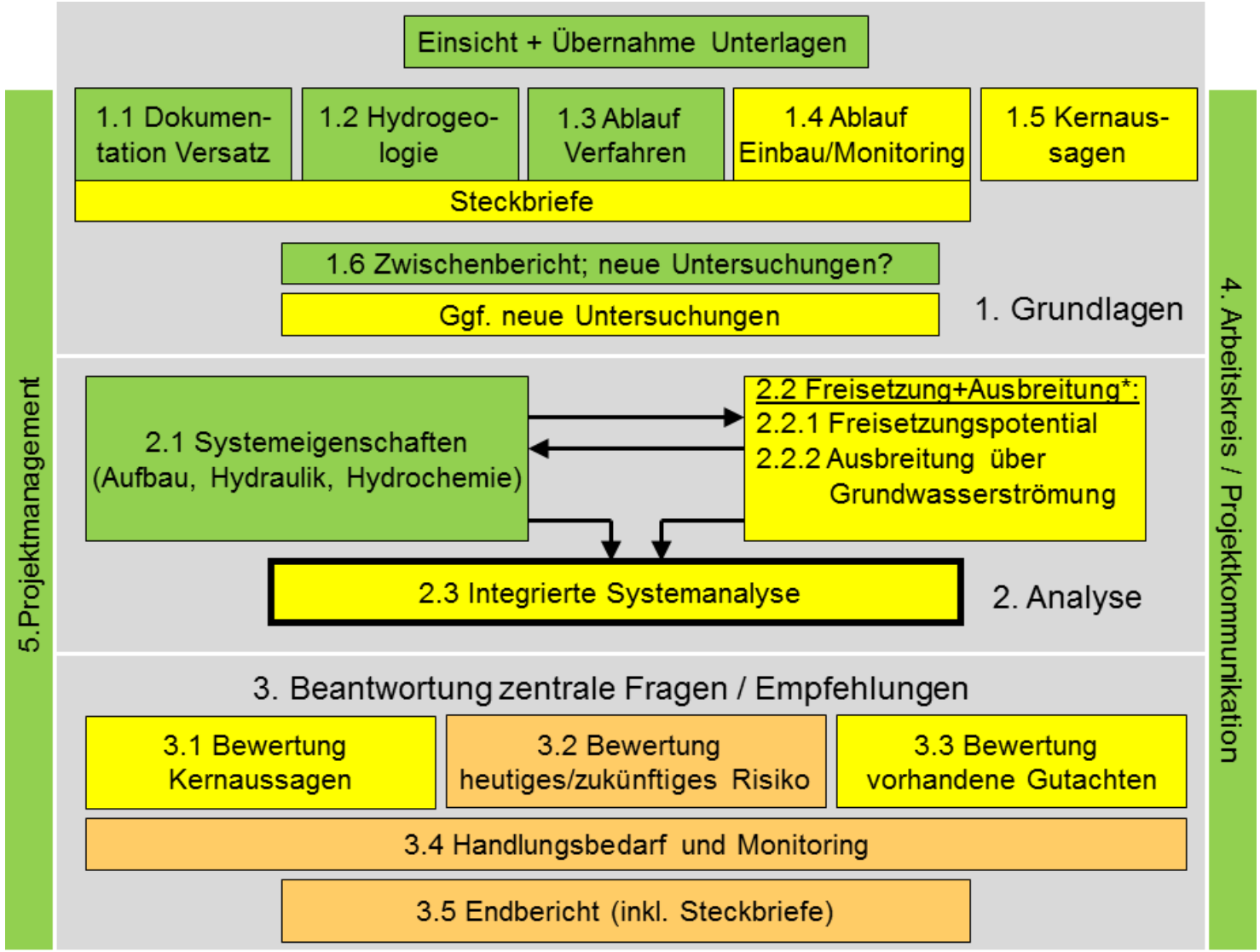
1. Welche gefährlichen Stoffe wurden in die Bergwerke eingebracht?
2. Werden diese Stoffe durch die verschiedenen Barrieren zurückgehalten?
3. Breiten sich die Stoffe (gelöst oder partikelgebunden) im Nahfeld (50-100 m) und im Fernfeld (> 100 m) aus?

Risikoabschätzung möglicher Umweltauswirkungen

Projektbearbeitung und Ergebnisse



Bearbeitungsstand 3/2016



(3) ZWISCHENBERICHT

Inhalt Zwischenbericht V18

1 Einleitung

2 Datengrundlagen und Datenrecherche

3 Skizzierung der Arbeitsstruktur (Risikoanalyse)

4 Bruchhohlraumverfüllung

5 Gefährdungspotenziale (anorganische, organische Stoffe)

6 Ablauf Betriebsplanverfahrens

7 Hydrogeologische-hydrochemische Systembeschreibung

8 Freisetzungspotenzial anorganische Stoffe

9 Ausbreitungspotenzial

10 Prüfung von Auffälligkeiten an der Tagesoberfläche

11 Kenntnisstand Zustand der Bruchhohlraumverfüllung

(4) ZUSTAND BHV (PROF. RÜDE)

1. Betriebsstörungen
2. Aushärtung der BHV
3. Überschusswasser
4. Tiefengrundwasser

ahu AG

Auswertung Betriebsstörungen

- Betriebsstörung
  - Besondere Vorkommnisse und die getroffenen Maßnahmen gemäß dem Sonderbetriebsplan für die Reststoffverwertung als Nachversatz zur Bruchhohlraumverfüllung im Sinne des **§ 74 Abs. 3 BBergG**

- Datengrundlage
  - Abschlussberichte der Abbaubetriebe Gb 1, Gb 2, Gb 16, Gb 17 und Gb 31 → 6 Störfallbeschreibungen
  - Sachstandsberichte (Zeitraum: 03.1993 – 02.1998)
    → 7 Störfallbeschreibungen, vermutlich 6 konkrete Störfalle

ahu AG

Auswertung Betriebsstörungen

Sachstandsberichte		Abschlussberichte	
01.07.1993	Gb 2	01.07.1993	Gb 2
09.08.1993	Gb 2	09.08.1993	Gb 2
04.11.1993	Gb 2	04.11.1993	Gb 2
10.11.1994	Gb 16 („Zerkleinerungs-messer“)	10.11.1994	Gb 16 („Zerkleinerungs-messer“)
01/95 - 08/95	3 Betriebs-störungen (1x „Zerkleinerungs-messer“)	19.05.1995*	Gb 17
		19.06.1995*	Gb 17

*in den Akten ein Vorbericht, darin 20.06.1995 für die zweite Betriebsstörung benannt

ahu AG

Auswertung Betriebsstörungen

Datum	Abbau-betrieb	Art und Ursache des Vorfalls	Maßnahmen
01.07.93	Gb 2	• Undichtigkeit am Flansch-anschluss der Berstscheibe • Austritt von ca. 3 – 5 m³ Feststoff-Wasser-Gemisch (100% HMVA) • Wiederaufnahme d. Pumpbetriebs nach Rohraustausch durch Viskositätsanstieg nicht möglich	• Austausch des Rohrstücks und des Rohrleitungsinhalts • Materialaustritte in Spezialcontainern aufgefangen und dem Verarbeitungs-prozess erneut zugeführt
09.08.93	Gb 2	• Wiederaufnahme d. Pumpbetriebs nach Pumpunterbrechung durch Viskositätsanstieg nicht möglich	• Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Rohrleitungsinhalt wurde in den Bruchhohlraum gepumpt

Auswertung Betriebsstörungen

Datum	Abbau-betrieb	Art und Ursache des Vorfalls	Maßnahmen
04.11.93	Gb 2	• Druckabfall in der Rohrleitung durch Ansprechen der Berstscheibe • Freisetzung von ca. 2 m³ Suspension (50% RAA, 50% MVA)	• Einstellung d. Pump-betriebs • Ordnungsgemäße Entsorgung des Austrittvolumens mittels Spezial-containern
10.11.94	Gb 16	• Druckanstieg in der Rohrleitung • Viskositätsanstieg durch unvollständige Aufmischung des RAA-Schlamms → Ausfall zweier Messerköpfe im Mischer	• Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Abgepumptes Material wurde dem Verarbeitungs-prozess erneut zugeführt

ahu AG

Auswertung Betriebsstörungen

Datum	Abbau-betrieb	Art und Ursache des Vorfalls	Maßnahmen
19.05.95	Gb 17	• Wiederaufnahme d. Pump-betriebs nach Pumpunterbrechung durch Viskositätsanstieg nicht möglich	• Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Nicht mehr pumpfähiges Material wurde in Spezialcontainern aufgefangen und dem Verarbeitungs-prozess erneut zugeführt
19.06.95	Gb 17	• Druckanstieg in der Rohrleitung durch Viskositätszunahme	• Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts und Auffangen in Spezialcontainern

Beschreibungen des Aushärtens der BHV – Literatur I

- Machbarkeitsstudie (Jäger 1990)
- Endbericht des BMFT mit Aufnahmen unter Tage (1991)
- Laborversuche zum Aushärteverhalten (Hußmann und Klee 2001)
- Berichte der EU zur technischen Forschung Kohle, die sich mit der BHV beschäftigen (Steinkohlenbergbauverein Essen 1988)
- Abschlussbericht zur hydraulischen BHV (Mez et al. 1999, DMT)
- Interaktion der einzelnen Bestandteile der Suspension (Kirby und Rimstidt 1994)
- Aushärten der BHV in einem Bergwerk in Ohio, USA (Lamminen et al. 2001, Taerakul et al.2004)

ahu AG

Beschreibungen des Aushärtens der BHV – Literatur II

- Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens für das Einbringen feinkörniger Aufbereitungs- und Kraftwerksabgänge in untertägigen Bruchhohlräume (Thiehofe | Ruhrkohle AG, 1991, BMFT 0326416 B)

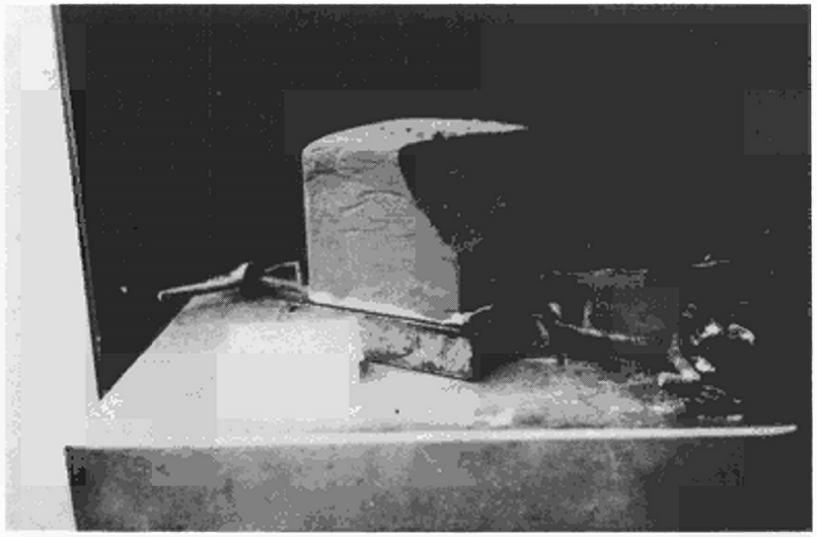
- Wissenschaftliche Begutachtung und labortechnische Untersuchungen zum technischen Großversuch – Verbringung vom MVA-Reststoffen als hydraulischer Nachversatz auf der Schachtanlage Consolidation (Wilke 1993)

ahu AG

Materialverhalten bei Anwendungsversuchen

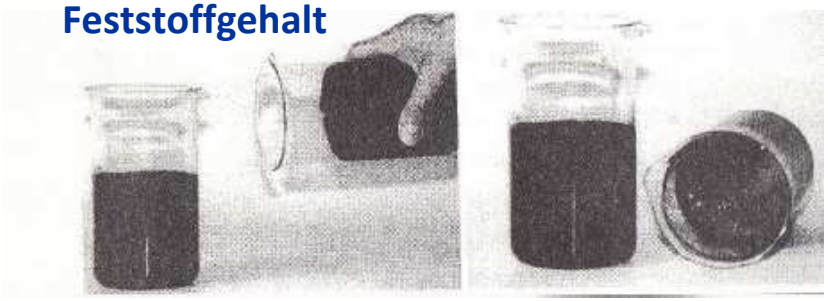
Labor

Würfel aus EFA-Wasser-Gemisch

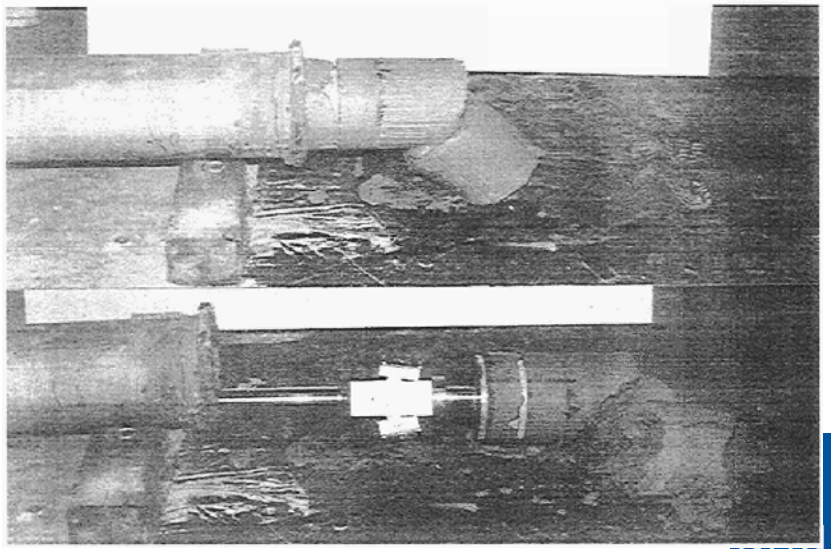


Steinkohlenbergbauverein Essen|
Ruhrkohle AG 1988
(Bericht EUR 11721 DE)

Typisches Versatzgut mit den geforderten thixotropen Eigenschaften und hohem Feststoffgehalt



Hußmann und Klee|
1. Kolloquium zum Bergbau und Umweltschutz in Aachen 2001



Herausdrückvorgang mit Rohrreinigungsgerät

Mez et al.| DMT 1999
(Bericht EUR 17955 DE)

Zustand der Suspension / BHV nach dem Aushärten

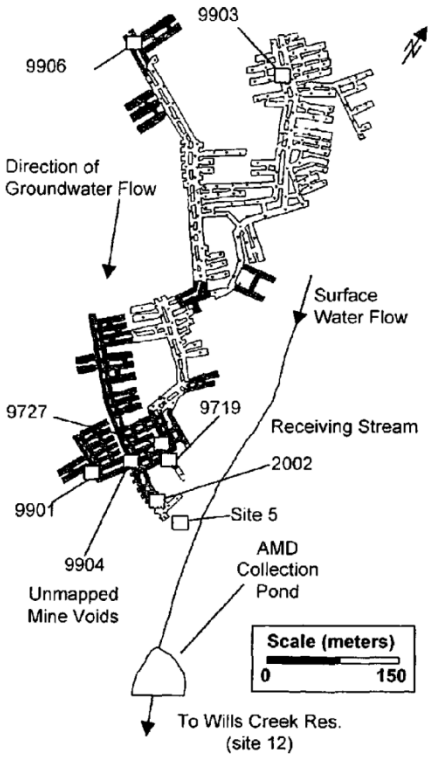
Bergwerk Walsum

Nahaufnahme einer Ortsbrust Gefüge aus Bruchbergen und Füllstoff nach Einbau über Schlepprohr

Thiehofe | Ruhrkohle AG 1991
(BMFT Bericht 0326416B)

ahu AG

Welche Eigenschaften hat die BHV?



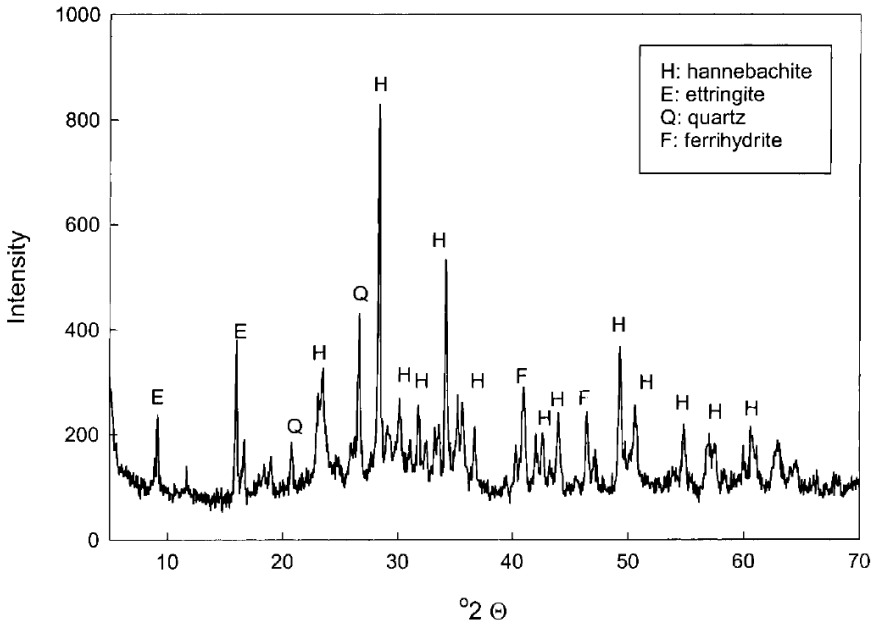
Lamminen M, Wood J, Walker H, Chin Y-P, He Y, and Samuel J. Traina S J - J. Environ. Qual. 30: 1371–1381 (2001).

Taerakul P, Lamminen M, He Y, Walker H W, Traina S J and Whitlatch E - J. Environ. Engineering 130: 816 (2004).

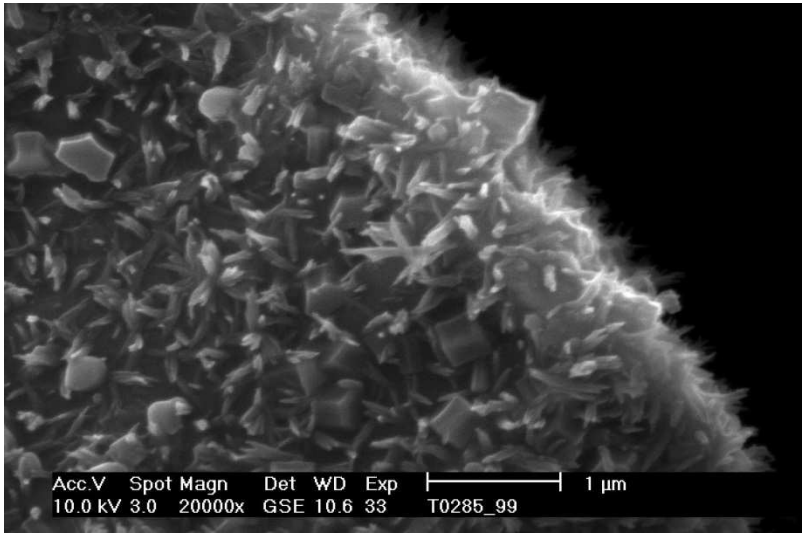
Ein Analogon: Steinkohle Tiefbau Ohio

- Nach 2-3 Jahren erhärtet
- kein durchgreifender Säureangriff

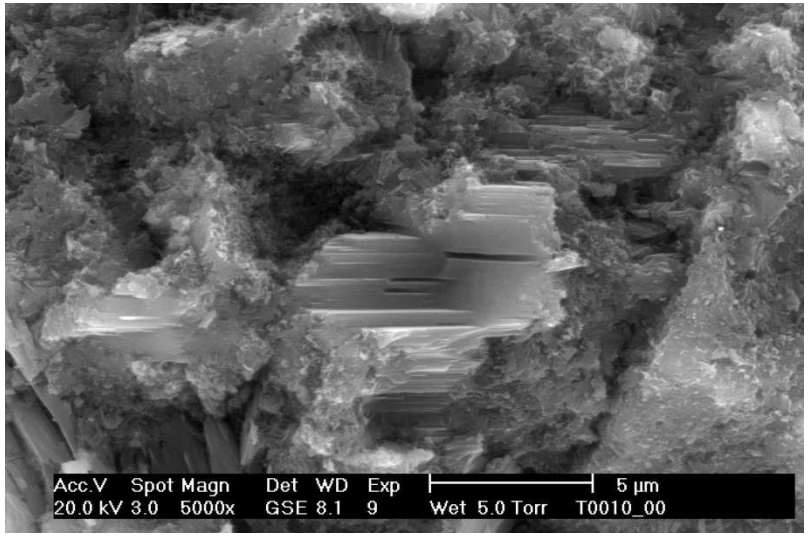
H: $Ca_2(SO_3)_2 \cdot H_2O$
E: $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$



Erstarren und Erhärten von Zementstein



ESEM-Aufnahme von Zementstein nach **3 Stunden Hydratation (Erstarren)**.
Sichtbar sind erste nadelige CSH-Primärkristallite und kurzstengelige prismatische Ettringitkristalle.

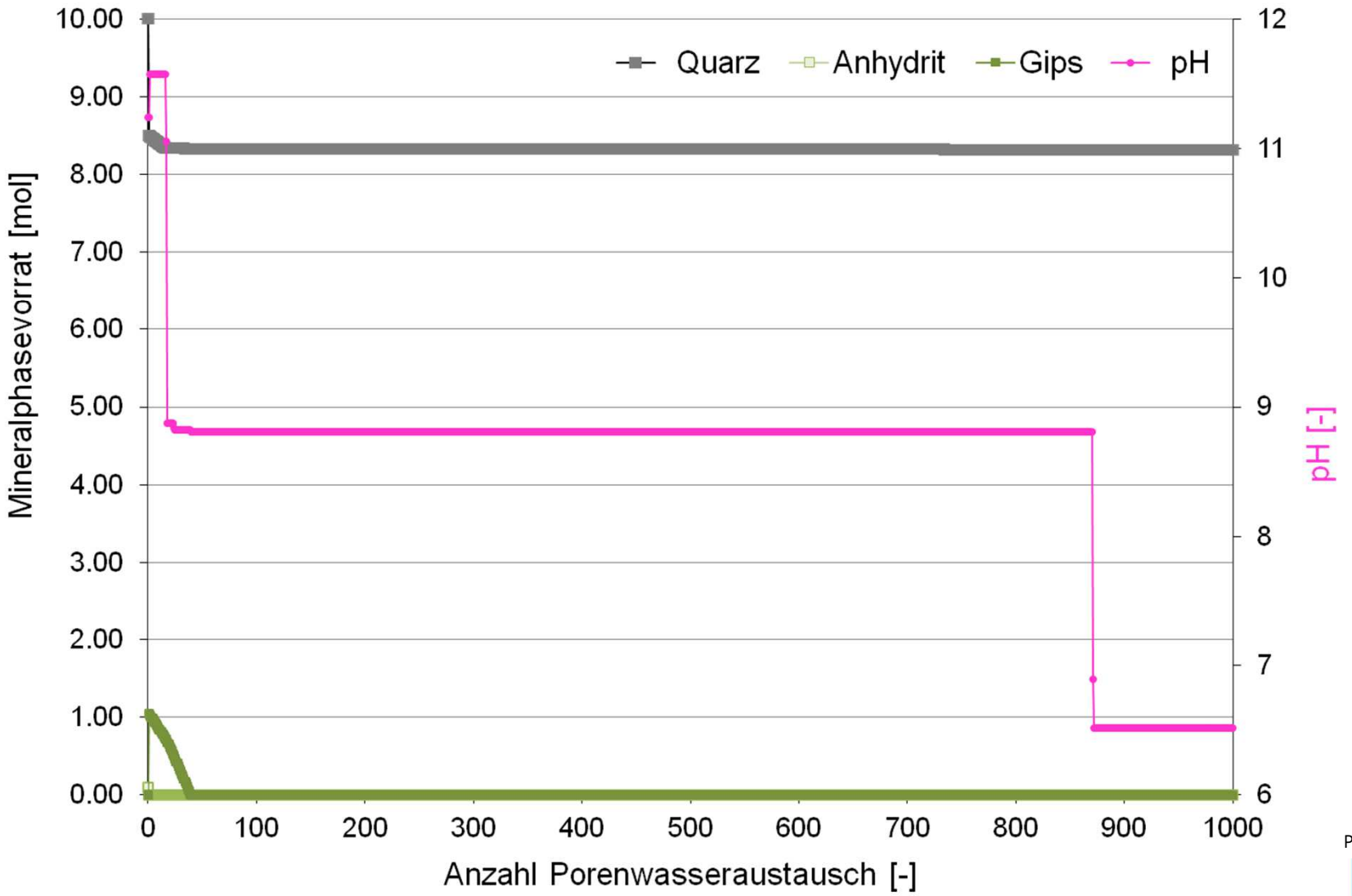


ESEM-Aufnahme von Zementstein nach **28 Tagen Hydratation (Erhärten)**.
Sichtbar sind das dichte CSH-Gefüge und bankige Calciumhydroxidkristalle.

Zementtaschenbuch 50. Ausgabe; Hrsg. Verein deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf Verlag Bau +Technik, 2002

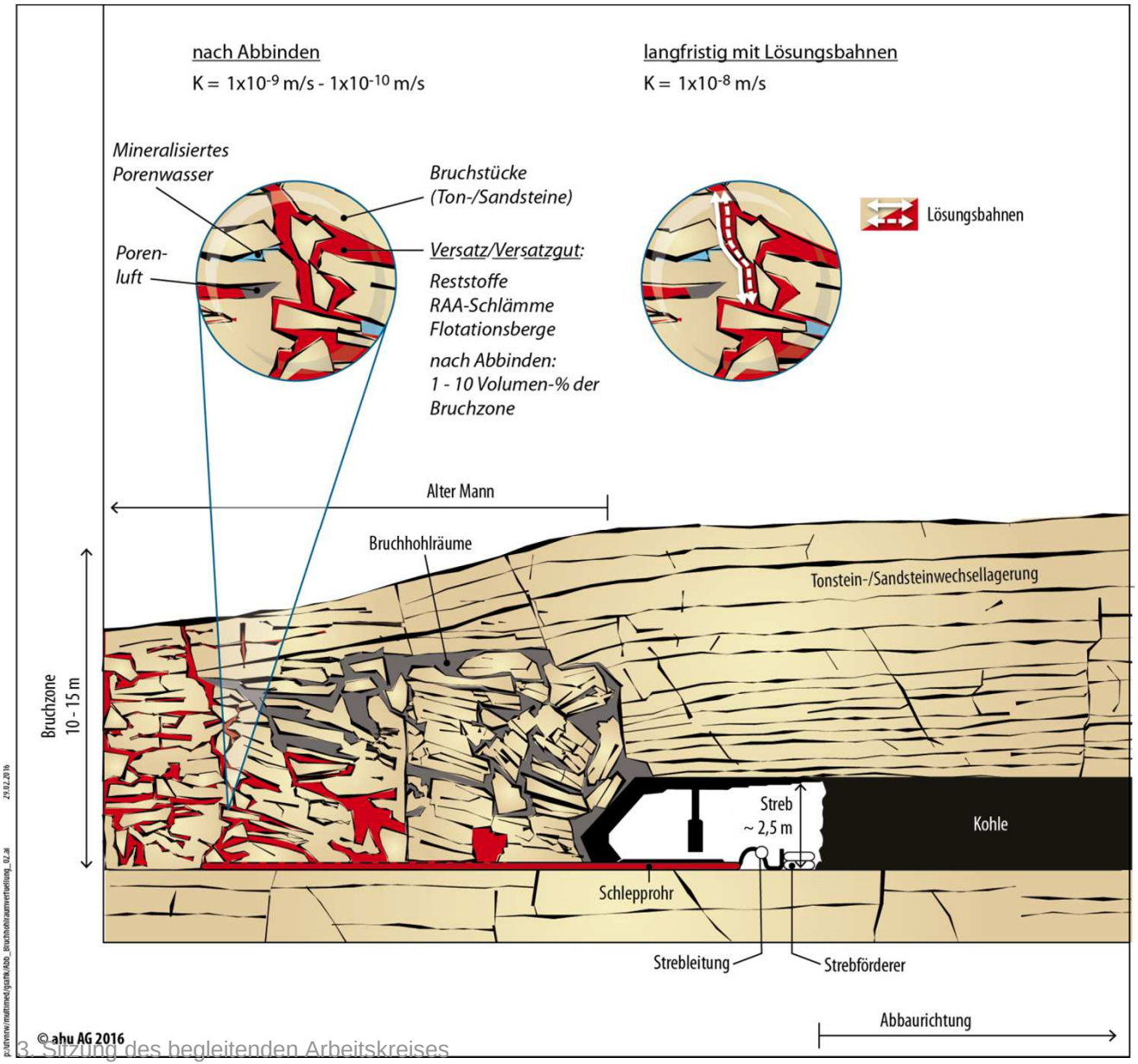
ahu AG

pH-Werterhöhung: chemische Barriere



PhreeqC 3.pqi

BHV


nach Abbinden
K = 1x10-9 m/s - 1x10-10 m/s
langfristig mit Lösungsbahnen
K = 1x10-8 m/s
Mineralisiertes Porenwasser
Poren-luft
Bruchstücke (Ton-/Sandsteine)
Versatz/Versatzgut:
Reststoffe
RAA-Schlämme
Flotationsberge
nach Abbinden:
1 - 10 Volumen-% der Bruchzone
Lösungsbahnen
Alter Mann
Bruchhohlräume
Tonstein-/Sandsteinwechsellagerung
Bruchzone 10 - 15 m
Streb ~ 2,5 m
Kohle
Schlepprohr
Strebleitung
Strebförderer
Abbaurichtung
© ahu AG 2016

Überschusswasser

Definition Überschusswasser

Zement kann eine Wassermenge von etwa 40 % seiner Masse binden (Wasserzementwert 0,40).

Weist ein **Zementleim** einen höheren Wasserzementwert auf, so wird das nicht mehr vom Zement gebundene Wasser mit Überschusswasser bezeichnet.

Aus: http://baulexikon.beuth.de/UEBERSCHUSSWASSER.HTM

ahu AG

Wann tritt Überschusswasser auf?

- Phasentrennung bei Transport oder Versatz
- Ungünstiges Einstellen der Suspensionseigenschaften

ahu AG

Wurde Überschusswasser beobachtet?

Ja:

- In wenigen Einzelfällen zu Zeiten der Großversuche BW Walsum bei Vorversuchen, die 1985/86 zur generellen Entwicklung einer Verbringungstechnik und damit verbundenen Anforderungen an die Suspension durchgeführt wurden.

Nein:

- bei Betriebsstörungen (Abschlussberichte Grimberg)
- in Bohrungen in die BHV (Consolidation)
- in der aufgefahrenen Erkundungsstrecke (Walsum)

ahu AG

Bestimmung des Feuchtegehaltes der BHV

- Auffahren einer Erkundungsstrecke 04.10-2.12.1988 in Verfüllbereich des III Großversuchs 21.03-06.04.1988 Flöz EF (Bh. 44) Bergwerk Walsum erfolgt
- Versatzmaterial 30 % Flotationsberge, 70 % EFA
- 0.9 – 1,23 m^3 Suspension je m^2 abgebauter Flözfläche entsprechend einem Verfüllungsgrad von 65-89%.

(Thiehofe | Ruhrkohle AG, 1991; BMFT 0326416 B)

ahu AG

Bestimmung des Feuchtegehaltes der BHV

- „Das Gefüge aus verkeilten Bruchbergen und mit Füllstoff versetzten Zwischenräumen war so fest, dass für den Vortrieb gesprengt werden musste“. (6 Monate nach Versatz)
- Handschriftliche Skizzen der Verteilung der Suspension wurden angefertigt.
- „Das für die hydraulische Förderung und das Verpressen auf 25 – 30 Gew.% Wasser angereicherte Gemisch war weitgehend entwässert und standfest. Schlammreste wurden nicht festgestellt.

(Thiehofe | Ruhrkohle AG, 1991; BMFT 0326416 B)

ahu AG

Bestimmung des Feuchtegehaltes der BHV

- „Restwassergehalte des Füllgutes bewegten sich zwischen 12 und 18 %; die ehemals trockenen Bruchberge hatten eine Feuchte zwischen 3,0 und 5,5 % .“
- „Da während der Injektionsphase und in dem Zeitraum bis zur Auffahrung der Erkundungsstrecke keine Überschusswasseraustritte beobachtet werden, ist davon auszugehen, daß dieses vom Bruchhaufwerk und dem Nebengestein aufgenommen wurde.“

(Thiehofe | Ruhrkohle AG, 1991; BMFT 0326416 B)

ahu AG

Gab es Überschusswasser?

Ist es wahrscheinlich? Nein

- Unterschiedliche Rezepturen haben unterschiedliche Wasseransprüche (Bsp.: identische Flotationsberge mit unterschiedlichen Gehalten an Restkohle, brennbare Anteile in EFA Voerde)
- Rezepterstellung mittels Laborversuchen
- Überschusswasser verändert die Transporteigenschaften der Suspension ungünstig (Sedimentation) und steigert das Risiko von Betriebsstörungen
- Viskosität der Suspension wurde durch Rohrviskosimeter und Bestimmung des Ausbreitmaßes überwacht

ahu AG

Mögliche geogene Hintergrundzusammensetzungen des Tiefengrundwassers zur Modellierung

Probenbezeichnung	Einheit	Probe (Wedewardt 1995)	RAG-Wasser (Jäger 1992 und Klinger 1994)		Mittelwerte (Wedewardt 1995)		
		Z2	RAG	prozentuale Abweichung RAG bezogen auf Z2	MW	prozentuale Abweichung MW bezogen auf RAG	prozentuale Abweichung MW bezogen auf Z2
pH		6,84	7,10		6,45		
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	165200	141000	**15**	131488	-7	**20**
Abdampfrückstand	mg/L	166200	127920	**23**	119183	-7	**28**
Na	mg/L	40000	46000	**-15**	32863	-29	**18**
K	mg/L	426	390	**8**	394	1	**8**
Ca	mg/L	9090	2000	**78**	5305	165	**42**
Mg	mg/L	2200	1020	**54**	2772	172	**-26**
Sr	mg/L	475	175	**63**	337	92	**29**
Ba	mg/L	2460	275	**89**	796	190	**68**
Cl	mg/L	86200	78000	**10**	64613	-17	**25**
HCO3	mg/L	62	60	**3**	107	78	**-72**

ahu AG

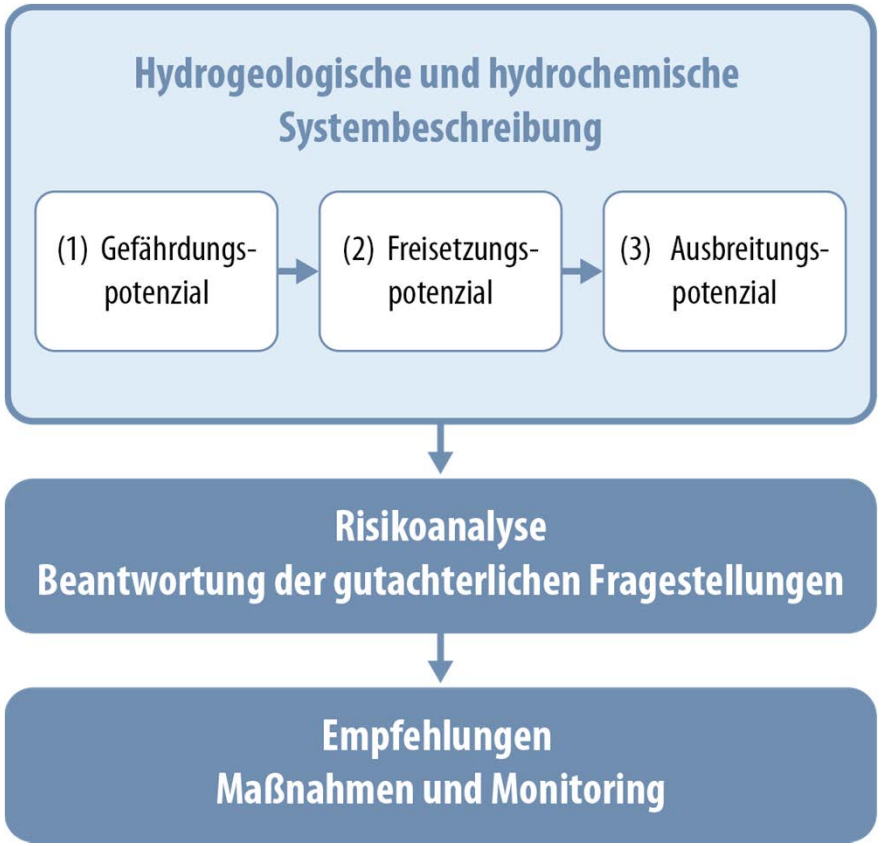
(5) HYDROGEOLOGISCHES SYSTEM FREISETZUNG UND AUSBREITUNG

(5.1) EINFÜHRUNG (AHU AG)

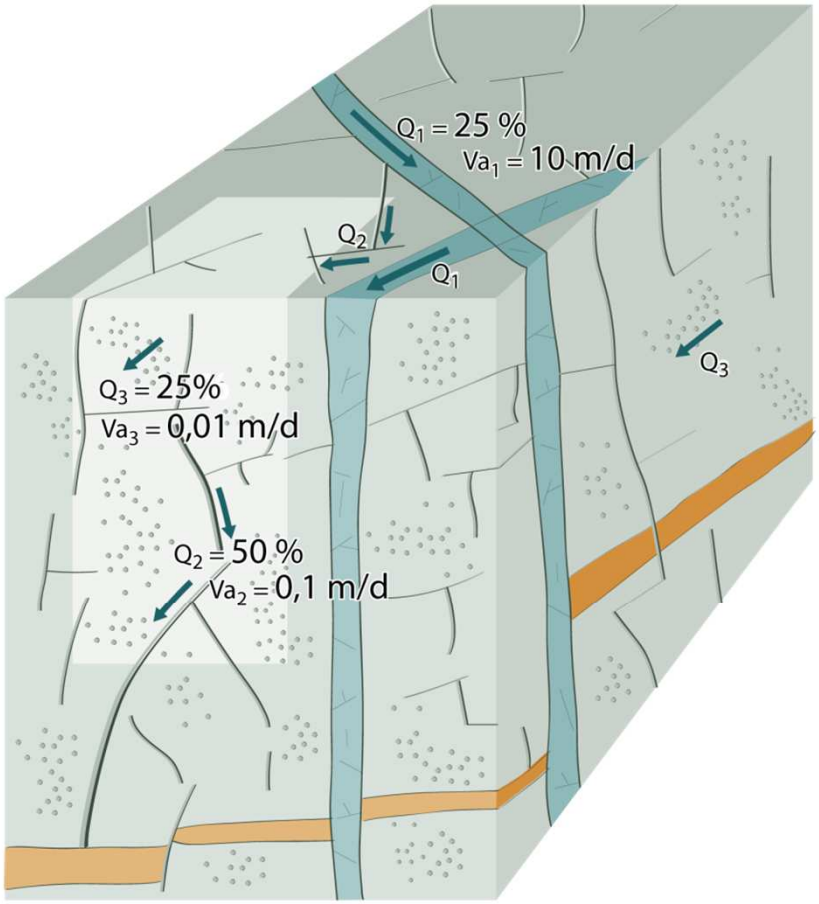
Risikoanalyse

- 1.750 t Schwermetalle (HA)
- 7,2 kg Dioxine/Furane (HA)

  = 122 g 2,3,7,8-TCDD TEQ
- 9.295 t PCB (alle BW)



„Double Porosity“ System



Q_1 = Fluss auf den Störungssystemen
Q_2 = Fluss auf den Klüften / Kleinstörungen / Schichtflächen (n = 1-3 %)
Q_3 = Fluss in der Gesteins-Matrix (n_o = 15-20 %)

regionale Störung (diskrete Elemente nach HAGEN-POISEUILLE)

Matrix mit Klüften und Poren (Kontinuum)

hydraulisch wirksame Stauer

Strömung auf:
Q1 Störung
Q2 Klüfte
Q3 Sandsteinporen

Unterschiede Geschwindigkeit:

Faktor 1.000

ahu AG

Hauptwasserweg auf Haus Aden

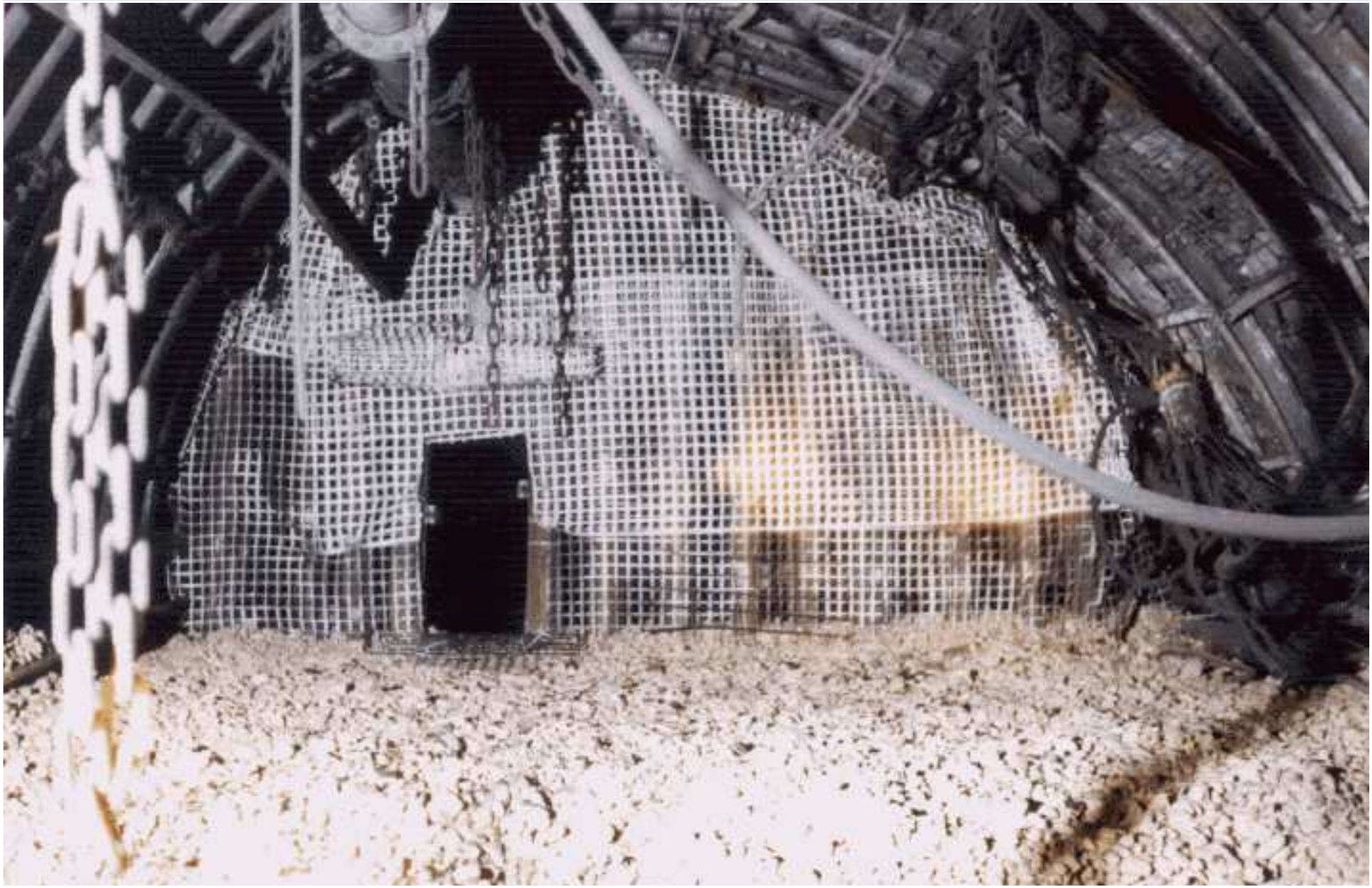
Hauptwasserweg auf Auguste Victoria 6. Sohle

Streckenquerschnitte max. 27 m²; bei Konvergenz mindestens 8-10 m²

Sicherung der späteren Wasserführung

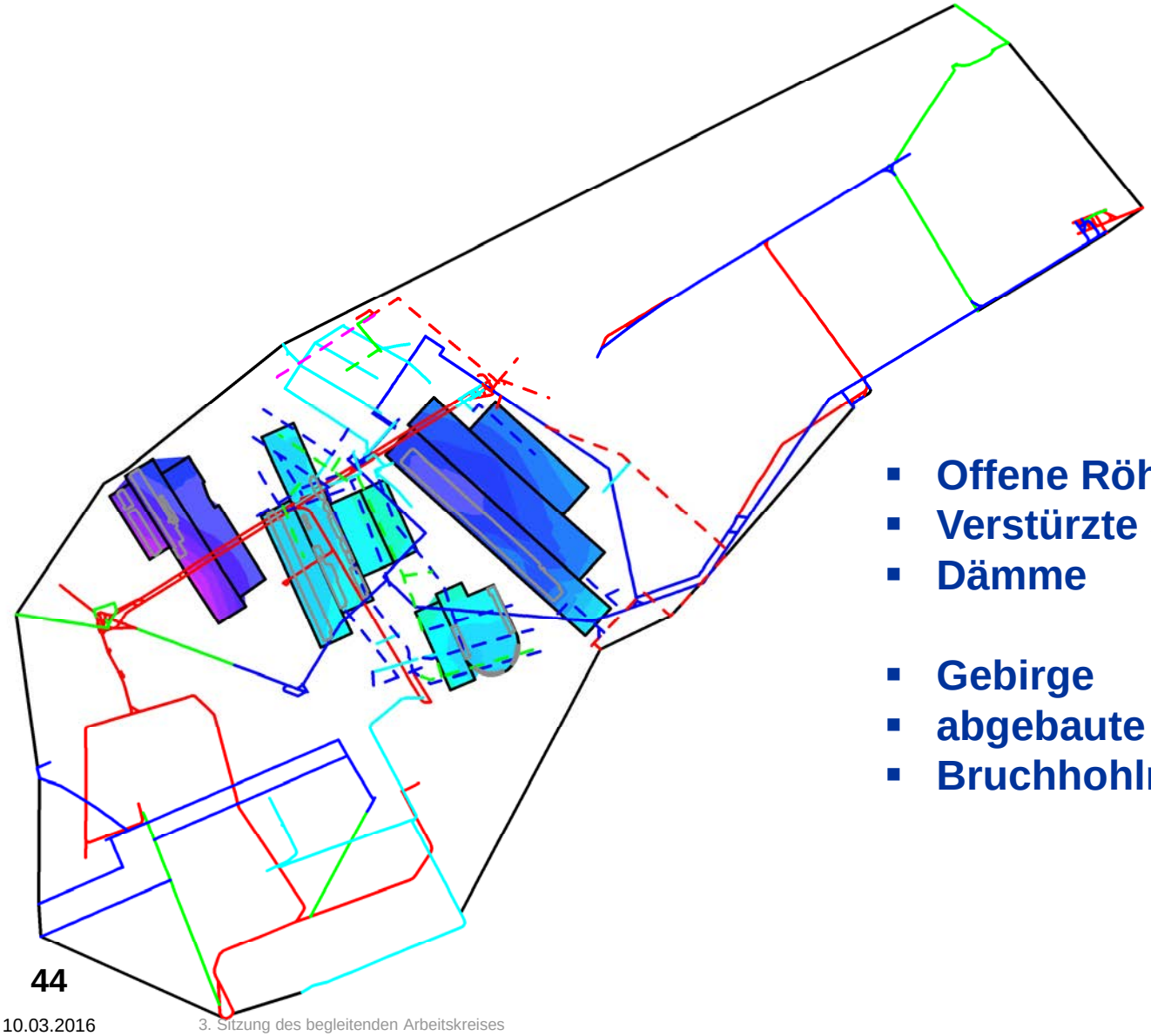
Wasserdurchlässiger Ausbau der Strecken

Holzfänger



Steuerung durch Dämme

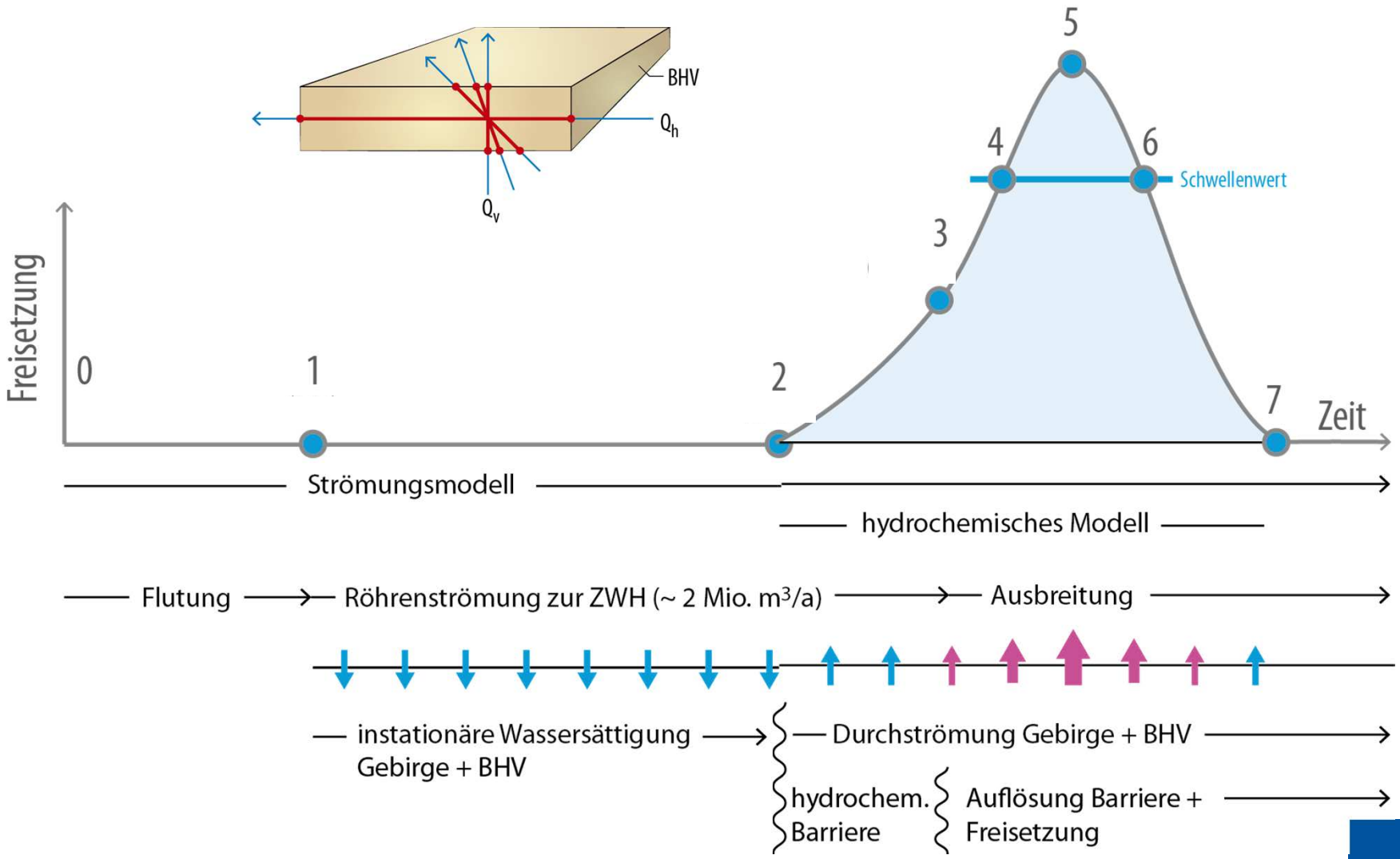
Umsetzung im Strömungsmodell



- Offene Röhren / Strecken
- Verstürzte Strecken
- Dämme

- Gebirge
- abgebaute Bereiche
- Bruchhohlraumverfüllung

Ziele der Modellierungen

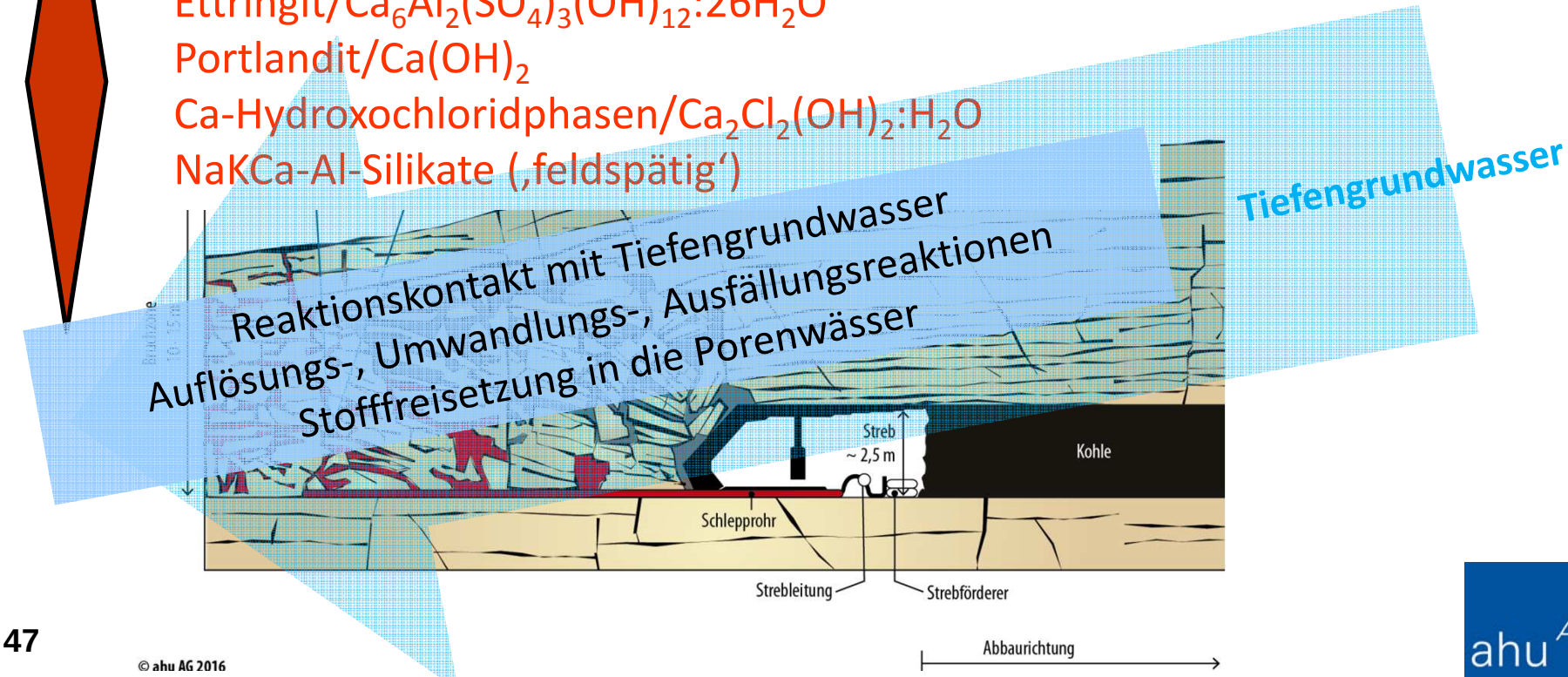


(5.2) FREISETZUNGSPOTENTIAL (PROF. VAN BERK)

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1)

- $Quarz/SiO_2$
- $Halit/NaCl$
- $Sylvin/KCl$
- $Anhydrit/CaSO_4$, $Gips/CaSO_4:2H_2O$
- $Glauberit/Na_2Ca(SO_4)_2$
- $Calcit/CaCO_3$
- $Ettringit/Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}:26H_2O$
- $Portlandit/Ca(OH)_2$
- $Ca\text{-}Hydroxochloridphasen/Ca_2Cl_2(OH)_2:H_2O$
- NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')



© ahu AG 2016

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (2)

Basisgutachten : Mineralische Zusammensetzung

Gemische aus Reststoff-bürtigen Mineralphasen und glasigen Partikeln

Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')

$SiO_2/Al_2O_3/CaO$

Schwermetalle u.a. Blei, Zink, Cadmium
in hydroxidischer und karbonatischer Bindungsform?

Stofffreisetzung Empirischer Ansatz der Basisgutachten
Untersuchungen an Reststoff-bürtigen Stoffen (3)

* Qualitative / Halbquantitative Untersuchungen
  - Raster Elektronen Mikroskopie (REM)
  - Röntgendiffraktometrie
  - Lichtmikroskopie

* Kleinmaßstäbliche Kurzzeit-Elutionsversuche im Labor
  - Schüttelversuche (‚S4‘)
  - Druck-Säulen
  - Kaskaden
  - ‚Container-Versuche‘ (größermaßstäblich)

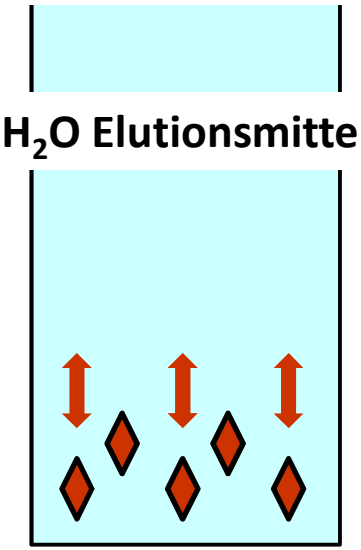
* Forschungsansatz: Rein empirischer Natur
  - Ergebnisse führen zu keinem quantitativen Prozessverständnis
  - Ergebnisse werden nicht mit Stoffgesetzlichkeiten verknüpft
  - Ergebnisse sind deshalb nicht übertragbar

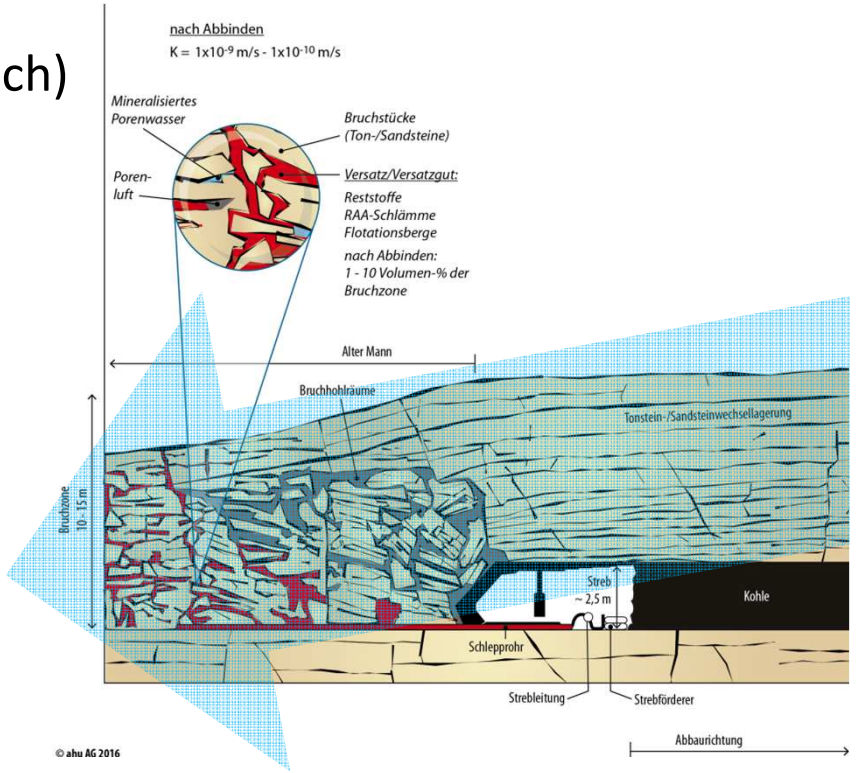
Solche „üblichen **Labormethoden**, seien es Batch- oder Perkolationsversuche mit hohen hydraulischen Gradienten und kurzen Reaktionszeiten, **können die vielfältigen geochemischen Prozesse im Versatz nicht widerspiegeln**. Hierzu sind sicherlich noch weitere Forschungsarbeiten sinnvoll und notwendig.“

Aussagen / Angaben der Basisgutachten, die auf empirischen Forschungsansatz basieren (4)

Kleinmaßstäbliche Kurzzeit-Elutionsversuche im Labor

- Schüttelversuche (‚S4‘)
- Druck-Säulen
- Kaskaden
- ‚Container-Versuche‘ (größermaßstäblich)

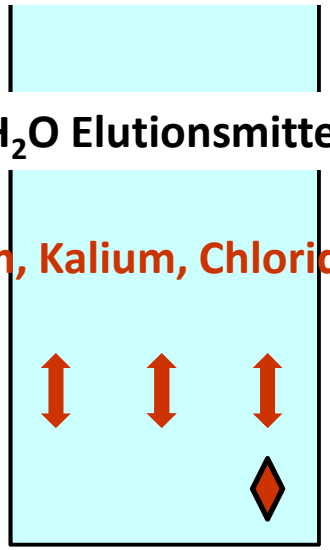




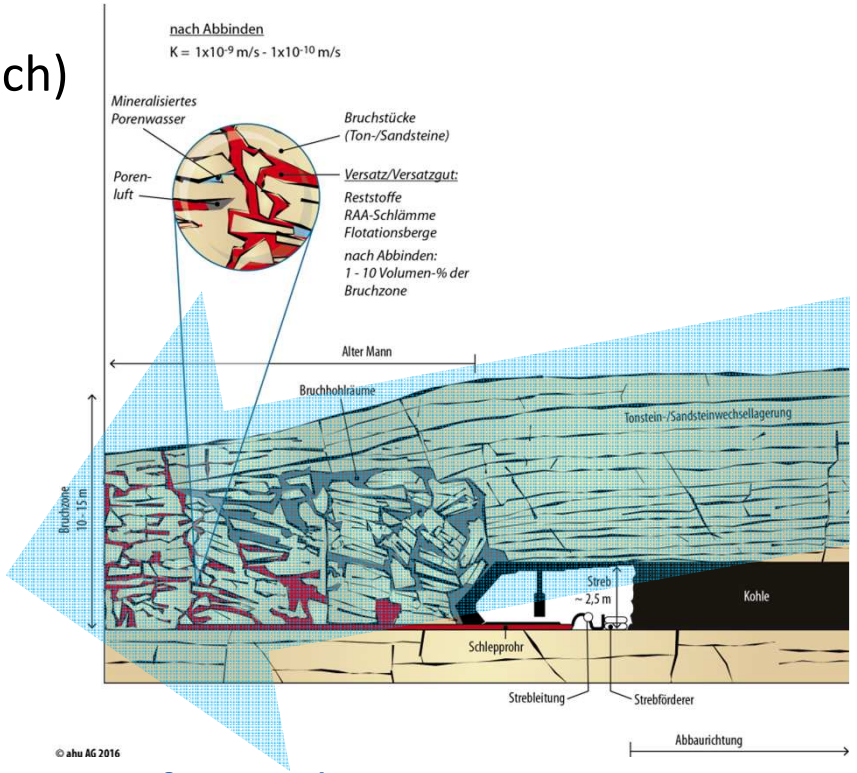
Aussagen / Angaben der Basisgutachten, die auf empirischen Forschungsansatz basieren (4f)

Kleinmaßstäbliche Kurzzeit-Elutionsversuche im Labor

- Schüttelversuche (‚S4‘)
- Druck-Säulen
- Kaskaden
- ‚Container-Versuche‘ (größermaßstäblich)



Kalzium, Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat im Wasser

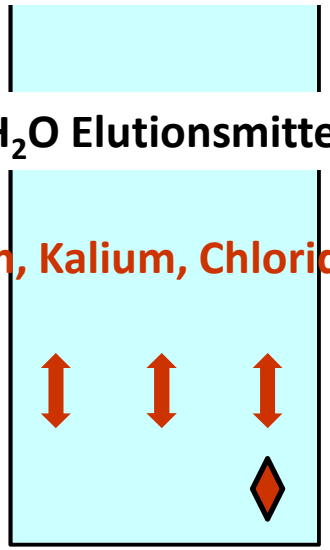


* Die Summe der maximal in wässrige Lösungen freisetzbaren Mengen an Kalzium, Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat liegt meist bei einigen Gramm bis zu Hundert Gramm/kg Rückstand.

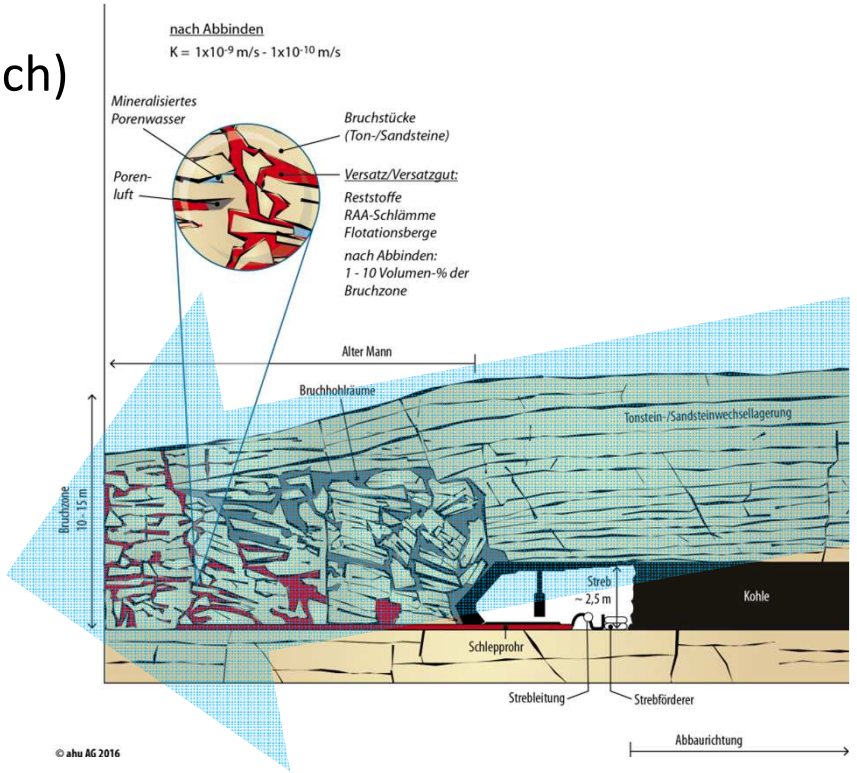
Aussagen / Angaben der Basisgutachten, die auf empirischen Forschungsansatz basieren (4ff)

Kleinmaßstäbliche Kurzzeit-Elutionsversuche im Labor

- Schüttelversuche (‚S4‘)
- Druck-Säulen
- Kaskaden
- ‚Container-Versuche‘ (größermaßstäblich)



Kalzium, Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat im Wasser

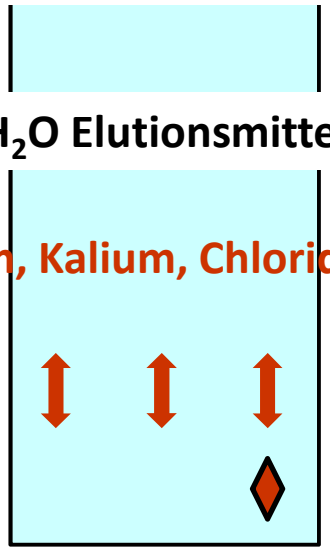


* Die pH-Werte in den wässrigen Eluaten liegen dabei meist: zwischen pH 10 und pH 13.

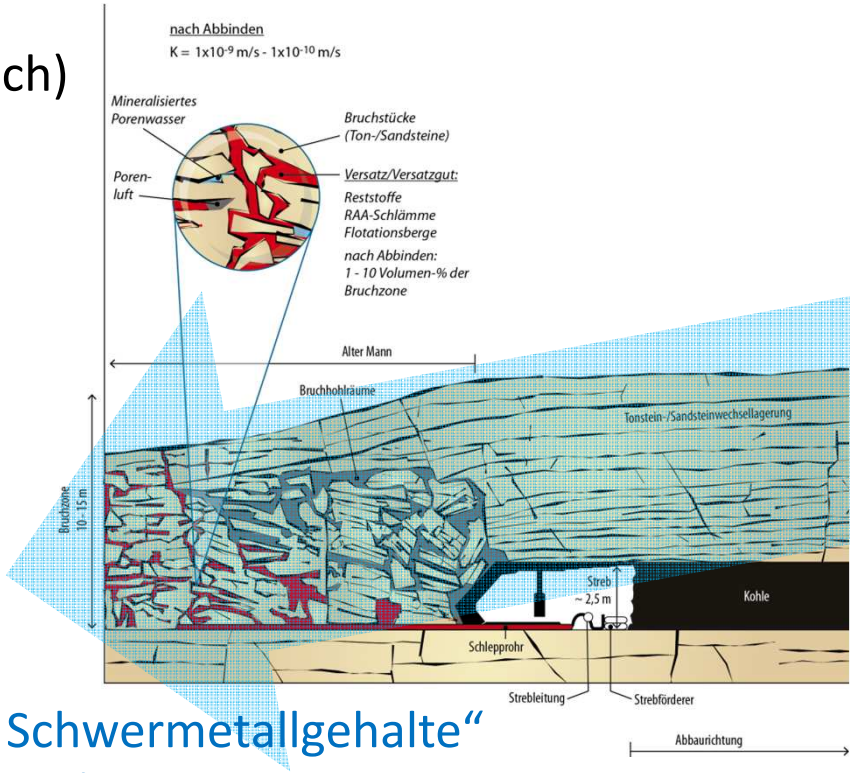
Aussagen / Angaben der Basisgutachten, die auf empirischen Forschungsansatz basieren (4fff)

Kleinmaßstäbliche Kurzzeit-Elutionsversuche im Labor

- Schüttelversuche (‚S4‘)
- Druck-Säulen
- Kaskaden
- ‚Container-Versuche‘ (größermaßstäblich)



Kalzium, Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat im Wasser



* „pH-abhängig langfristig mobilisierbare Schwermetallgehalte“

- Zink: bis zu mehreren Tausend mg/kg Rückstand
- Blei: mehrere Hundert bis Tausend mg/kg Rückstand
- Kadmium: mehrere Zehner bis zu Hundert mg/kg Rückstand.

Stofffreisetzung

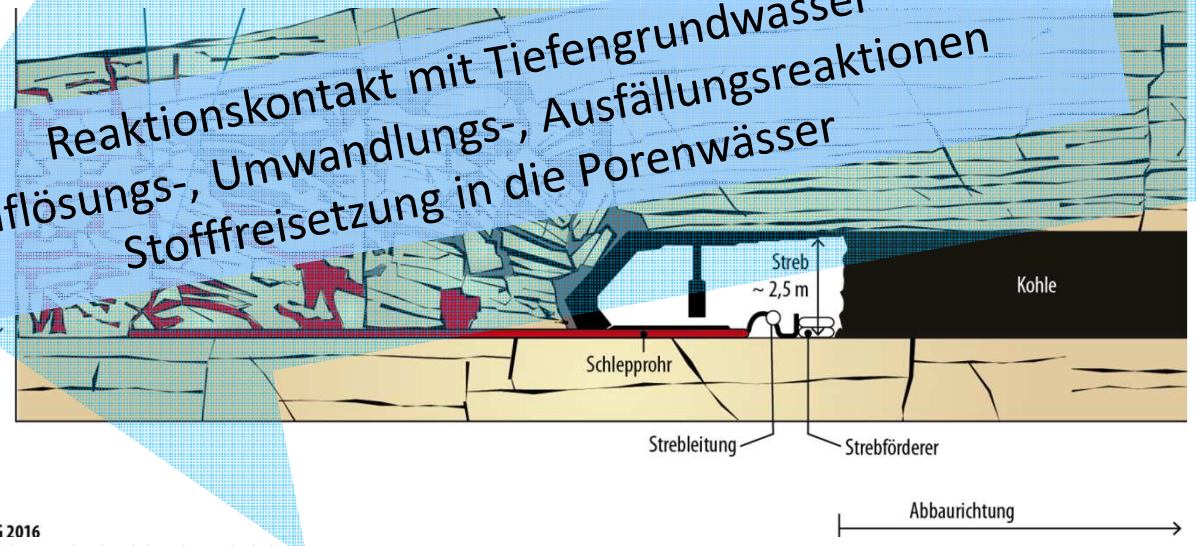
Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1w)

Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')

pH 10 - 13

Tiefengrundwasser

Reaktionskontakt mit Tiefengrundwasser
Auflösungs-, Umwandlungs-, Ausfällungsreaktionen
Stofffreisetzung in die Porenwässer



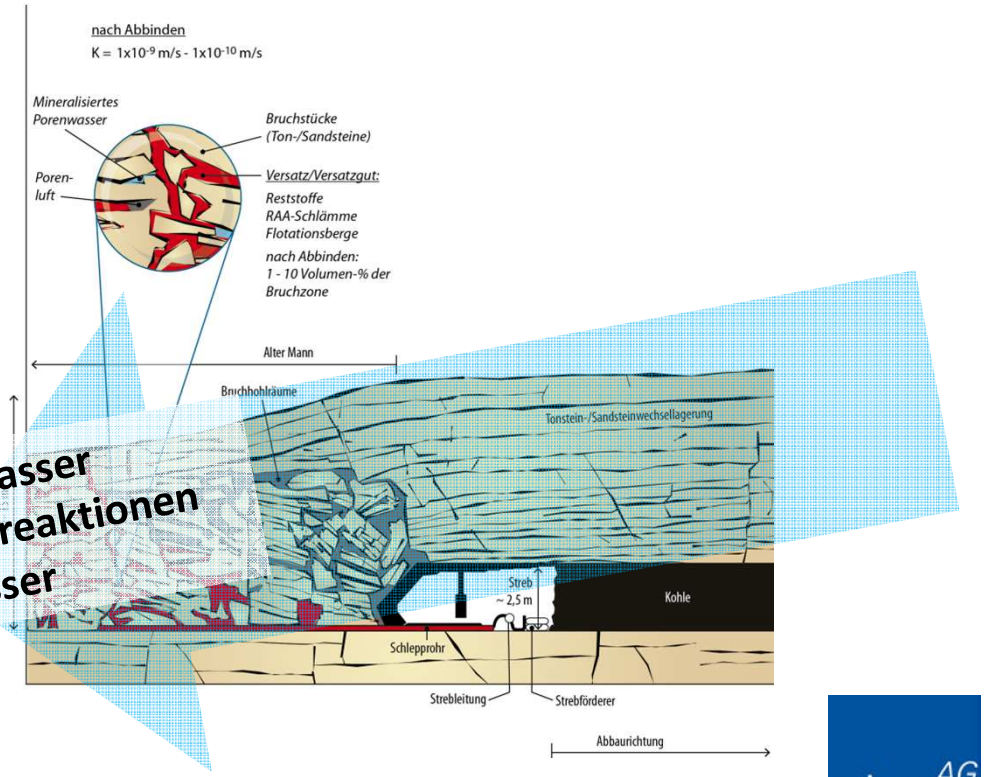
© ahu AG 2016

Forschungsansatz zur Berechnung der Stofffreisetzung
infolge der Auflösungs-, Umwandlungs- und Ausfällungsreaktionen (5)

* Forschungsansatz **ermöglicht quantitatives Prozessverständnis**
  - welche Mineralphasen lösen sich auf, wandeln sich um und/oder bilden sich neu?
  - in welchen Mengen?
  - welche Stoffkonzentrationen entwickeln sich dabei im Porenwasser?
  - warum geschieht dies?

PhreeqC 3.pqi

USGS science for a changing world



Reaktionskontakt mit Tiefengrundwasser
Auflösungs-, Umwandlungs-, Ausfällungsreaktionen
Stofffreisetzung in die Porenwässer

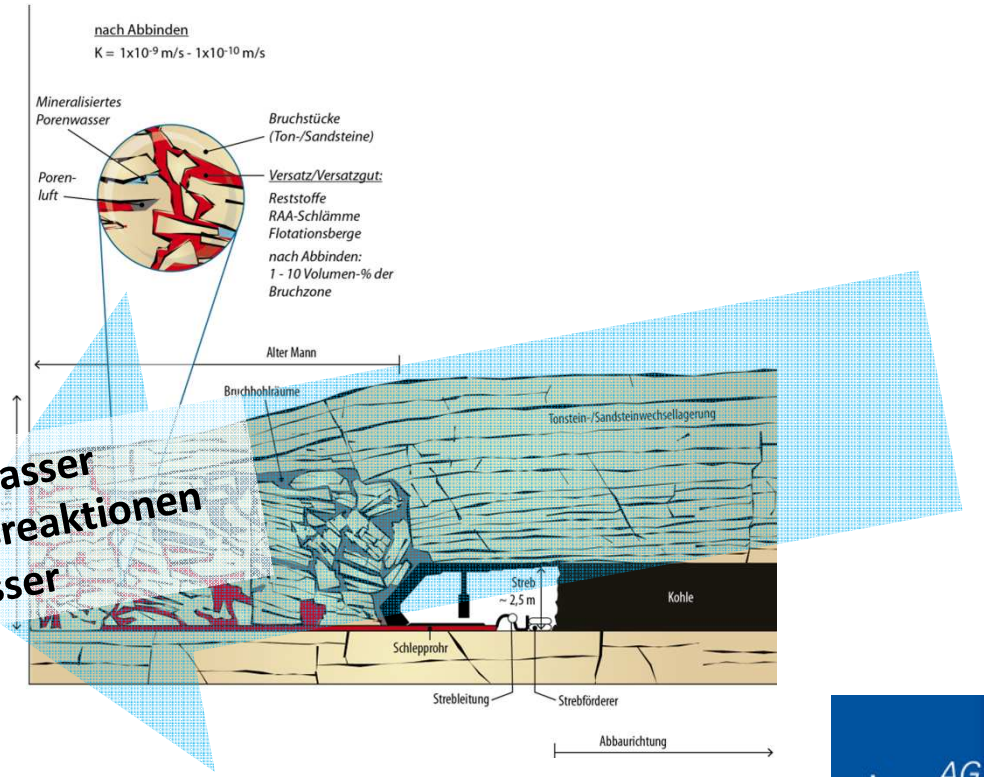
ahu AG

Forschungsansatz zur Berechnung der Stofffreisetzung
infolge der Auflösungs-, Umwandlungs- und Ausfällungsreaktionen (5f)

* Forschungsansatz ermöglicht quantitatives Prozessverständnis **auf der Grundlage allgemein gültiger und grundlegender Stoffgesetzlichkeiten**
  - chemische Thermodynamik für Reaktionsgleichgewichte
  - Massenwirkungsgesetze und Gleichgewichtskonstanten
  - Advektiv-diffusiver Stofftransport mit Grundwässern

PhreeqC 3.pqi

USGS science for a changing world



Reaktionskontakt mit Tiefengrundwasser
Auflösungs-, Umwandlungs-, Ausfällungsreaktionen
Stofffreisetzung in die Porenwässer

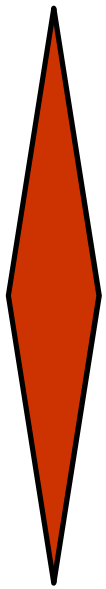
ahu AG

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag

Daten und Informationen aus den Basisgutachten / Mineralische Zusammensetzung (1w)

Gemische aus Reststoff-bürtigen Mineralphasen und glasigen Partikeln



$SiO_2/Al_2O_3/CaO$

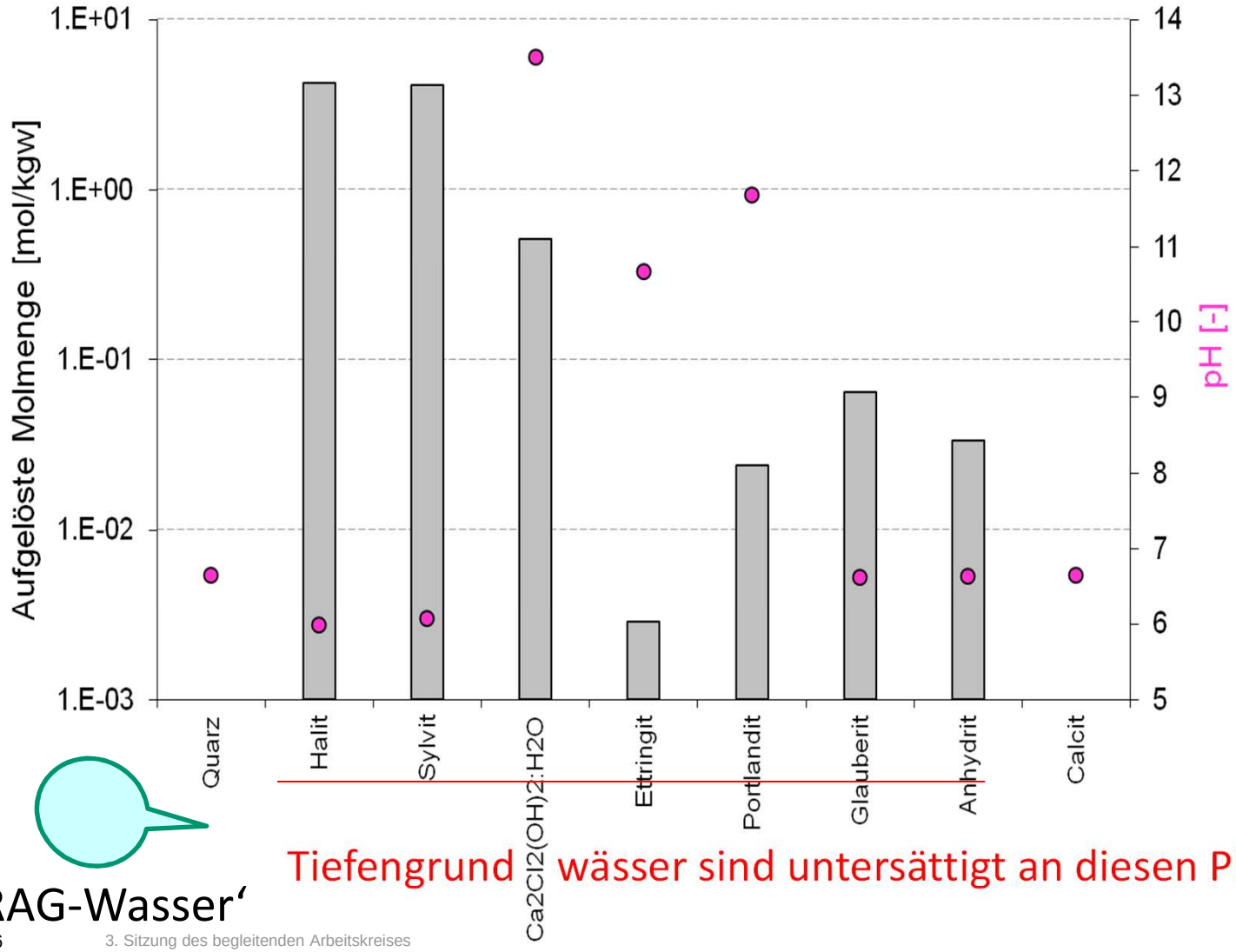
Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')

Schwermetalle u.a. Blei, Zink, Cadmium
in hydroxidischer und karbonatischer Bindungsform?

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit

einzelner Reststoff-bürtiger Mineralphasen im ‚RAG-Wasser‘

Becherglas-Modelle / Vorstudien für die Herleitung von ‚Quelltermen‘ (6)



PhreeqC 3.pqi

USGS science for a changing world

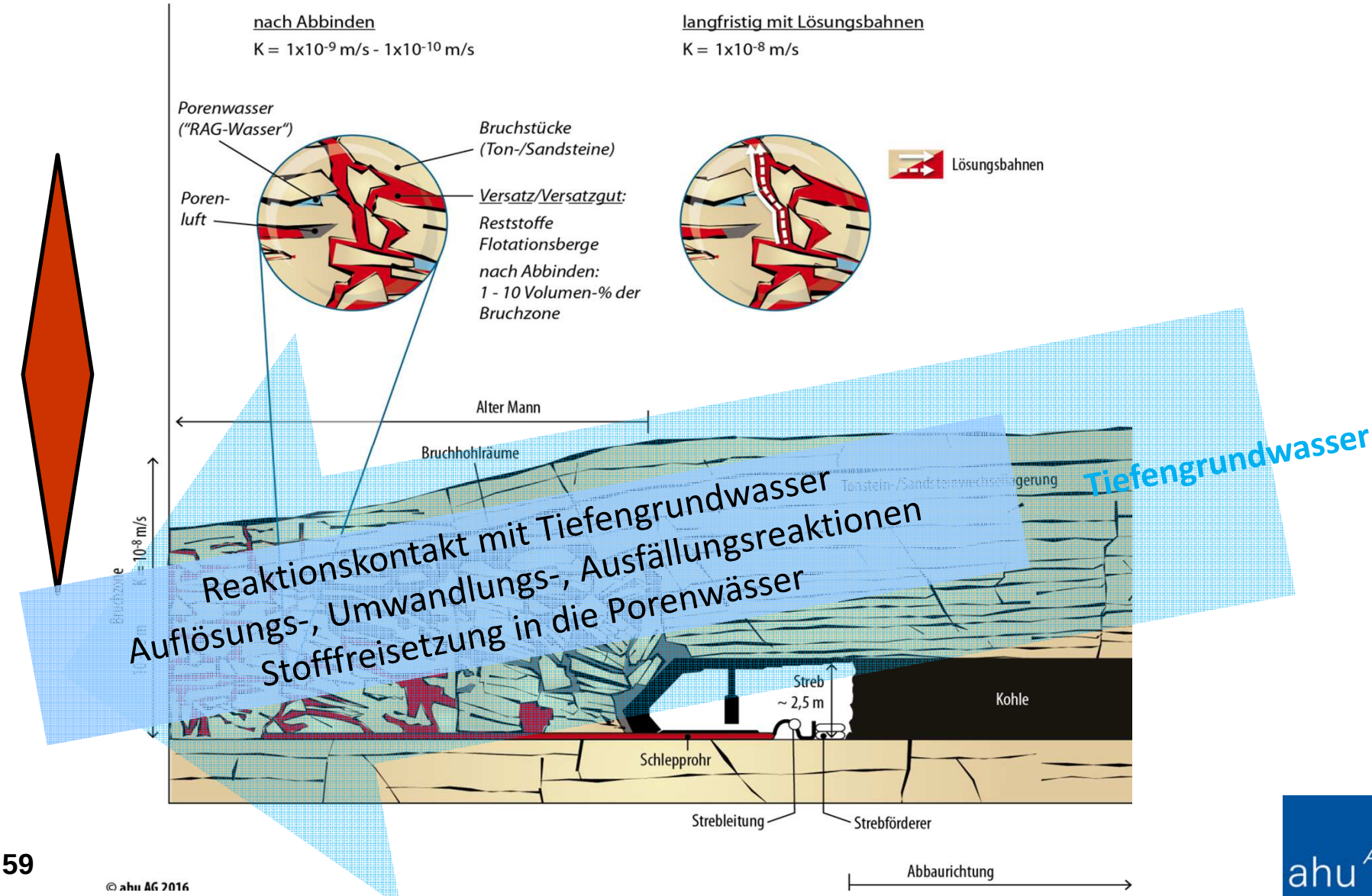
58‚RAG-Wasser‘

Tiefengrundwässer sind untersättigt an diesen Phasen

ahu AG

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1w)

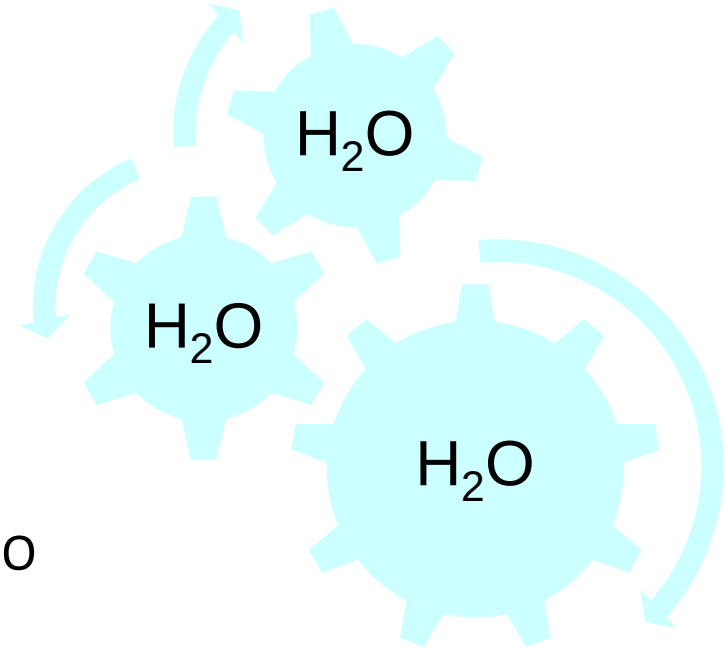


© ahu AG 2016

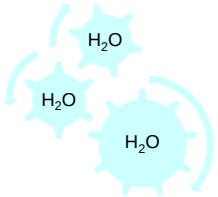
PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit der Mineralphasen im Gemisch

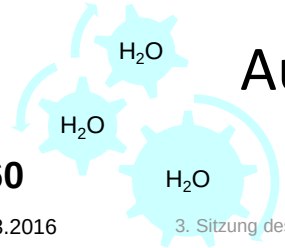
Modellierungsergebnisse / Becherglas-Modelle (7)

Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')



Schwermetalle Blei, Zink, Cadmium
in hydroxidischer und karbonatischer Bindungsform



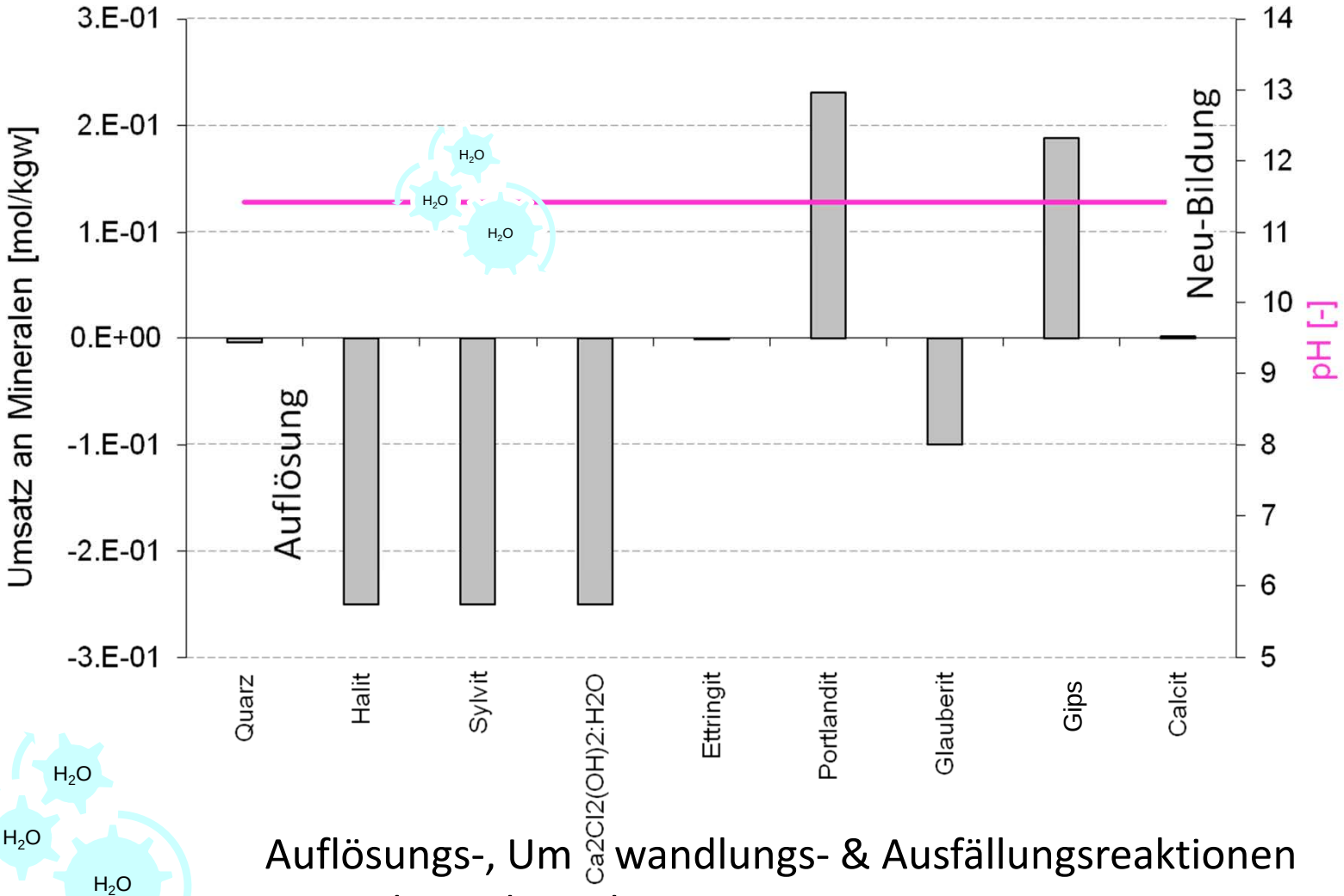


Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit der Mineralphasen im Gemisch

PhreeqC 3.pqi

Ohne ‚sekundäre' Phasen Modellierungsergebnisse / Becherglas-Modelle (8)

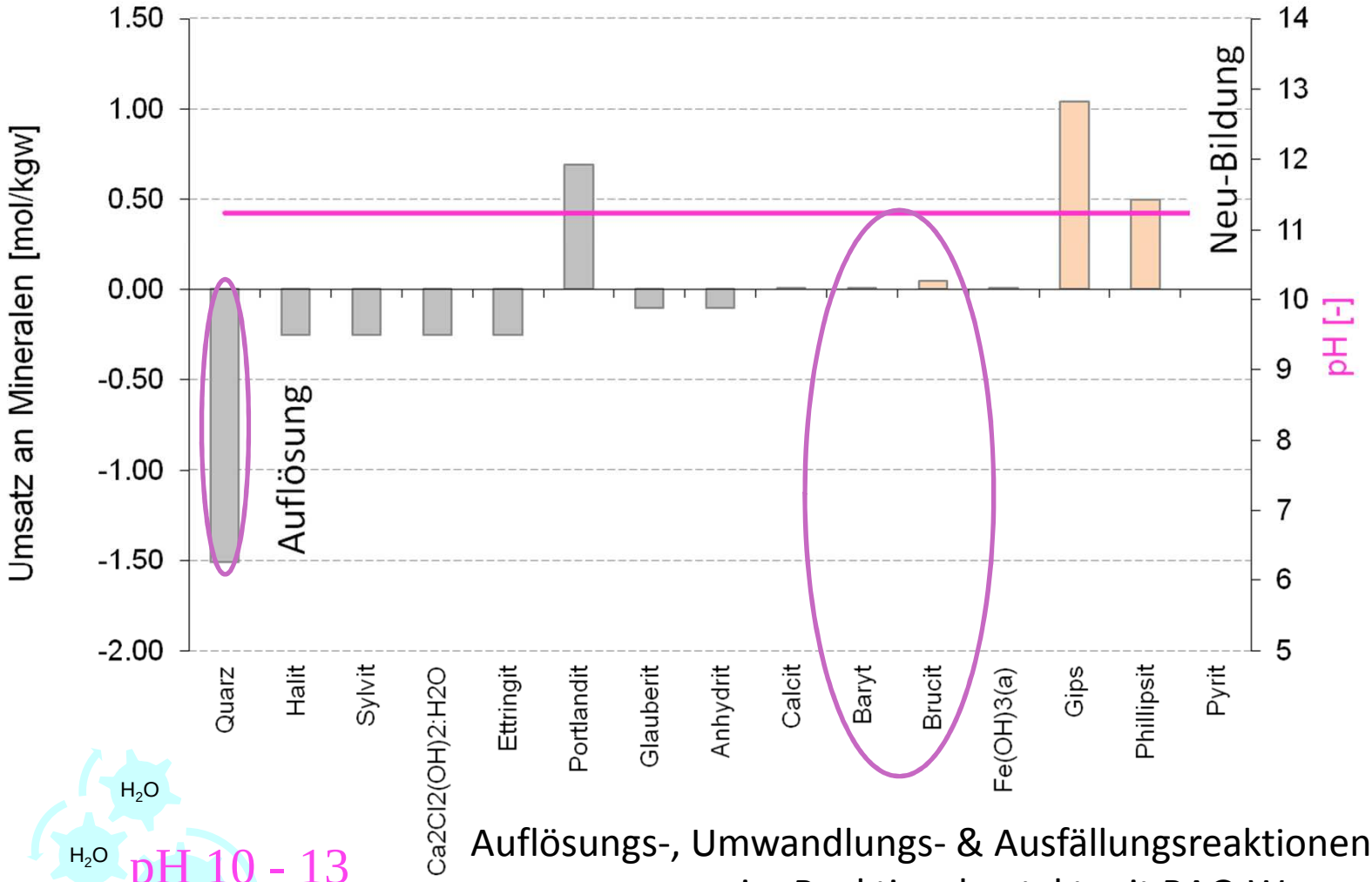


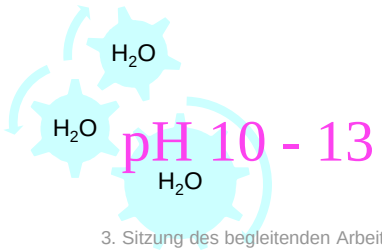
Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit der Mineralphasen im Gemisch

PhreeqC 3pqi

Mit ‚sekundäre' Phasen Modellierungsergebnisse / Becherglas-Modelle (9)



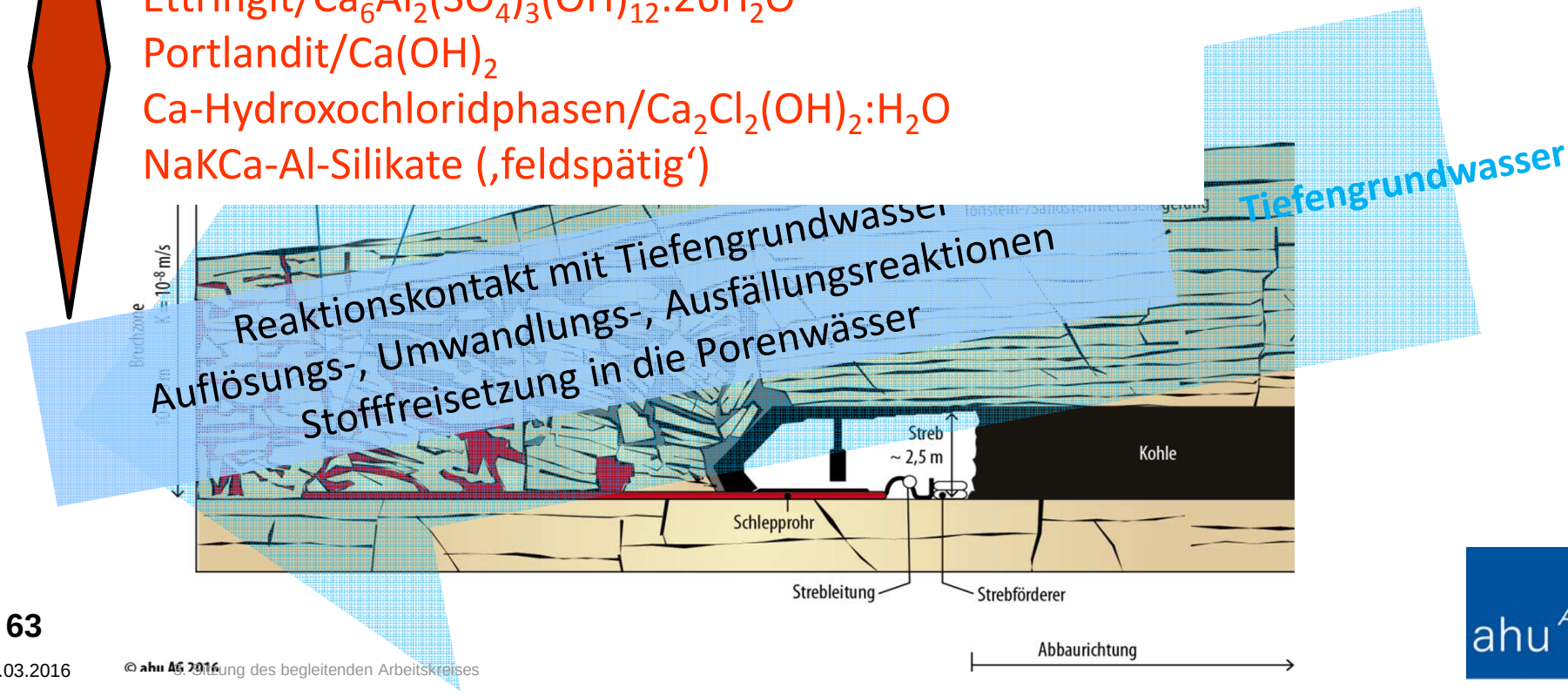


Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser
Primäre & Sekundäre Phasen

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1w)

Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')

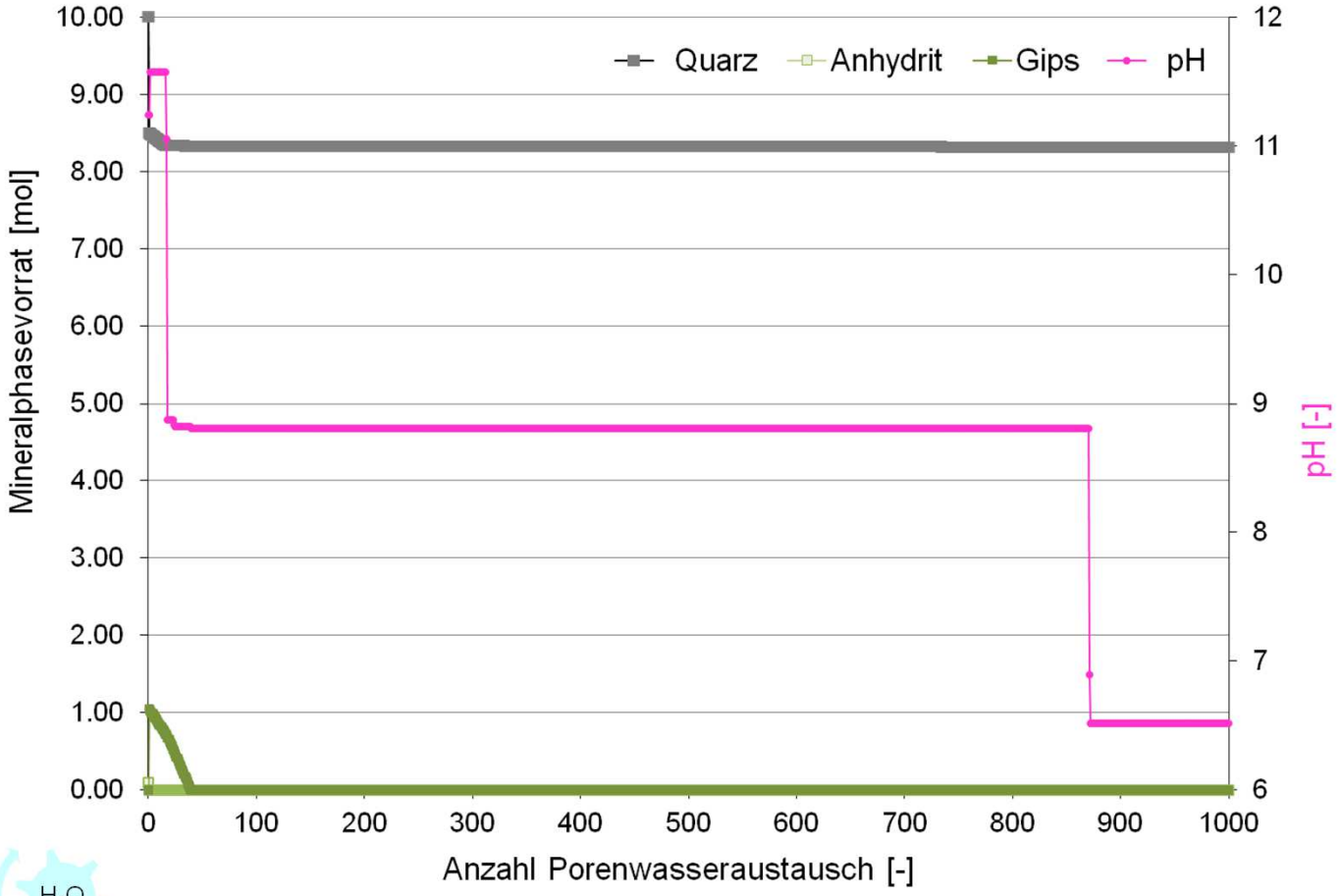


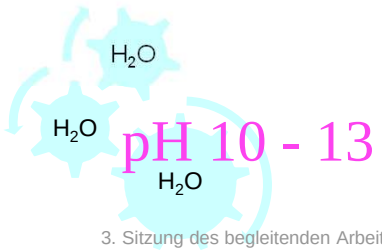
© ahu AG 2016

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit des Mineralgemisches

PhreeqC 3.pqi

bei zunehmender Anzal der „Porenwasseraustausche“ (10)



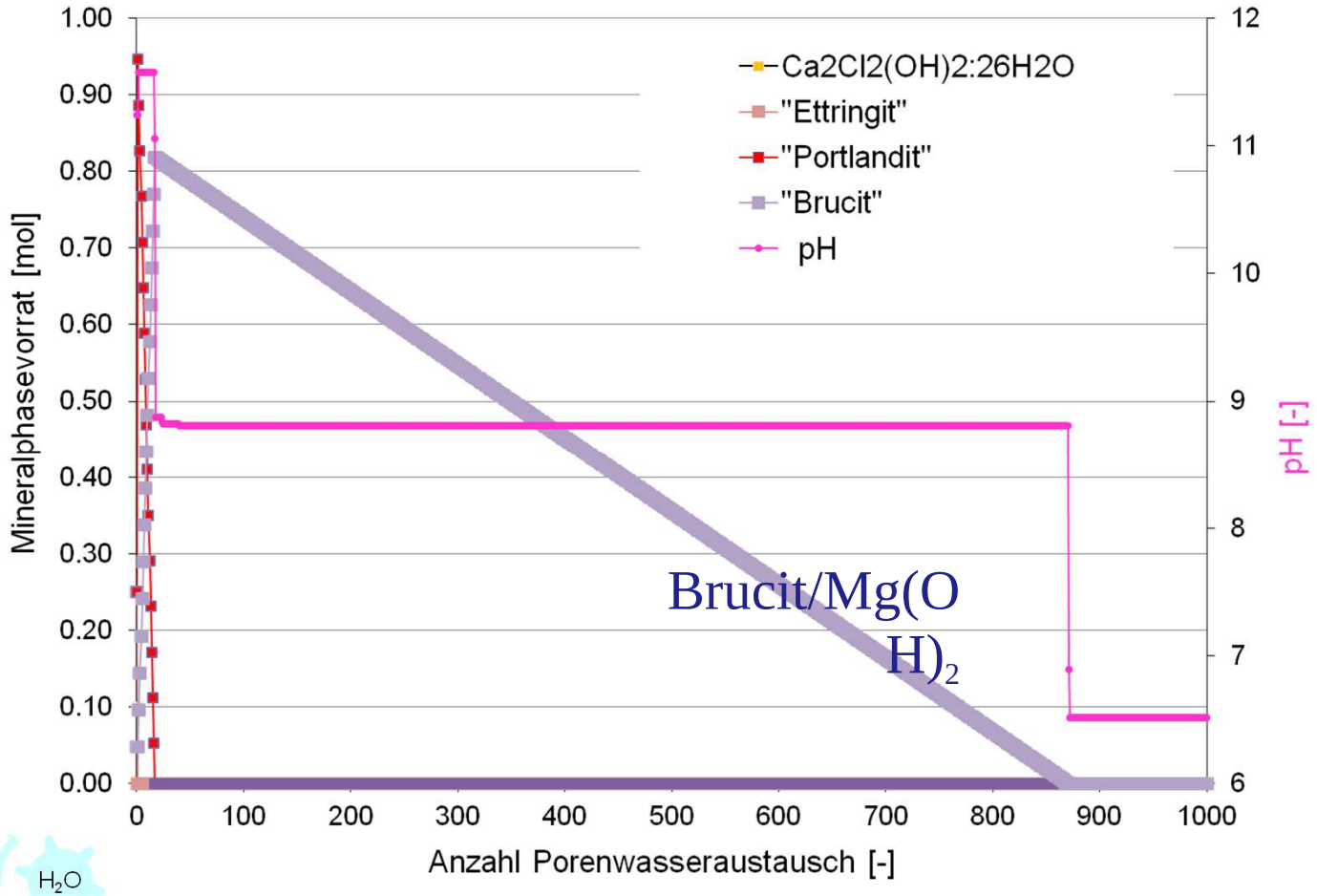


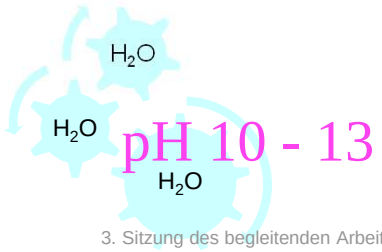
Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser
Primäre & **Sekundäre** Phasen

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit des Mineralgemisches

PhreeqC 3.pqi

bei zunehmender Anzal der „Porenwasseraustausche“ (11)



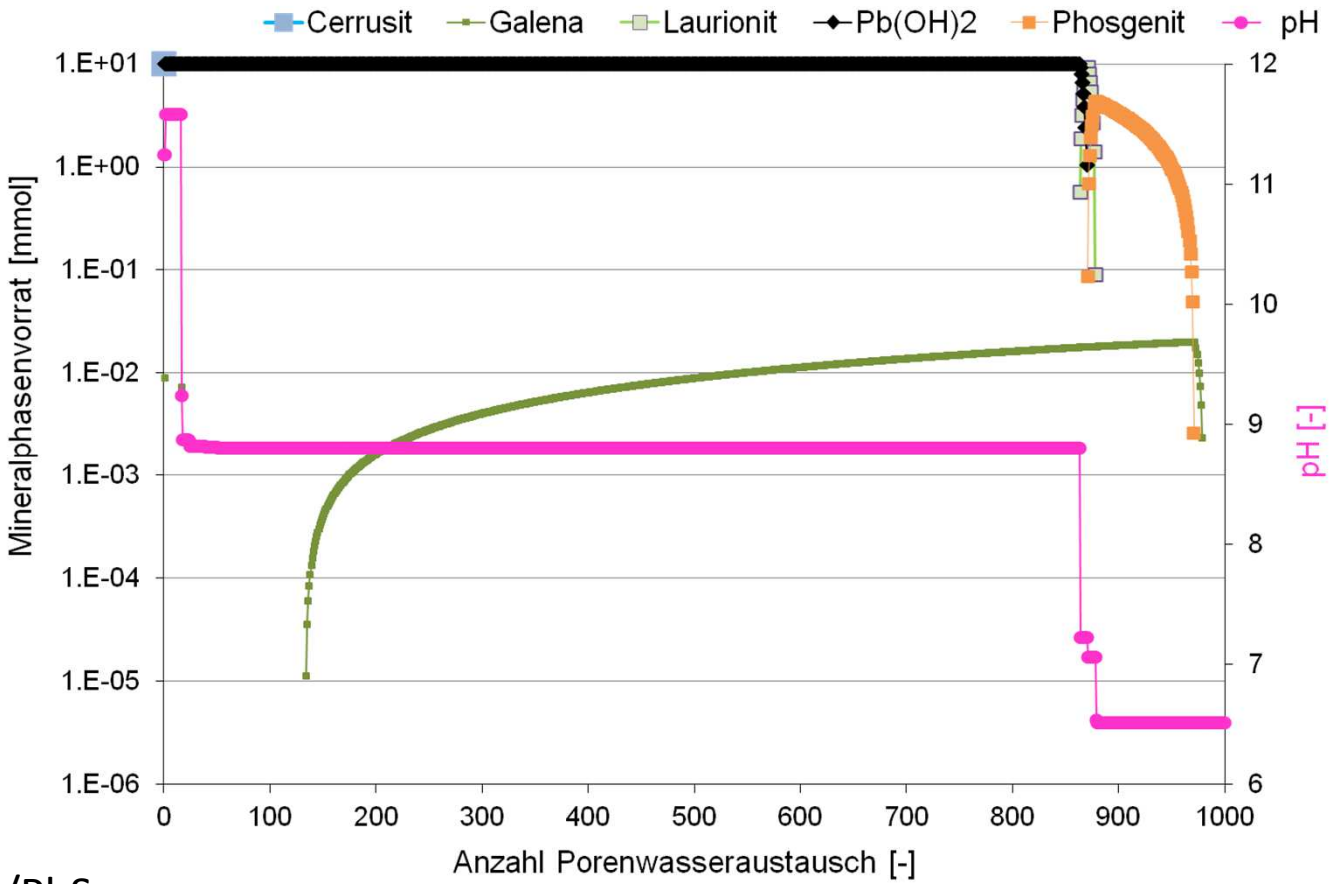


Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser
Primäre & **Sekundäre** Phasen

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit des Mineralgemisches

PhreeqC 3.pqi

bei zunehmender Anzal der „Porenwasseraustausche“ (12)



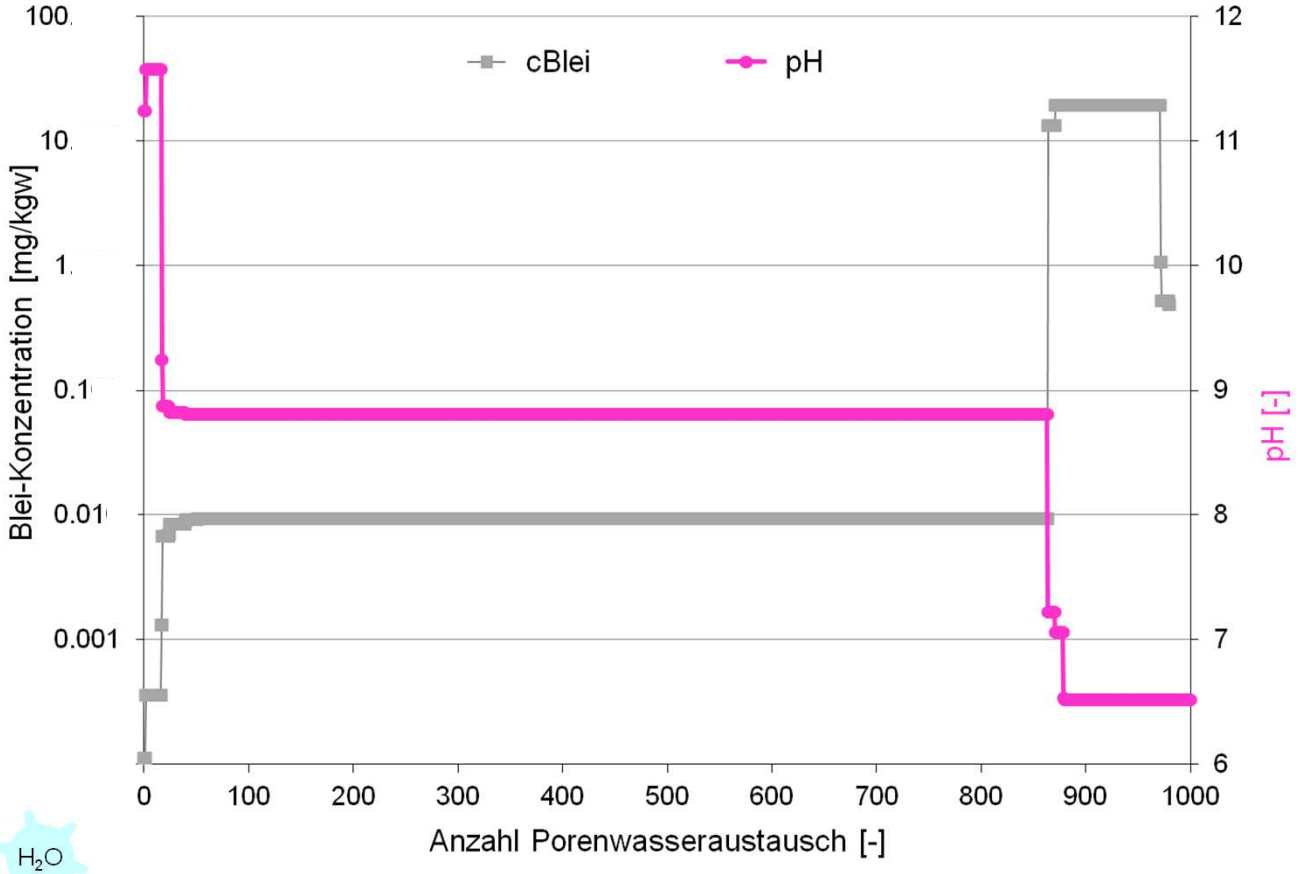
Galena/PbS,
Laurionit/Pb(OH)Cl
Phosgenit/$PbCl_2$:$PbCO_3$
Cerrusit/$PbCO_3$

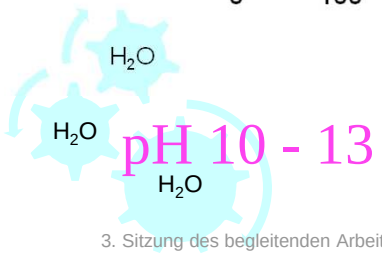
Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser
Primäre & **Sekundäre** Phasen

PHREEQC-Berechnungen zur Löslichkeit des Mineralgemisches

PhreeqC 3.pqi

bei zunehmender Anzal der „Porenwasseraustausche“ (13)

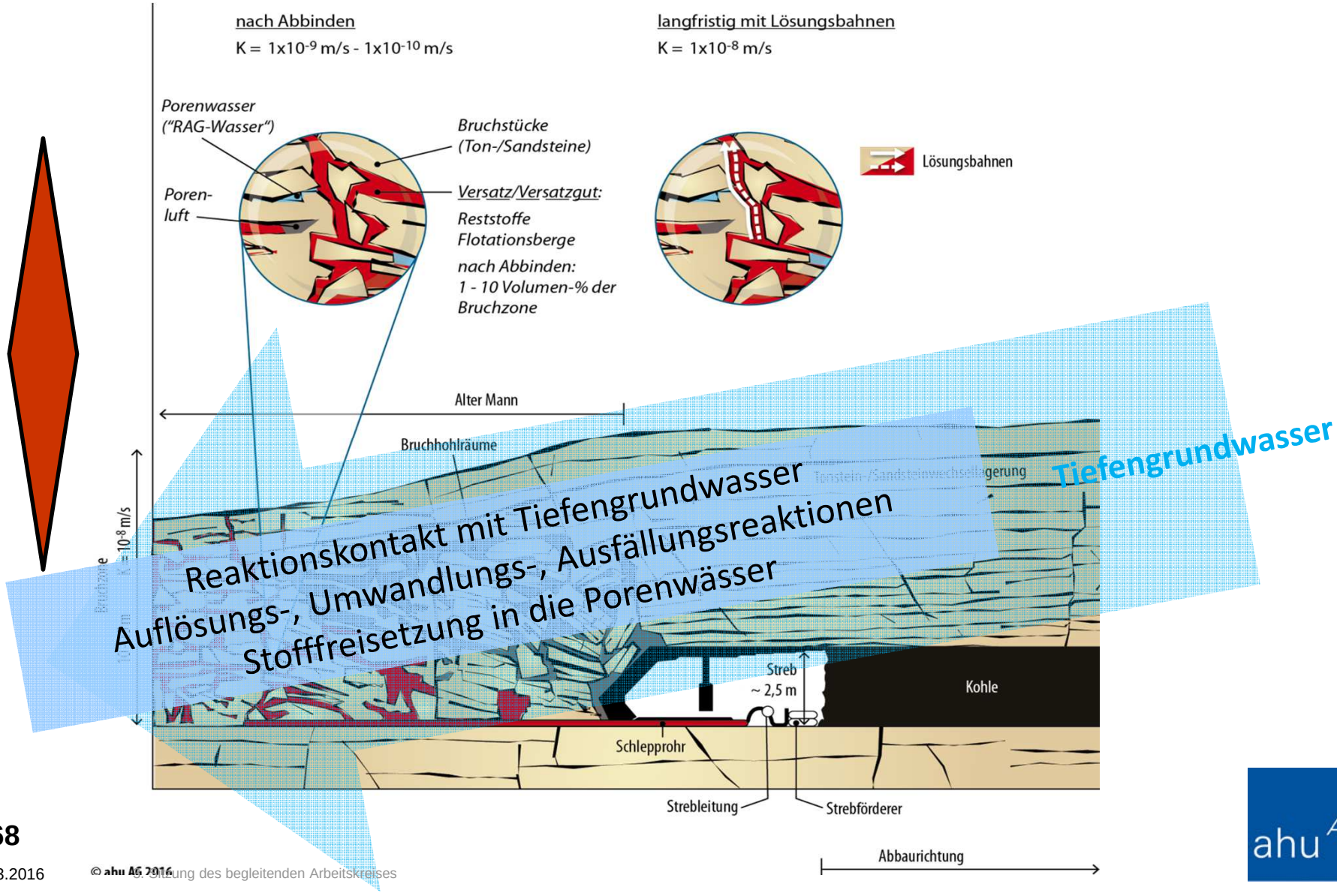




Auflösungs-, Umwandlungs- & Ausfällungsreaktionen
im Reaktionskontakt mit RAG-Wasser
Primäre & **Sekundäre** Phasen

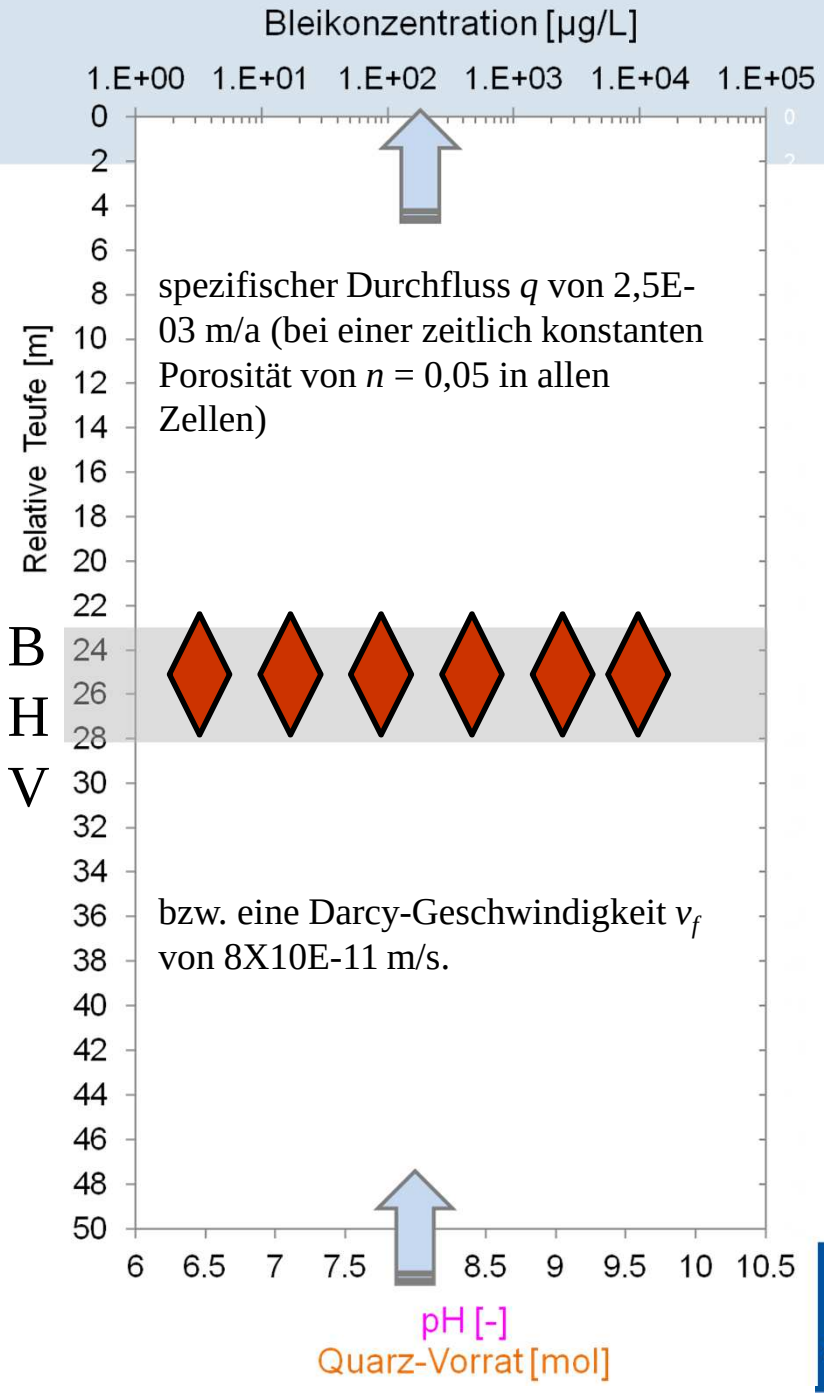
Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1w)

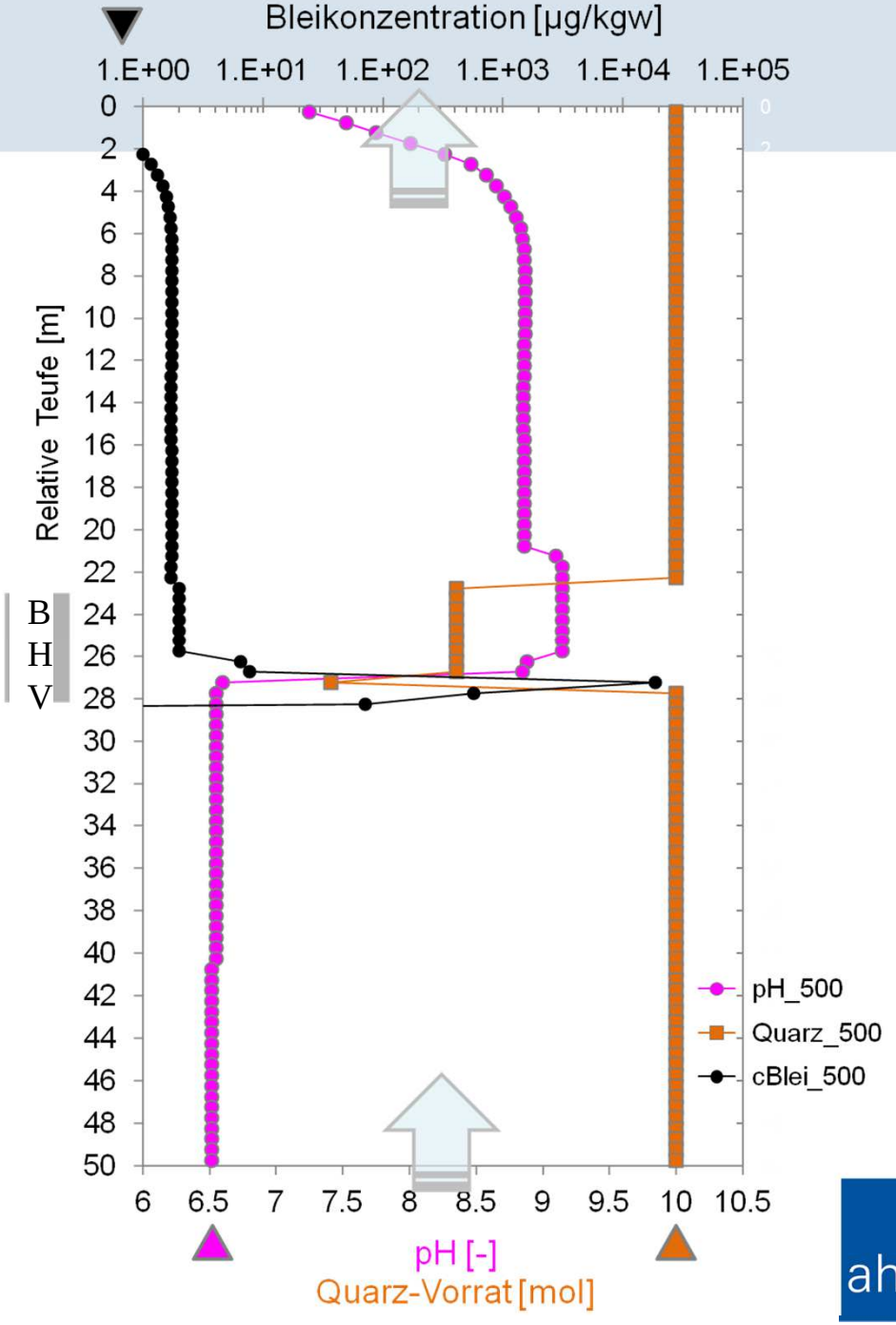


© ahu AG 2016

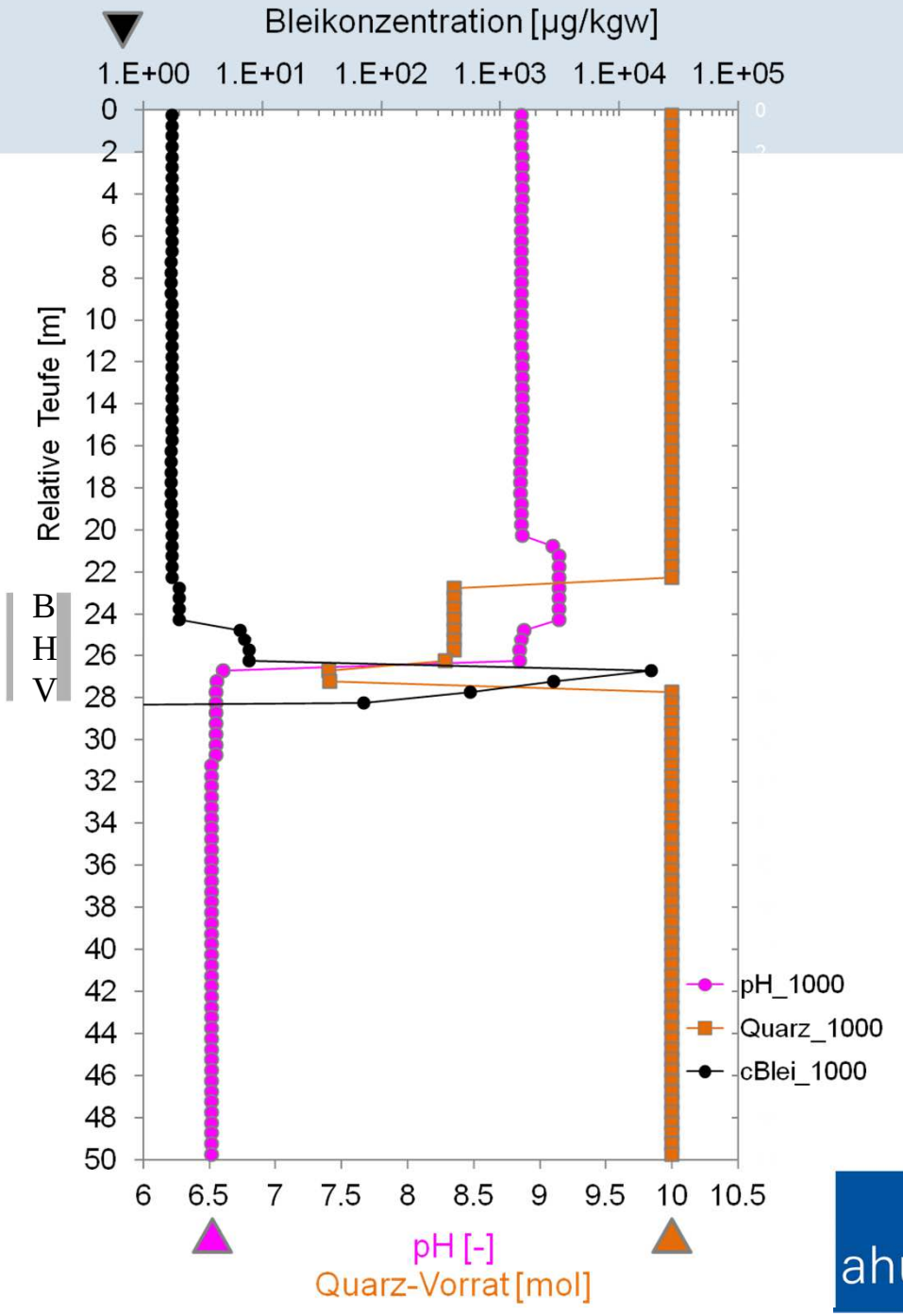
1D-PHREEQC-Stofftransport-berechnungen (14)



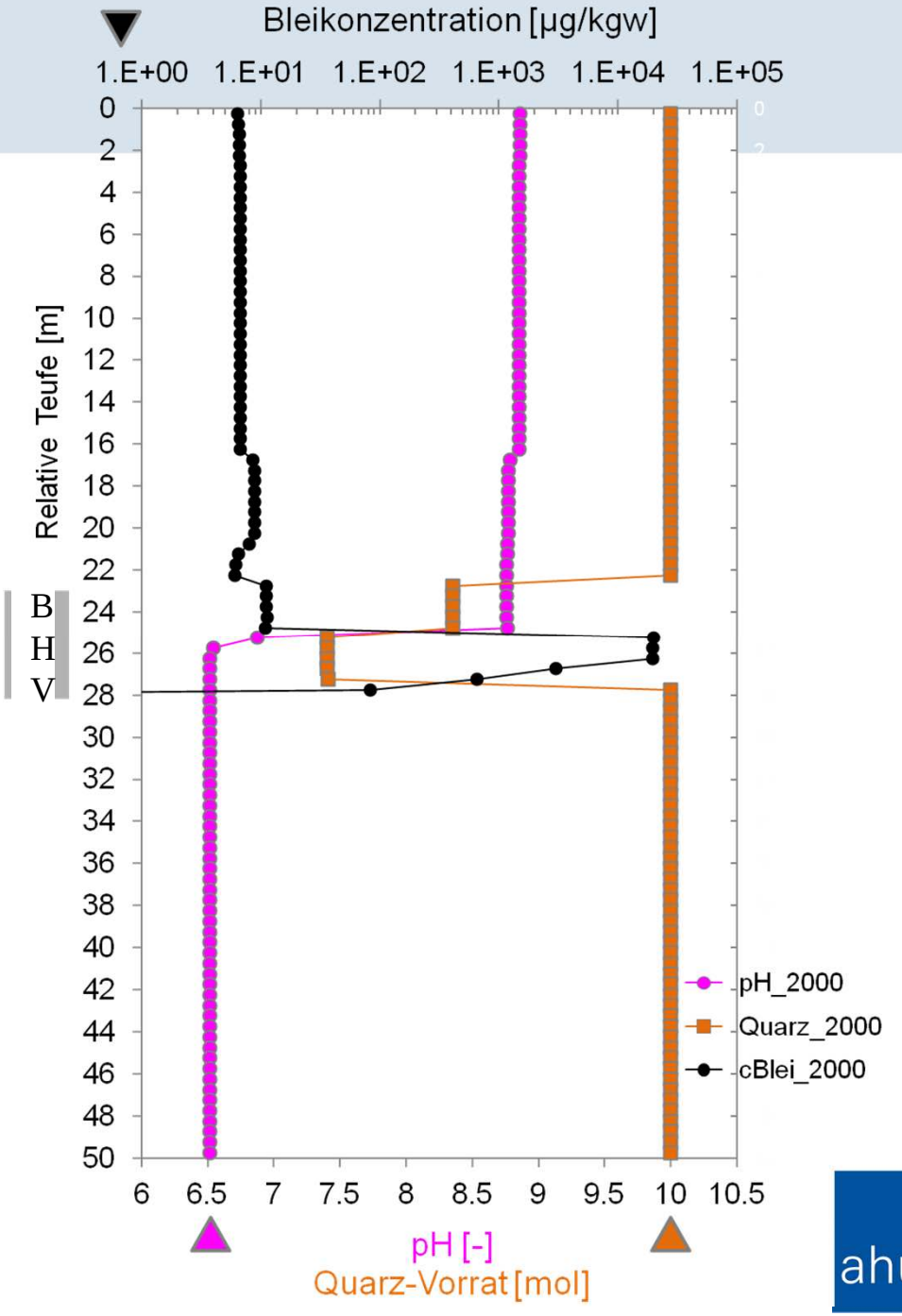
1D-PHREEQC-Stofftransport-berechnungen (15a)



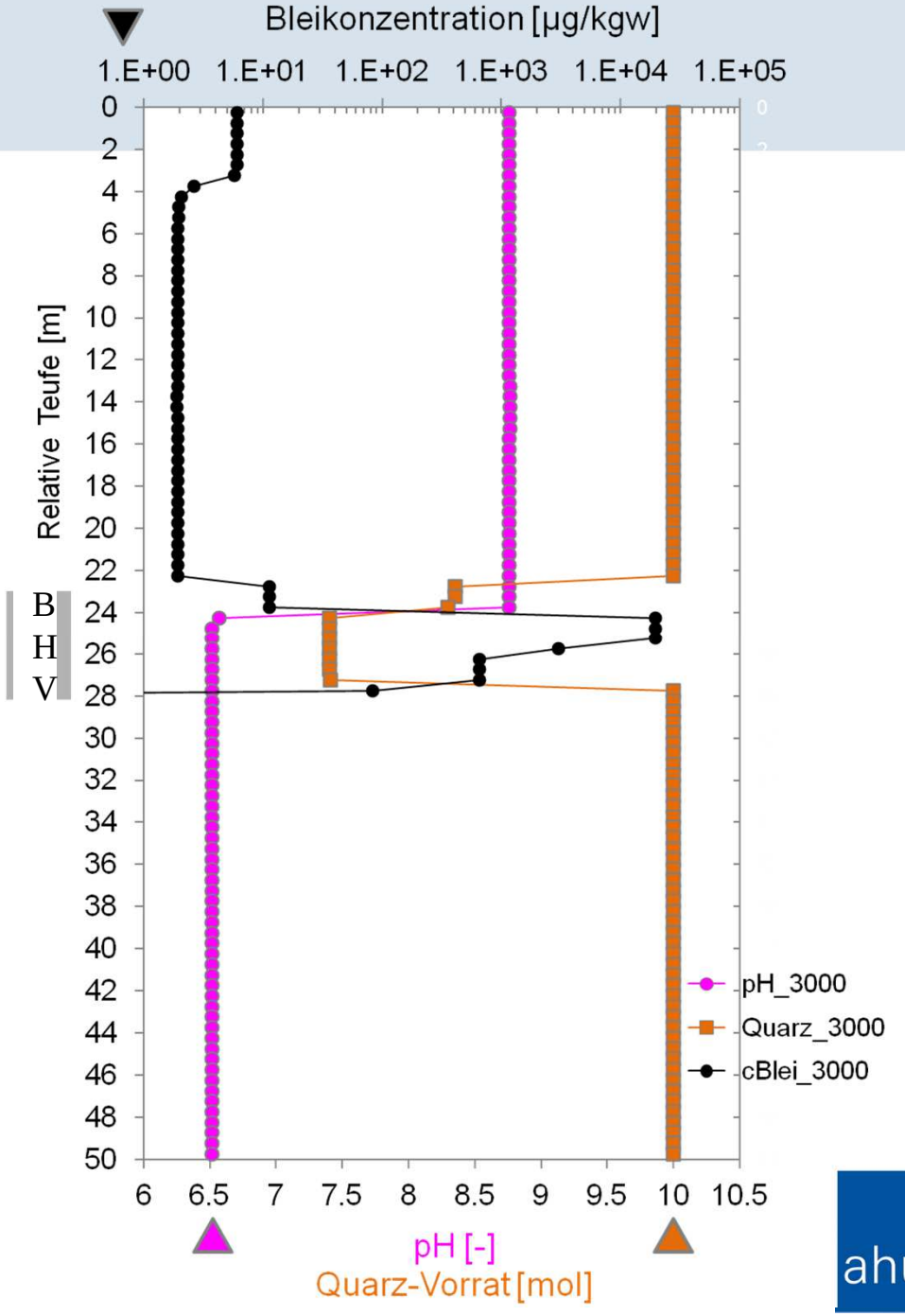
Zeitschritt ‚500'



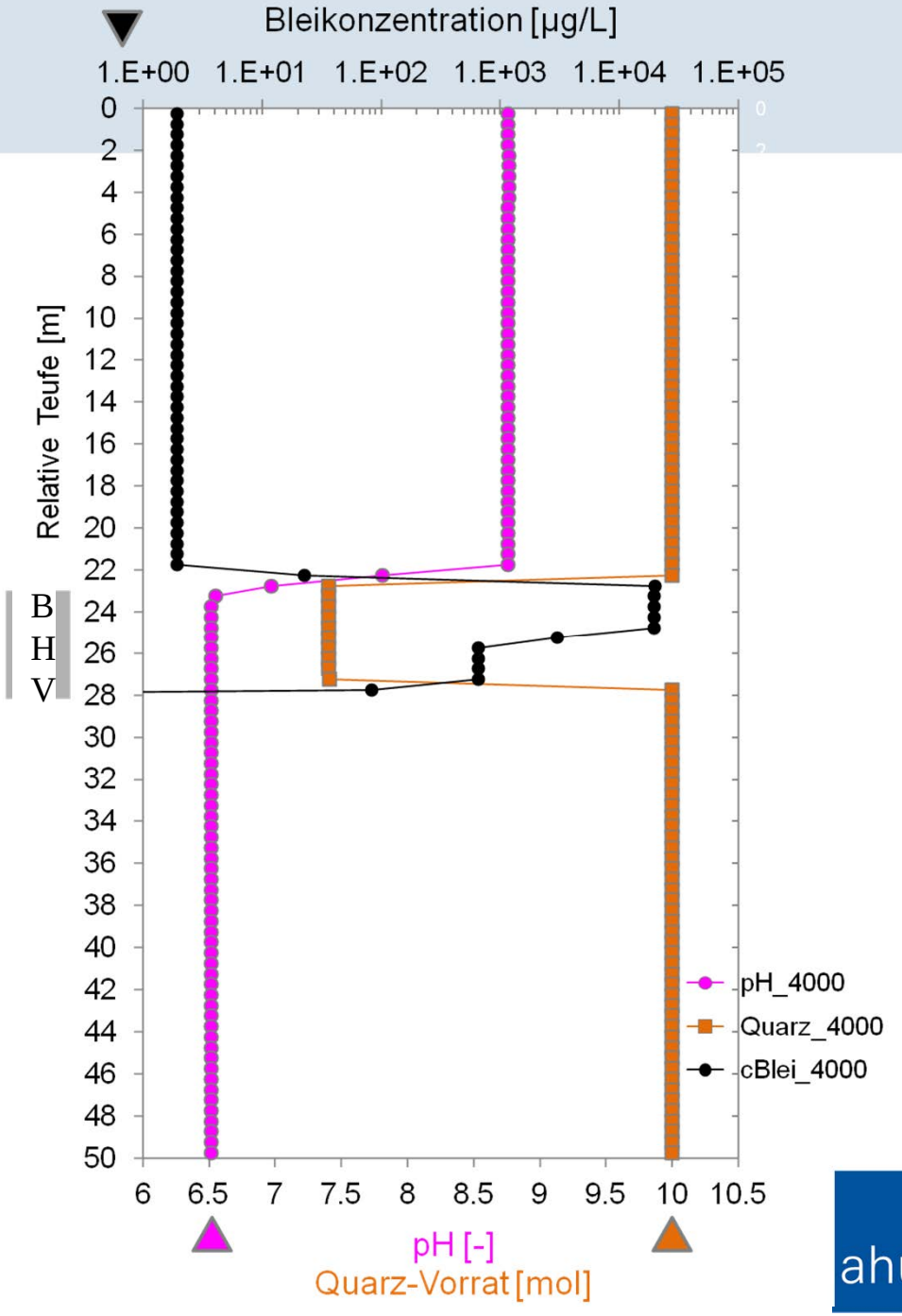
Zeitschritt ‚1.000'



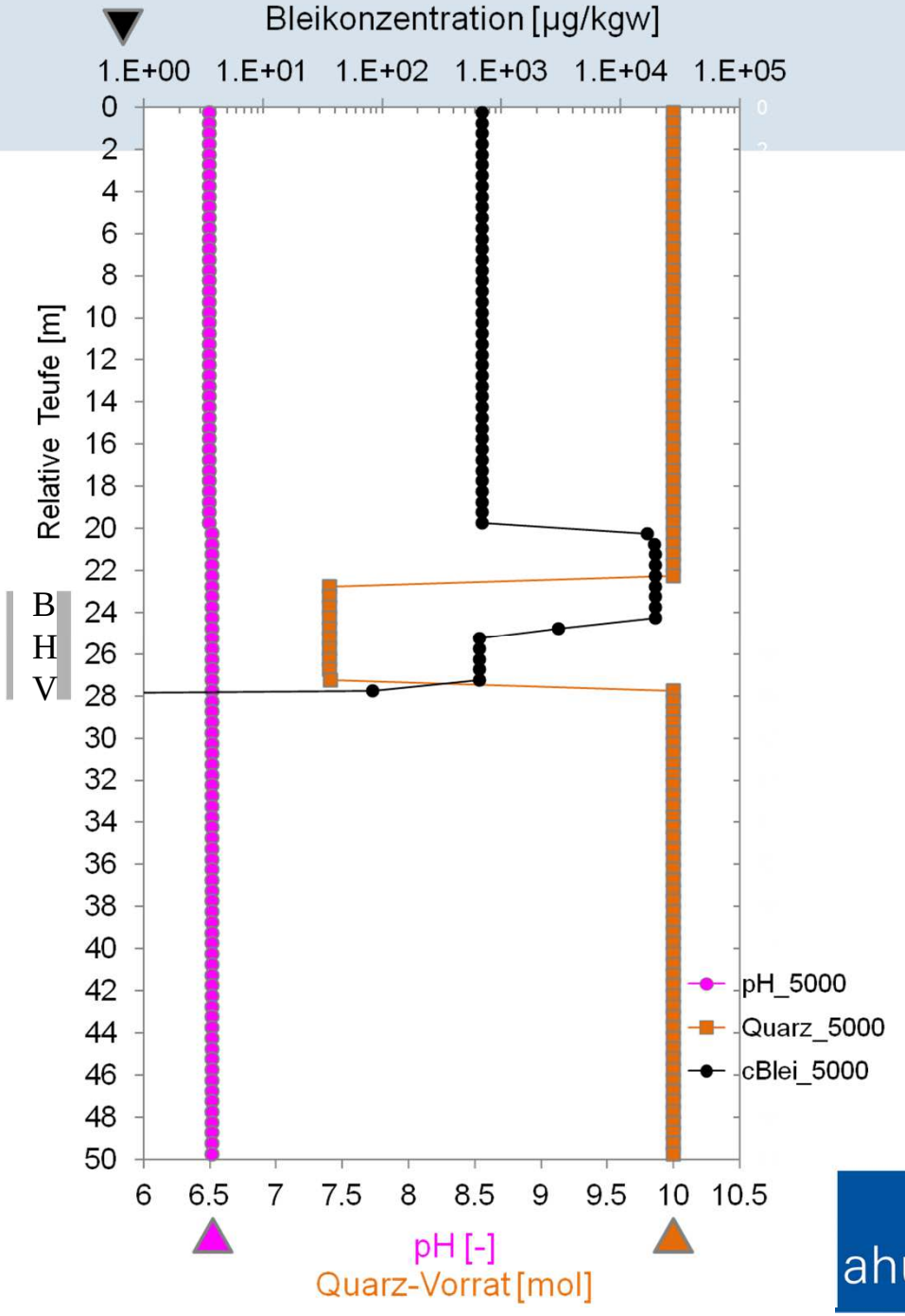
Zeitschritt ‚2.000'



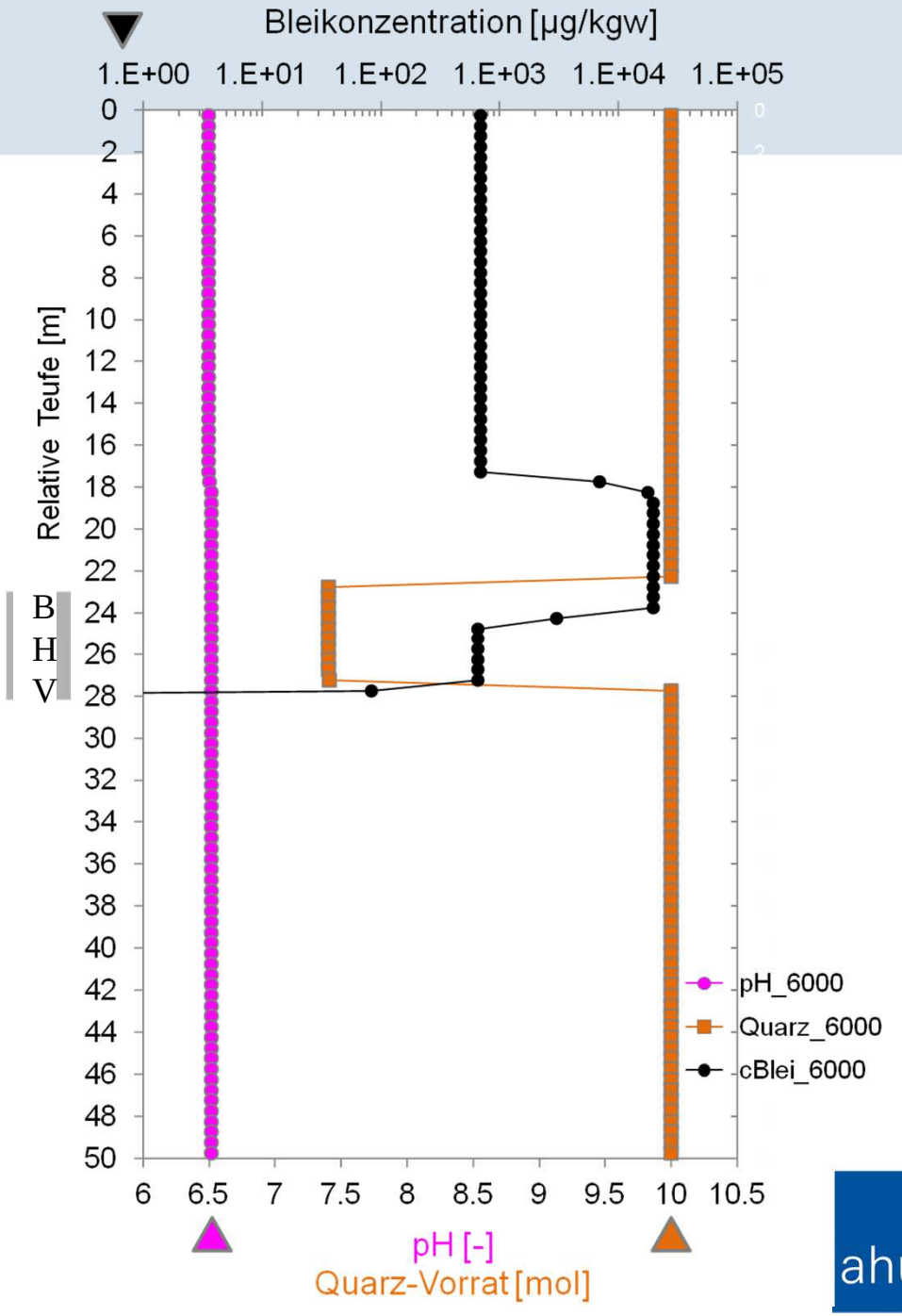
Zeitschritt ‚3.000'



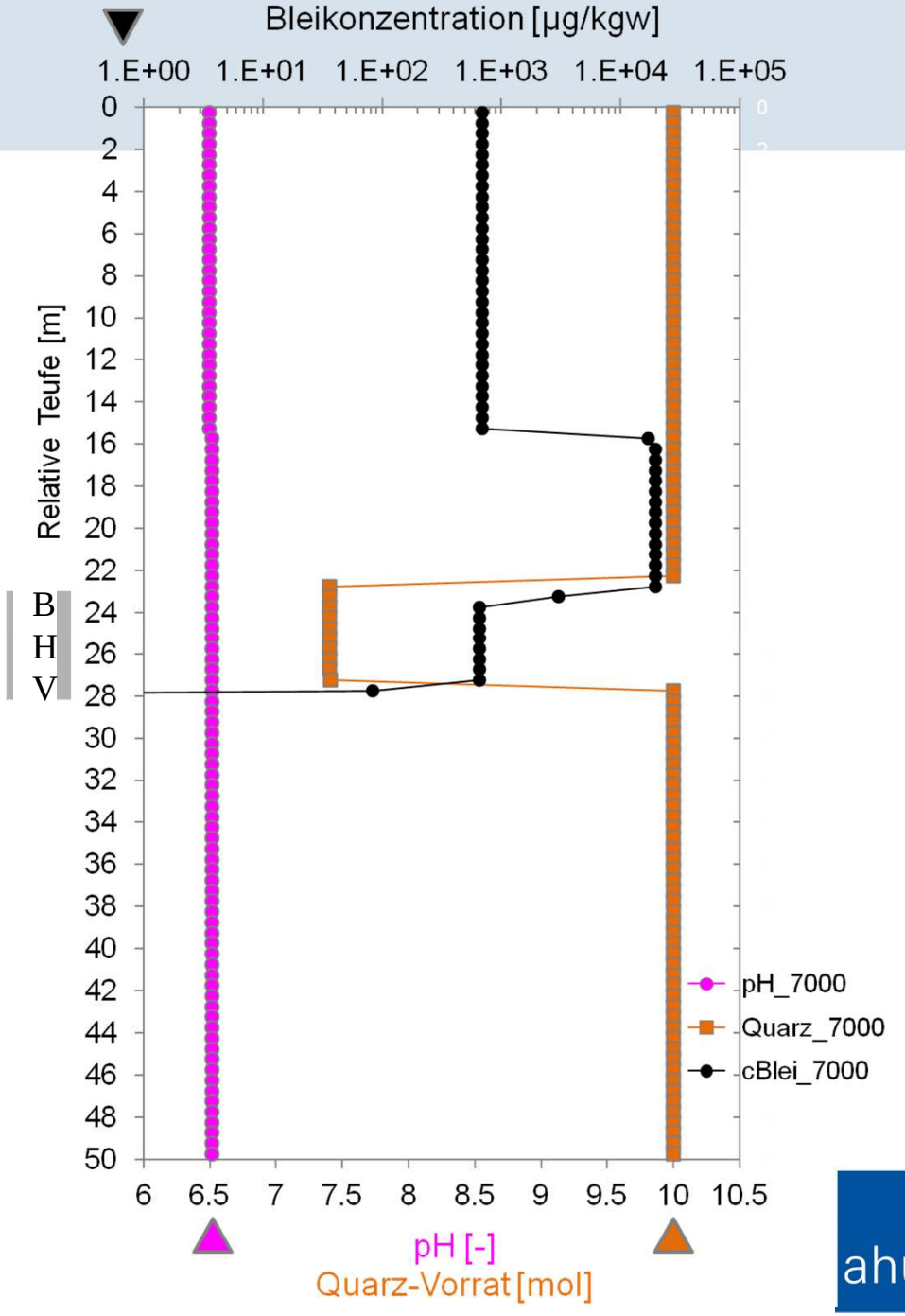
Zeitschritt ‚4.000'



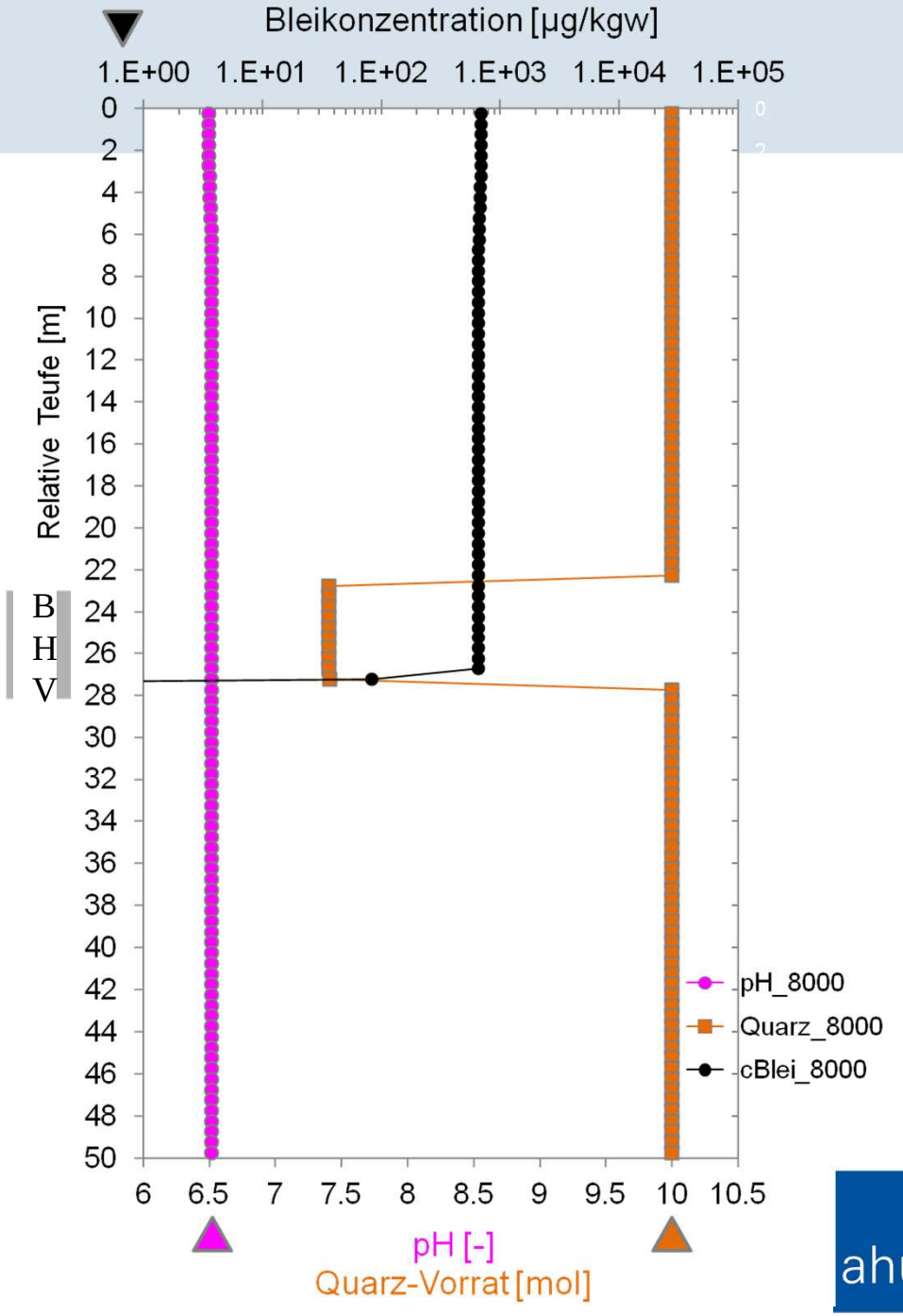
Zeitschritt ‚5.000'



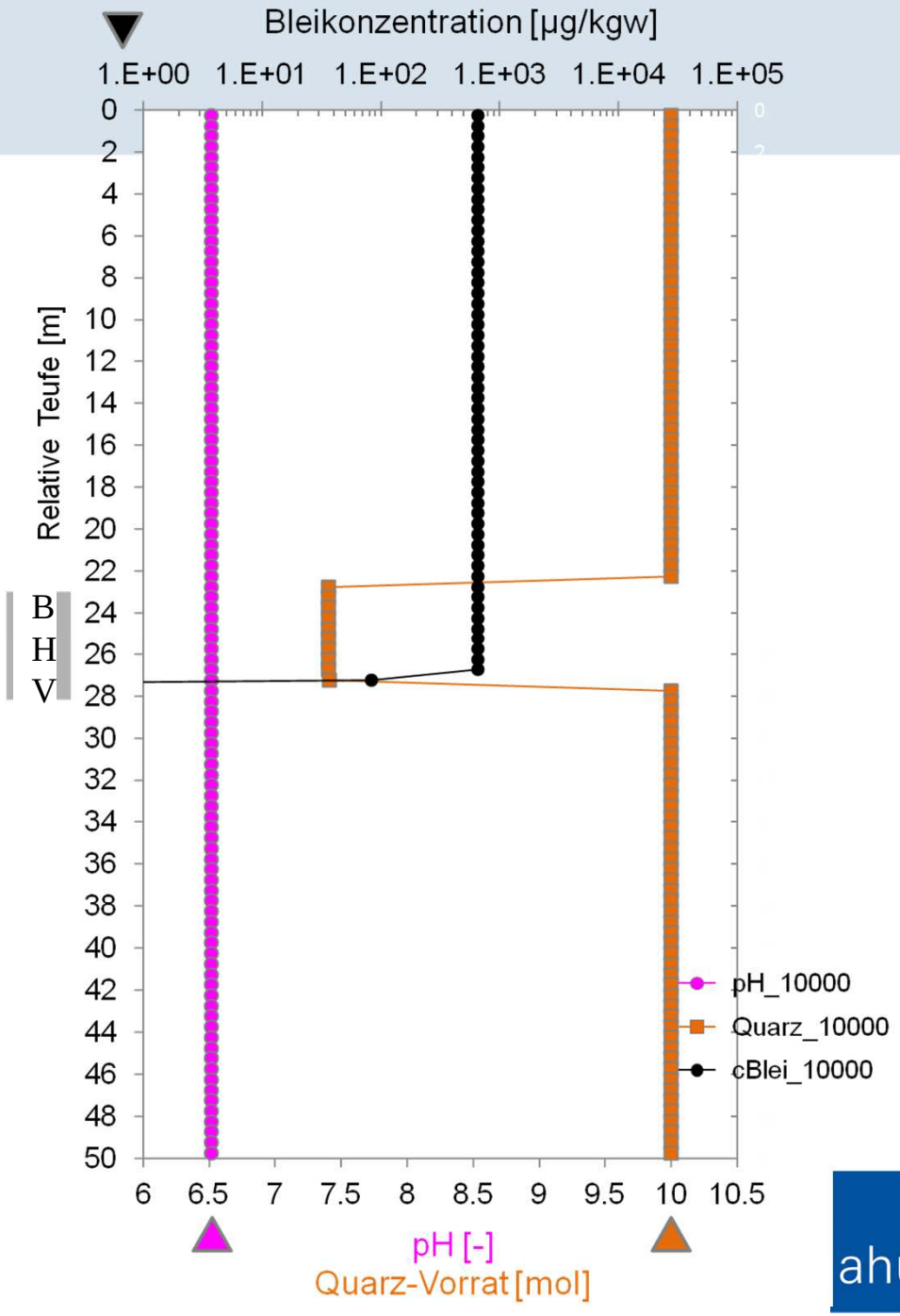
Zeitschritt ‚6.000'



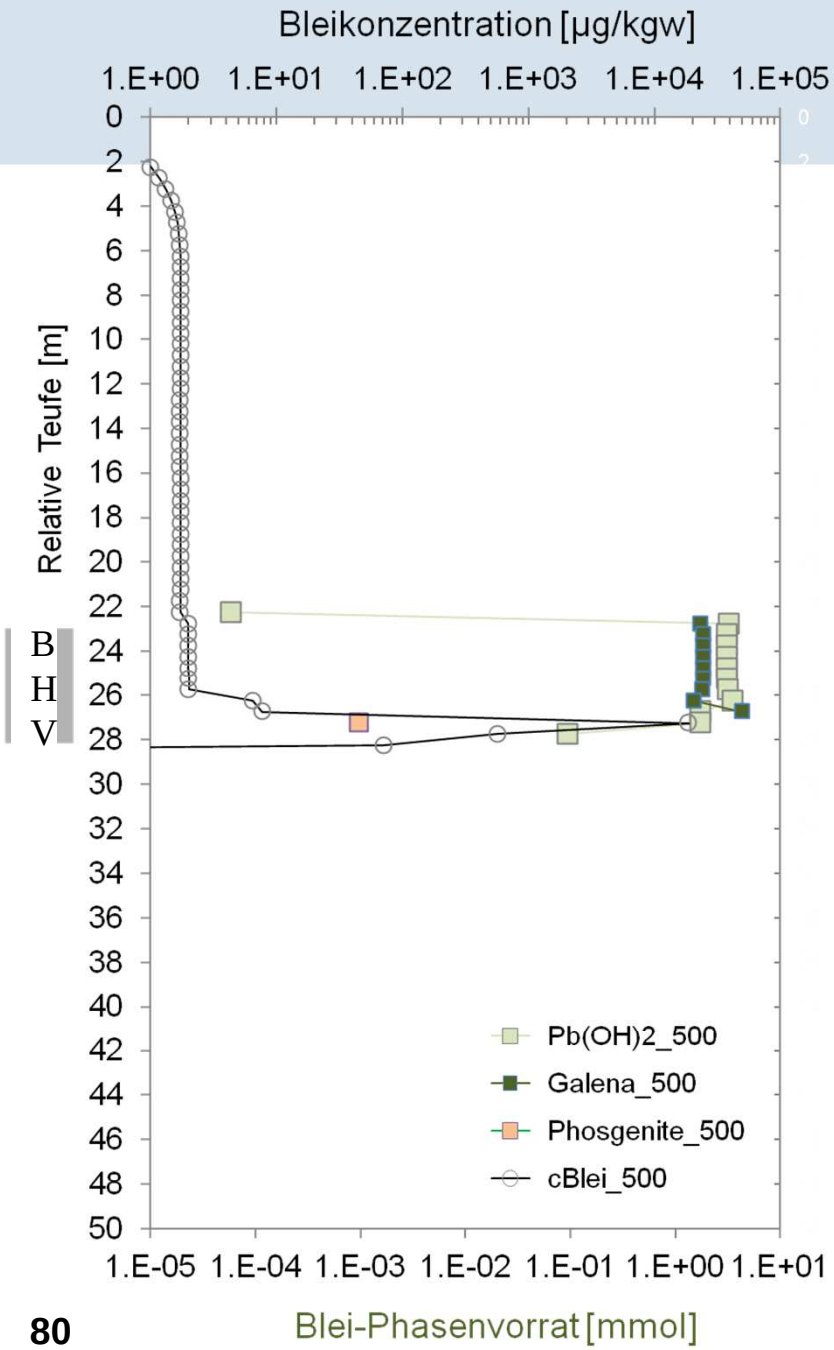
Zeitschritt ‚7.000'

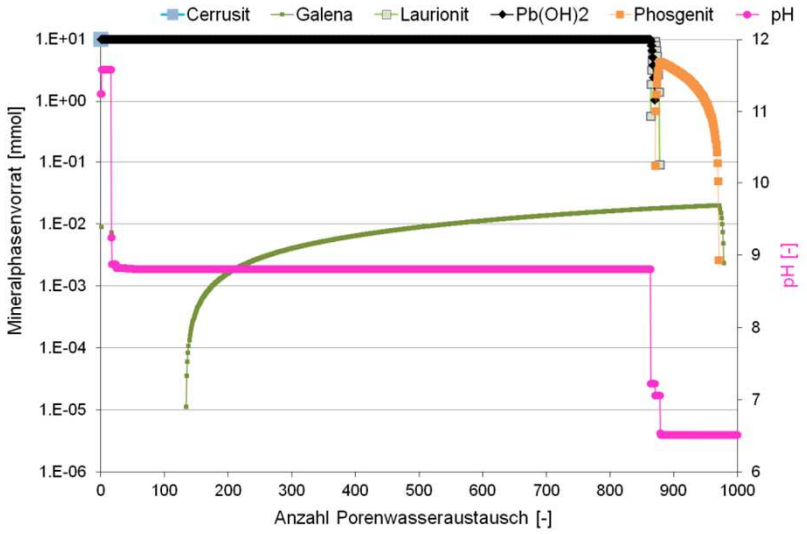


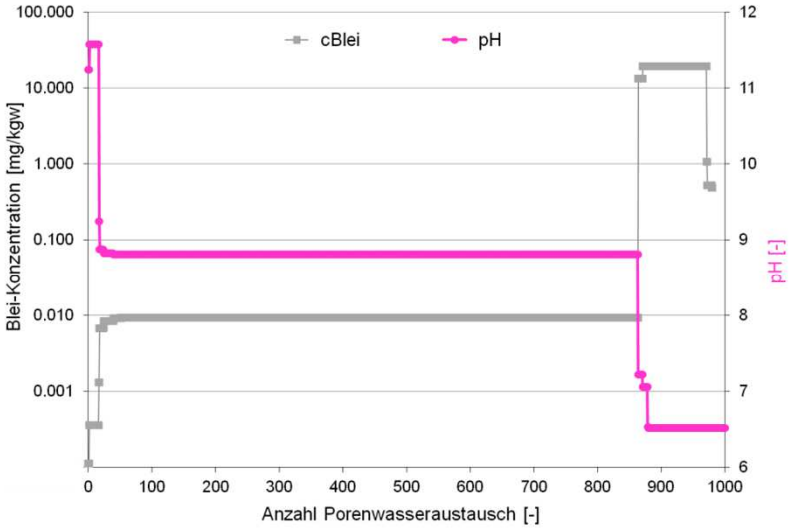
Zeitschritt ‚8.000'

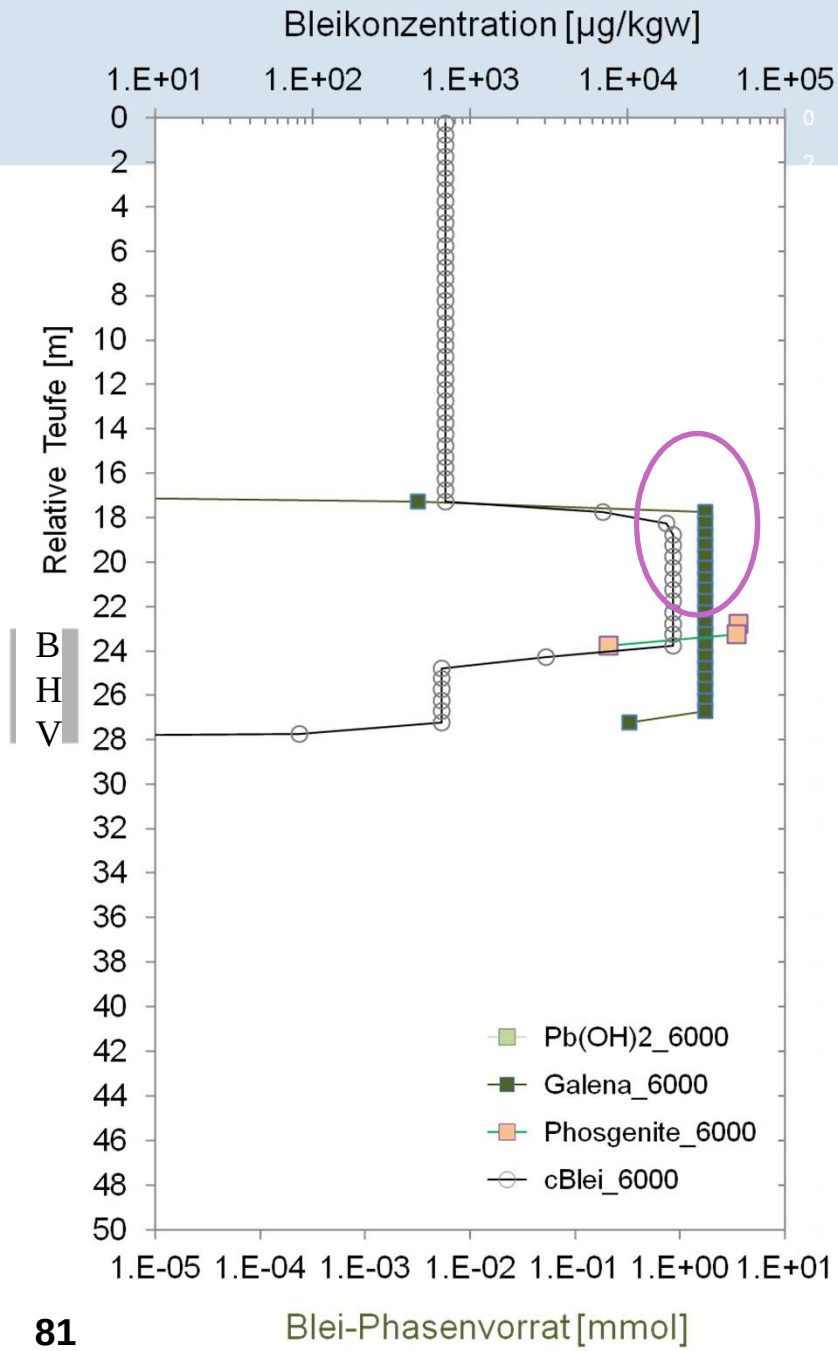


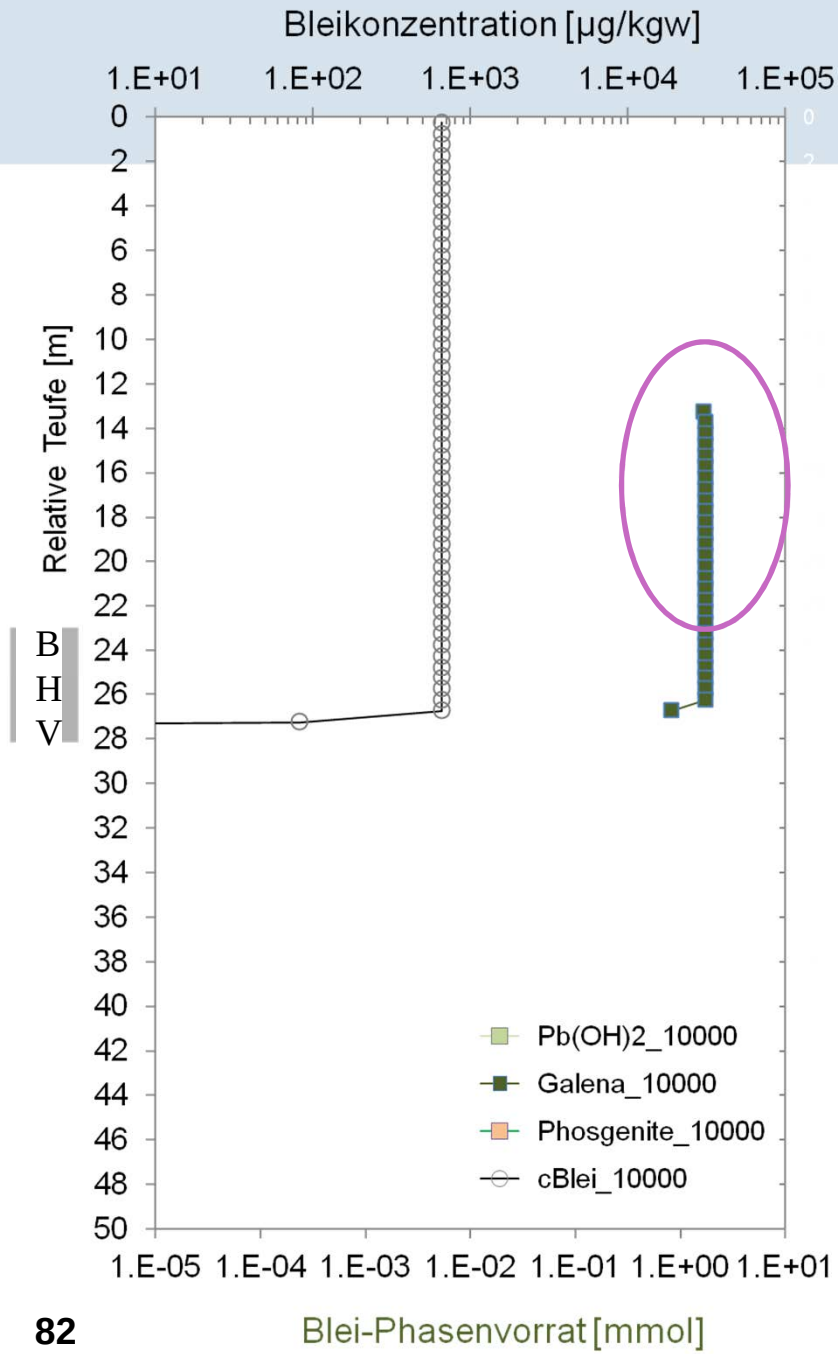
Zeitschritt ‚10.000'


Bleikonzentration [µg/kgw]
1.E+00 1.E+01 1.E+02 1.E+03 1.E+04 1.E+05
Relative Teufe [m]
B
H
V
Pb(OH)2_500
Galena_500
Phosgenite_500
cBlei_500
1.E-05 1.E-04 1.E-03 1.E-02 1.E-01 1.E+00 1.E+01
Blei-Phasenvorrat [mmol]


Cerrusit
Galena
Laurionit
Pb(OH)2
Phosgenit
pH
Mineralphasenvorrat [mmol]
pH [-]
Anzahl Porenwasseraustausch [-]


cBlei
pH
Blei-Konzentration [mg/kgw]
pH [-]
Anzahl Porenwasseraustausch [-]


Bleikonzentration [µg/kgw]
1.E+01
1.E+02
1.E+03
1.E+04
1.E+05
Relative Teufe [m]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
46
48
50
B
H
V
Pb(OH)2_6000
Galena_6000
Phosgenite_6000
cBlei_6000
1.E-05
1.E-04
1.E-03
1.E-02
1.E-01
1.E+00
1.E+01
Blei-Phasenvorrat [mmol]

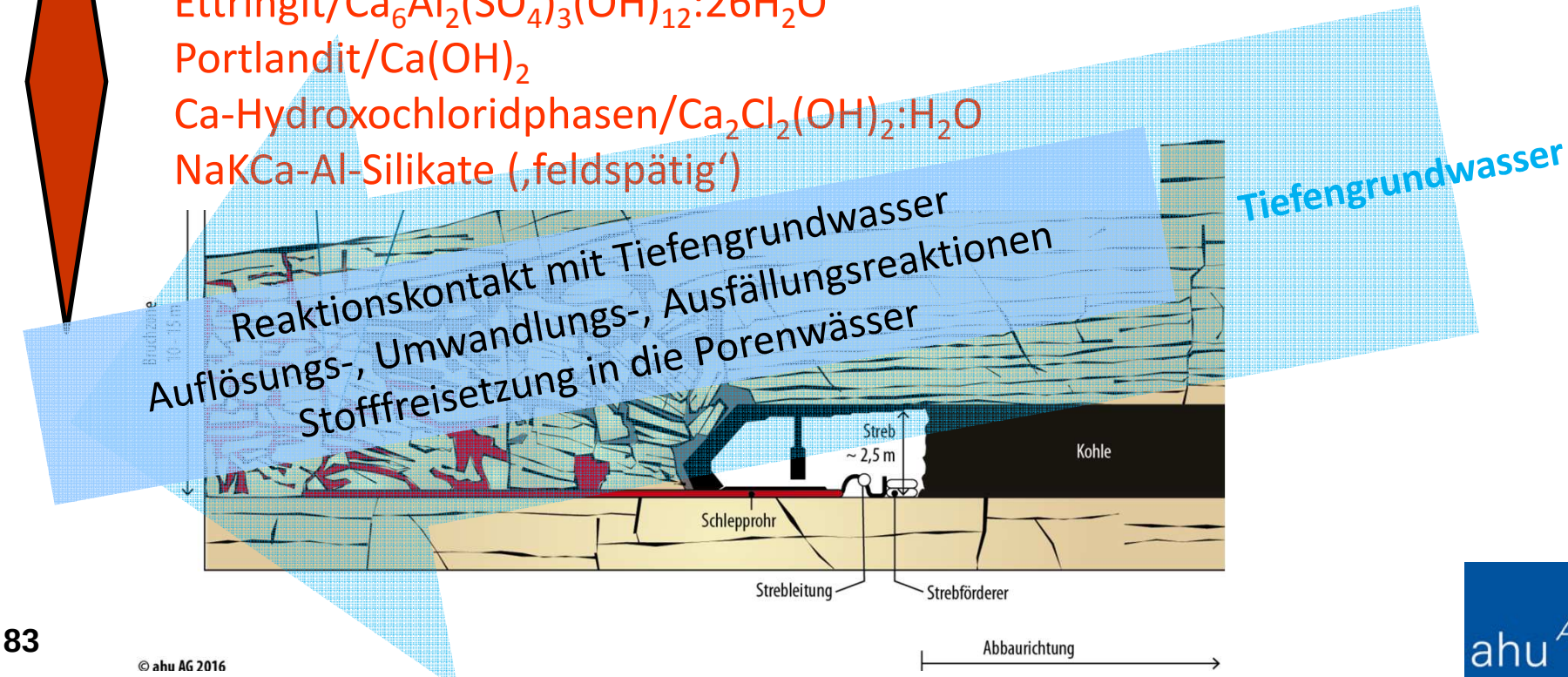

Bleikonzentration [µg/kgw]
1.E+01
1.E+02
1.E+03
1.E+04
1.E+05
Relative Teufe [m]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
46
48
50
B
H
V
Pb(OH)2_10000
Galena_10000
Phosgenite_10000
cBlei_10000
1.E-05
1.E-04
1.E-03
1.E-02
1.E-01
1.E+00
1.E+01
Blei-Phasenvorrat [mmol]

ahu AG

Stofffreisetzung

Zeitliche / räumliche Entwicklung im BHV-Bereich & Stoffaustrag (1)

Quarz/SiO_2
Halit/NaCl
Sylvin/KCl
Anhydrit/$CaSO_4$, Gips/$CaSO_4$:$2H_2O$
Glauberit/$Na_2Ca(SO_4)_2$
Calcit/$CaCO_3$
Ettringit/$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$:$26H_2O$
Portlandit/$Ca(OH)_2$
Ca-Hydroxochloridphasen/$Ca_2Cl_2(OH)_2$:H_2O
NaKCa-Al-Silikate (‚feldspätig')



© ahu AG 2016

(5.3) AUSBREITUNGSPOTENTIAL (PROF. KÖNIG)

Berechnung des Ausbreitungspotenzials mittels numerischer Transportmodelle

1. Prozessbeschreibung
2. Bilanzmodell
3. Fernfeldmodell
4. Aufsättigung während der Flutung

ahu AG

Was ist die Aufgabe eines numerischen Modells?

- Plausibilität der Eingabedaten
- Prozessidentifikation
- Massenbilanz
- Prognosen
- Verfügbarkeit
- Sensitivitäts Analysen

ahu AG

Abzubildende Prozesse:

- Ungesättigte Strömung Matrix
- Kluftströmung - Röhrenströmung
- Flutung – Boxmodell
- Einfluss von Störungen – Schächten - Dämmen
- Dichteschichtung
- Temperatureinfluss
- Quellthermabbildung
  CBlei=f(Porenwasseraustausch)

ahu AG

Datenlage

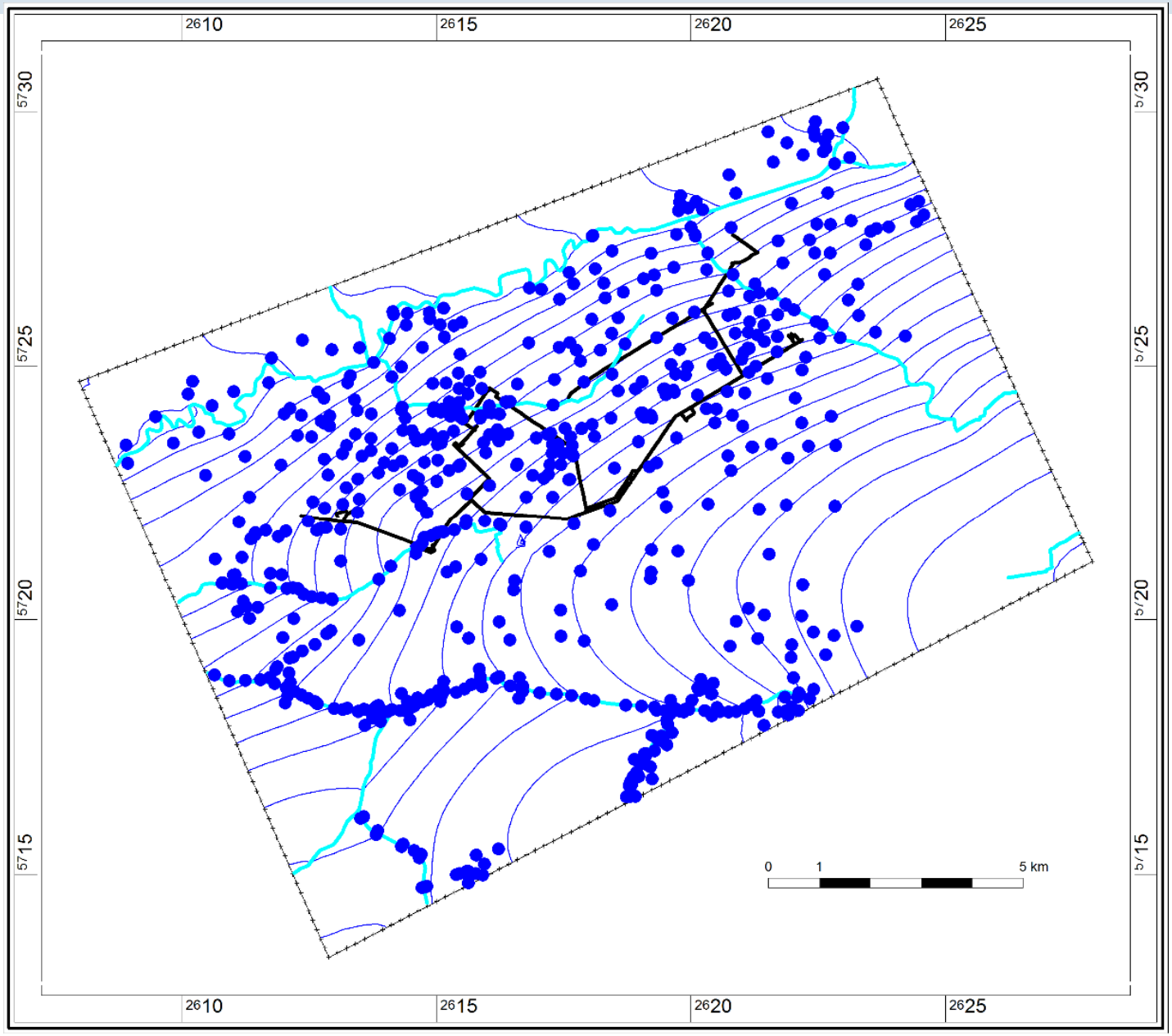
- Geländeoberfläche
- Langjährige – mittlere Grundwasserstände
- Grundwasserneubildung
- Geologische Schichtflächen (Karbon):
  - ➢ Geologischer Dienst – Kohlevorratsberechnung
- Grubensystem:
  - ➢ RAG – Geometrie, Volumenströme der bisherigen und prognostizierten Wasserhaltung

Kalibrierung

Quartär => Grundwassermessstellen – GWneubildung

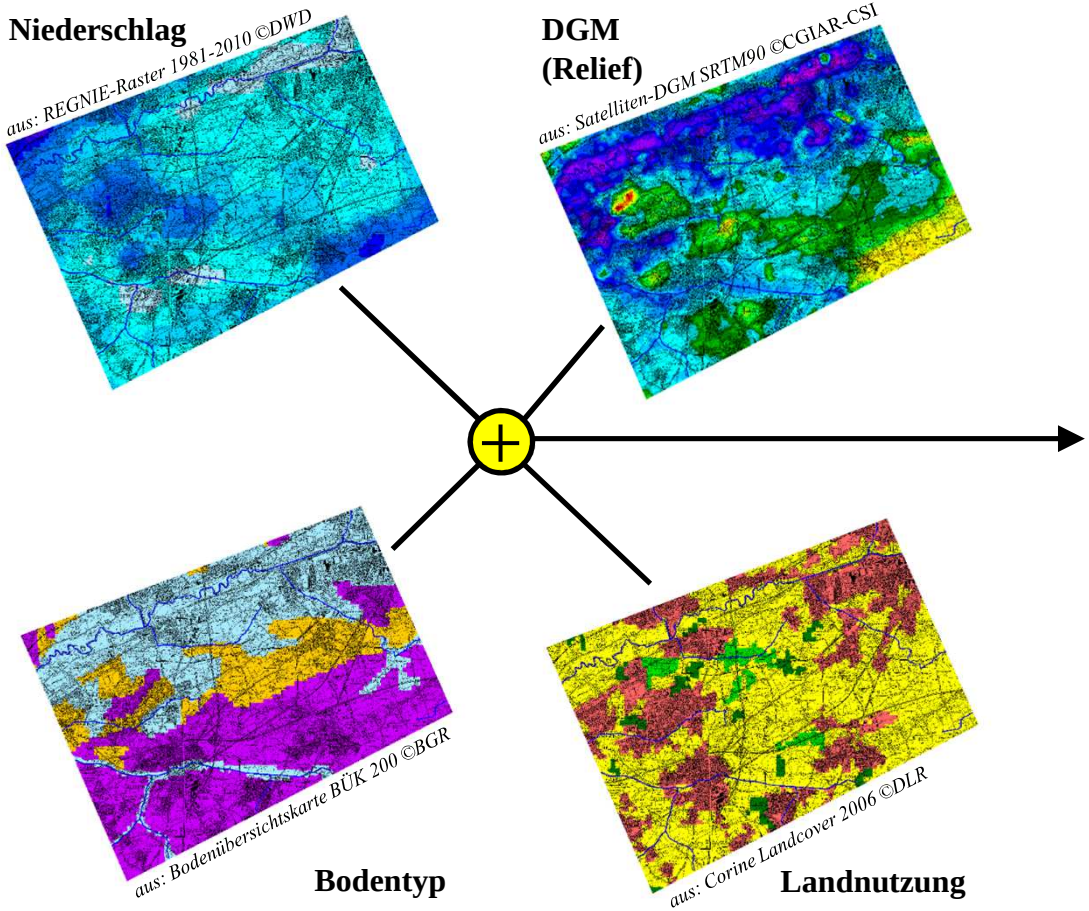
Karbon => Bilanz der gemessenen Volumenströme

634 Grundwassermessstellen

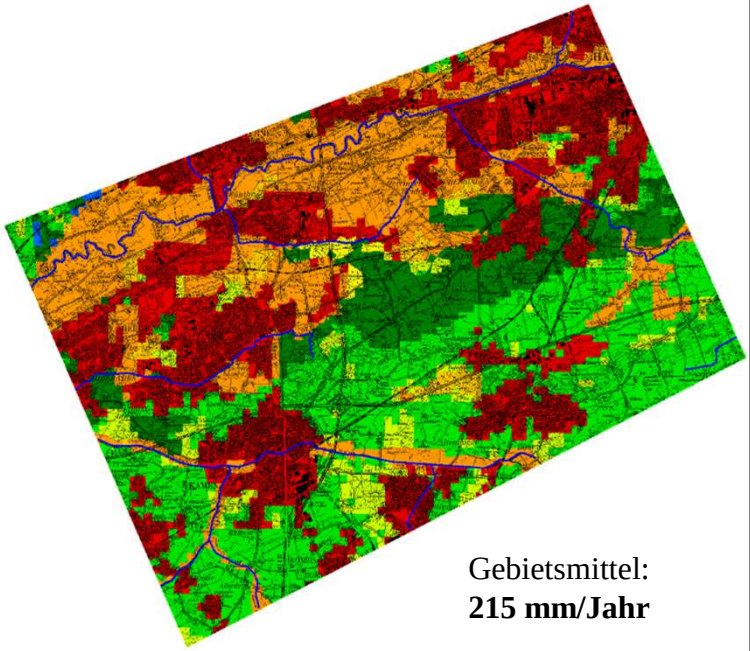


ahu AG

Grundwasserneubildung



mittlere, langjährige
Grundwasserneubildungsraten
nach
SCHROEDER & WYRWICH



Gebietsmittel:
215 mm/Jahr

ahu AG

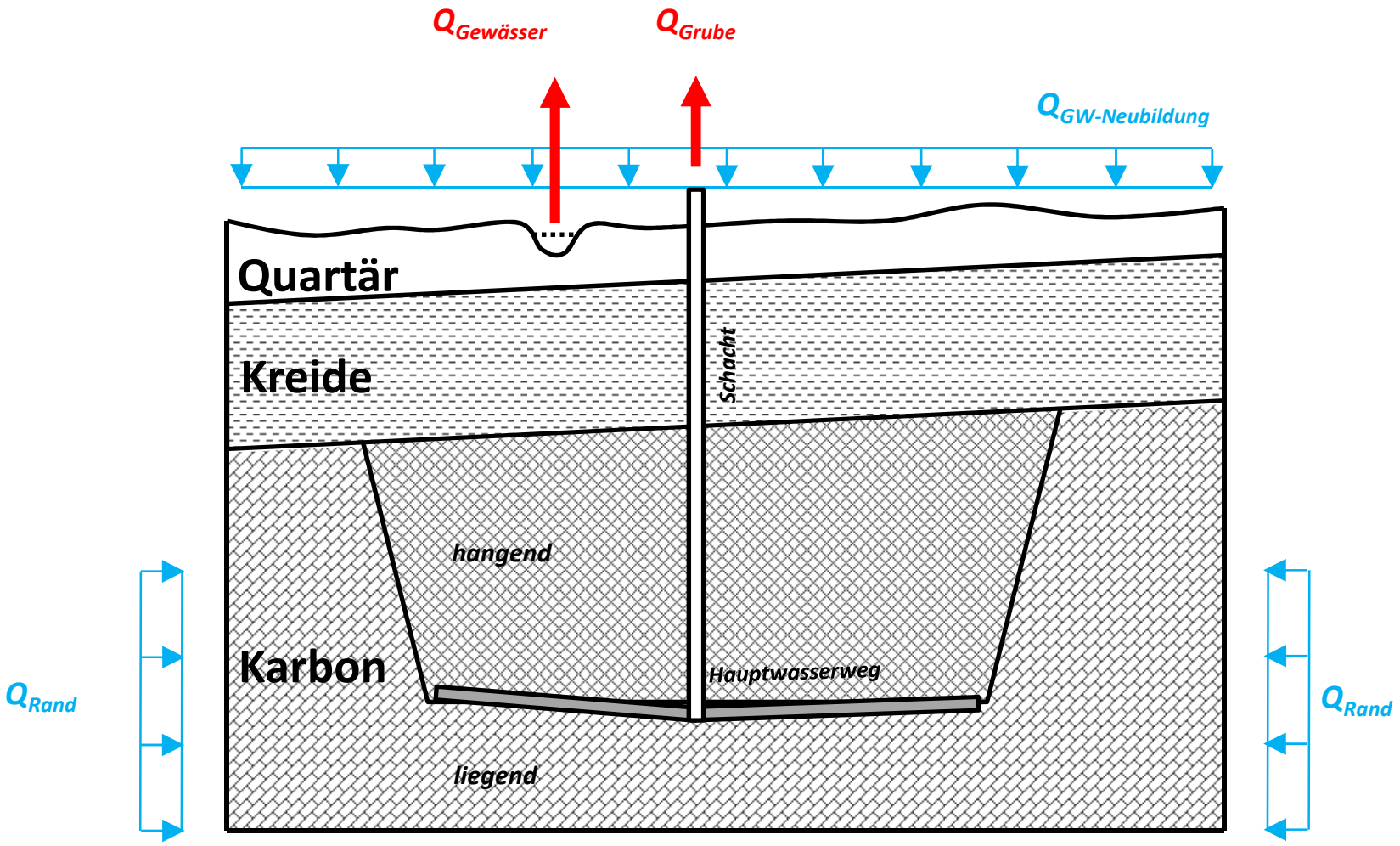
Bilanzierung – Methode und Grenzen der Anwendung

Bekannte Parameter	Schätzungen - Literatur	Unbekannte Parameter
Grundwasserneubildung	Durchlässigkeiten Emschermergel	Großräumige Zuflußraten / Wasserstände im Karbon
Oberflächengewässer	Durchlässigkeiten Karbon	
Durchlässigkeit Quartär	Leakage Grubensystems	
Klüftung Sandstein	Öffnungsweite Störung	
Zuflüsse Grubensystem	Durchlässigkeiten Dämme	
Geometrie Grubensystem	Schachtströmung	

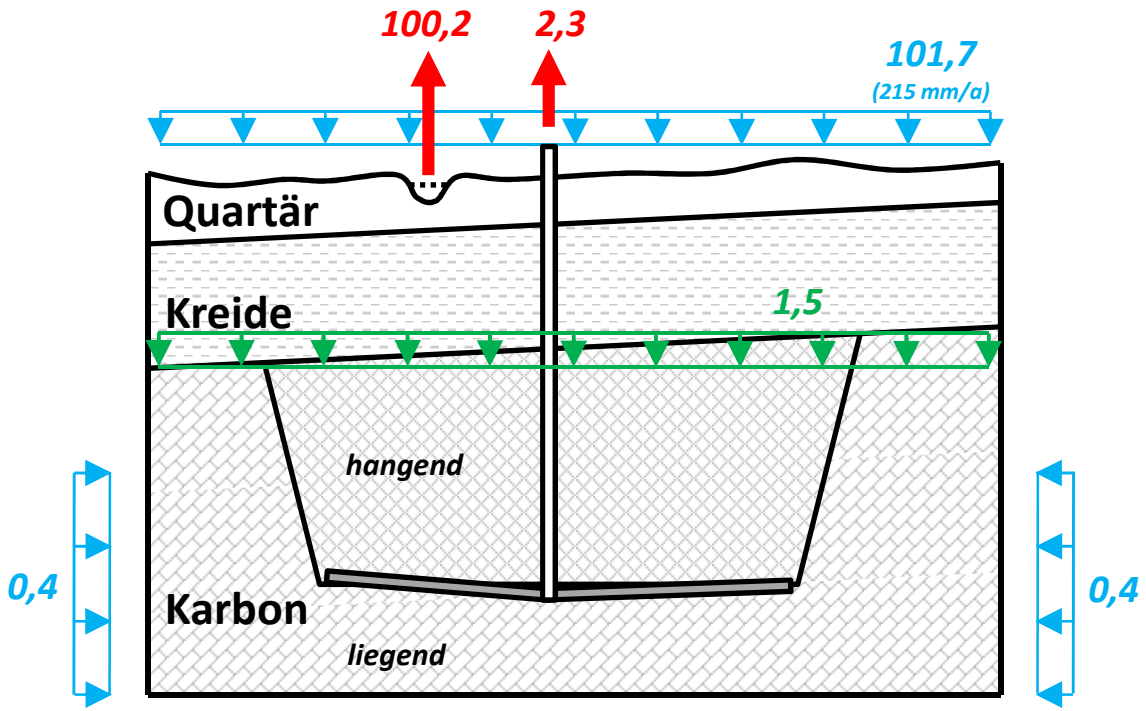
$$\sum Zutritte\ Grube \approx 2\ m^3/min$$

Mittlere GW-Neubildung : 215 mm/a

Bilanzraum


$Q_{Gewässer}$
Q_{Grube}
$Q_{GW\text{-}Neubildung}$
Quartär
Kreide
Schacht
hangend
Karbon
Hauptwasserweg
liegend
Q_{Rand}
Q_{Rand}

Bilanz-Anteile [m³/min] (Leakage-Koeff. 1 m/a)

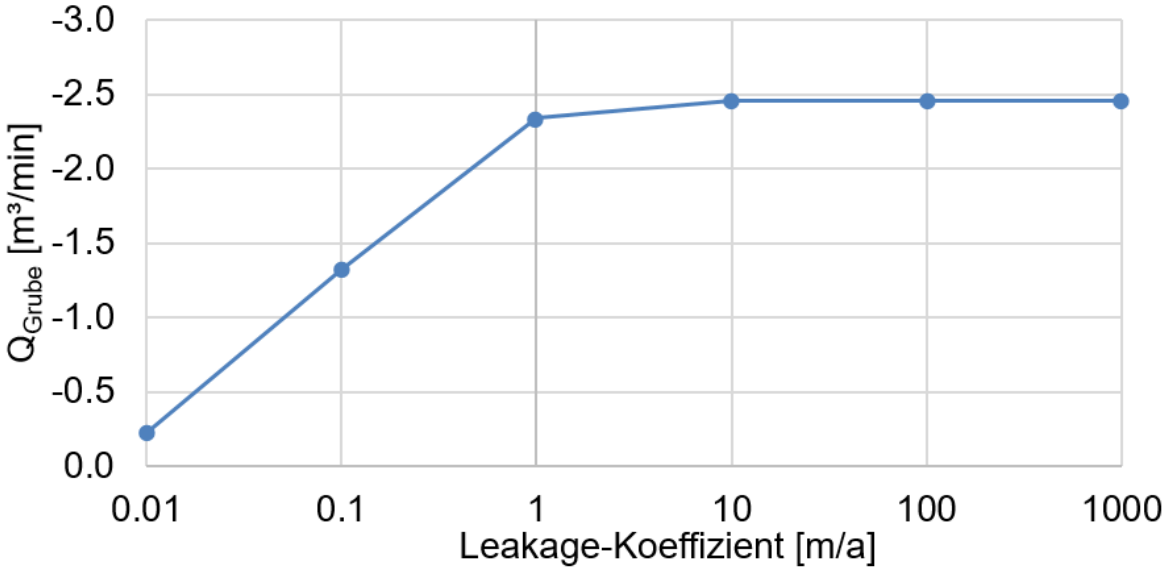


	Quartär	Kreide	Karbon	
			hangend	liegend
$k_{f,vertikal}$-Wert [m/s]	5 x 10^{-5}	5 x 10^{-10}	5 x 10^{-8}	1,6 x 10^{-8}
Anisotropie (v:h)	1:10	1:1	1:1	1:1

$$\sum \text{Zutritte Grube} \approx 2\ m^3/min$$

ahu AG

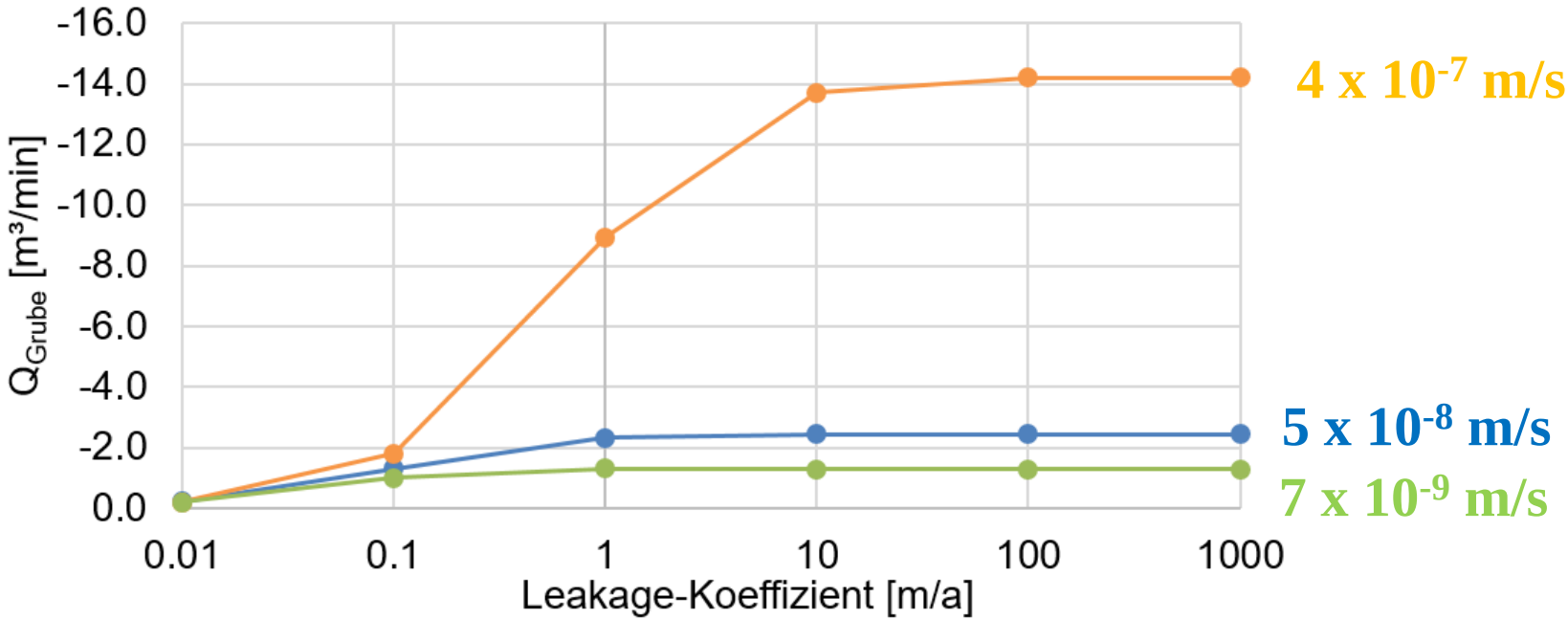
Leakage-Variation (Bergwerk)
Variante 1



	Quartär	Kreide	Karbon	
			hangend	liegend
$k_{f,vertikal}$-Wert [m/s]	5 x 10^{-5}	5 x 10^{-10}	5 x 10^{-8}	1,6 x 10^{-8}
Anisotropie (v:h)	1:10	1:1	1:1	1:1

ahu AG

Variation $k_{f,Karbon}$: GW-Förderung Bergwerk

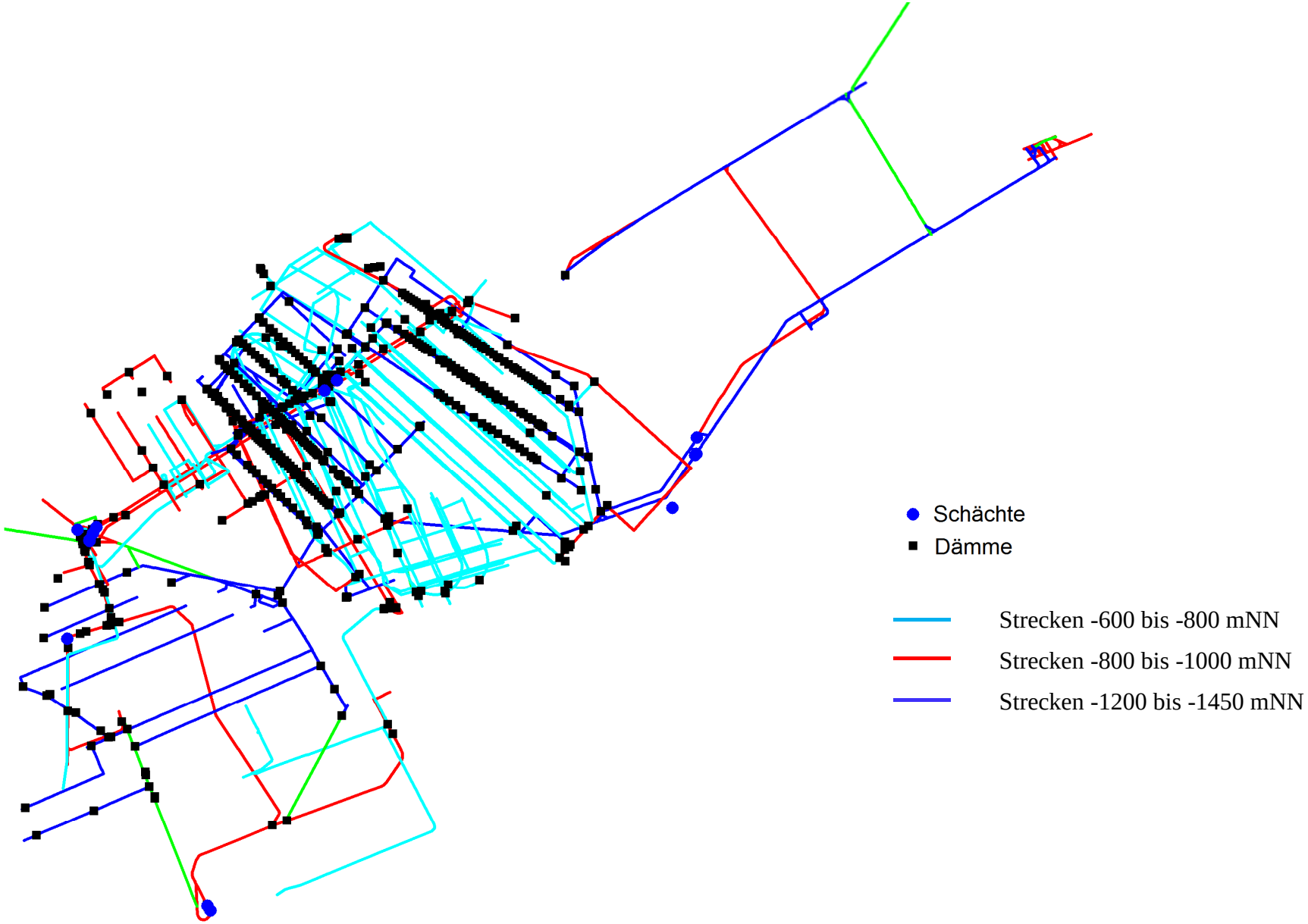


$k_{f,vertikal}$–Wert Karbon (hangend:liegend = 3:1)	Leakage-Faktor [m/a]					
	0,01	**0,1**	**1**	**10**	**100**	**1000**
4 x 10-7 m/s	0,2	1,8	9,0	13,7	14,2	14,2
5 x 10-8 m/s (Variante 1)	0,2	1,3	2,3	2,5	2,5	2,5
7 x 10-9 m/s	0,2	1,0	1,3	1,3	1,3	1,3

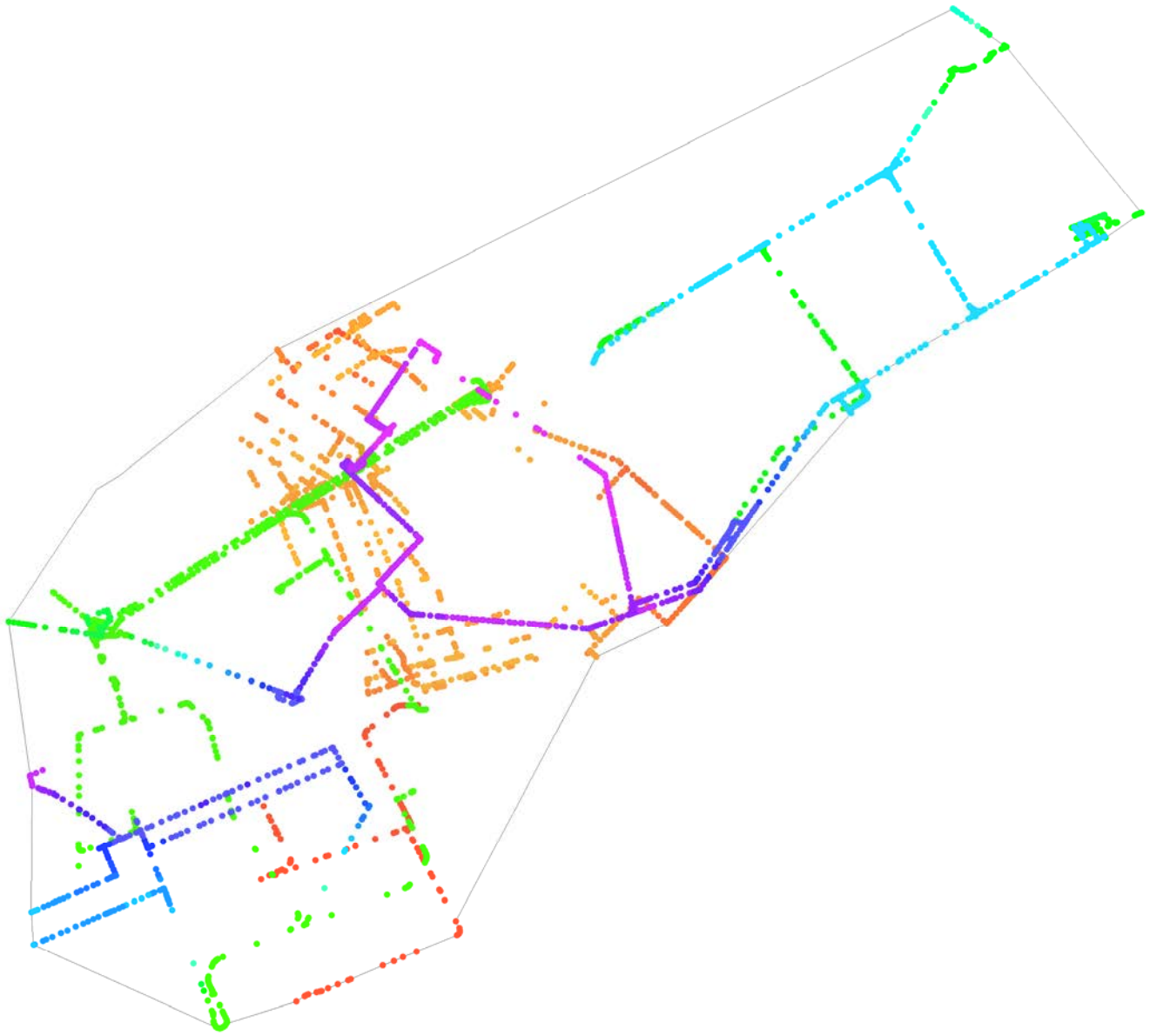
Q[m³/min]

ahu AG

Strecken, Schächte, Dämme



Tiefenlage Strecken (Auszug)

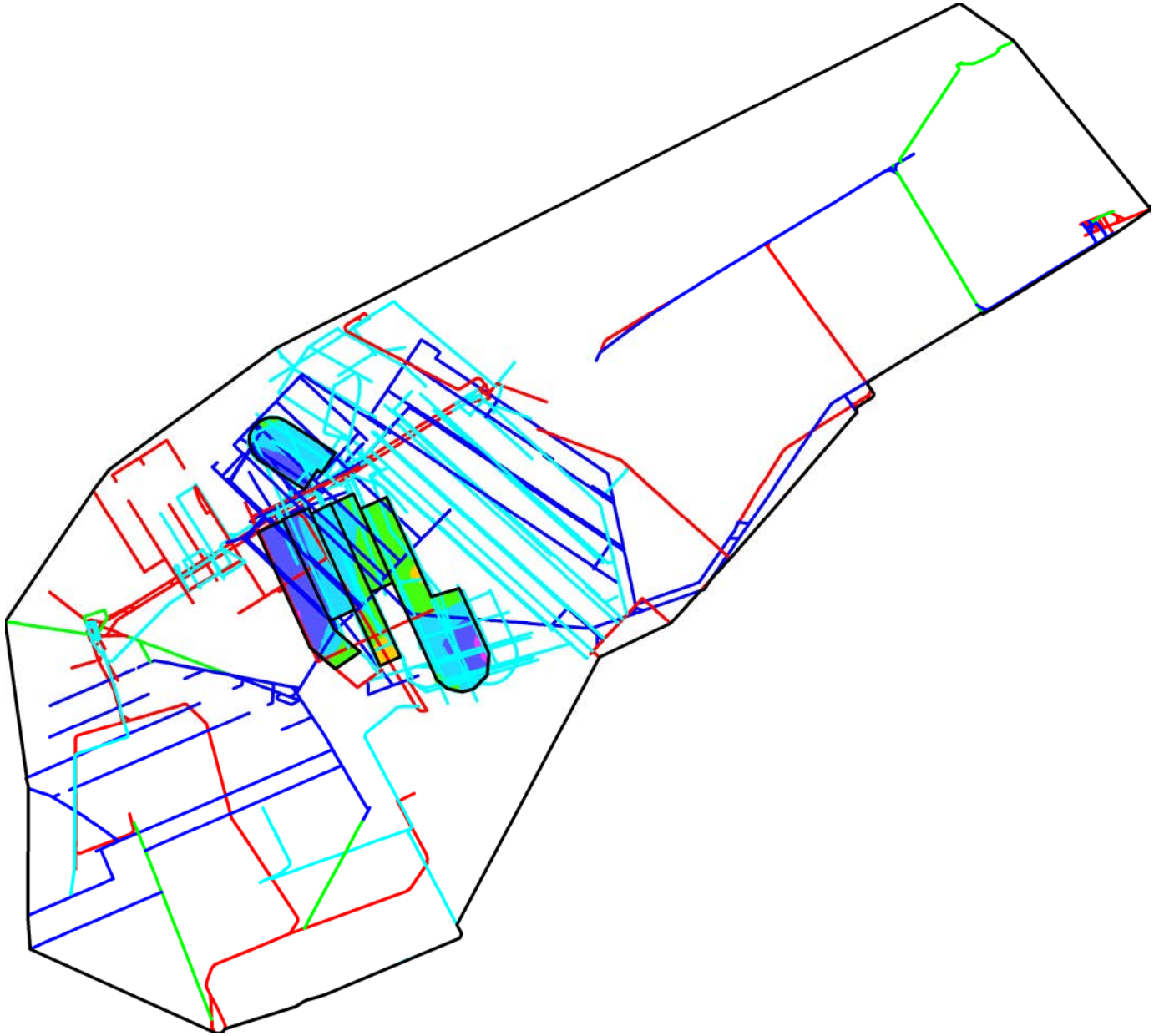


LEGENDE

Tiefe in mNN

-1500.00	-1470.00
-1470.00	-1440.00
-1440.00	-1410.00
-1410.00	-1380.00
-1380.00	-1350.00
-1350.00	-1320.00
-1320.00	-1290.00
-1290.00	-1260.00
-1260.00	-1230.00
-1230.00	-1200.00
-1200.00	-1170.00
-1170.00	-1140.00
-1140.00	-1110.00
-1110.00	-1080.00
-1080.00	-1050.00
-1050.00	-1020.00
-1020.00	-990.00
-990.00	-960.00
-960.00	-930.00
-930.00	-900.00
-900.00	-870.00
-870.00	-840.00
-840.00	-810.00
-810.00	-780.00
-780.00	-750.00
-750.00	-720.00
-720.00	-690.00
-690.00	-660.00
-660.00	-630.00
-630.00	-600.00

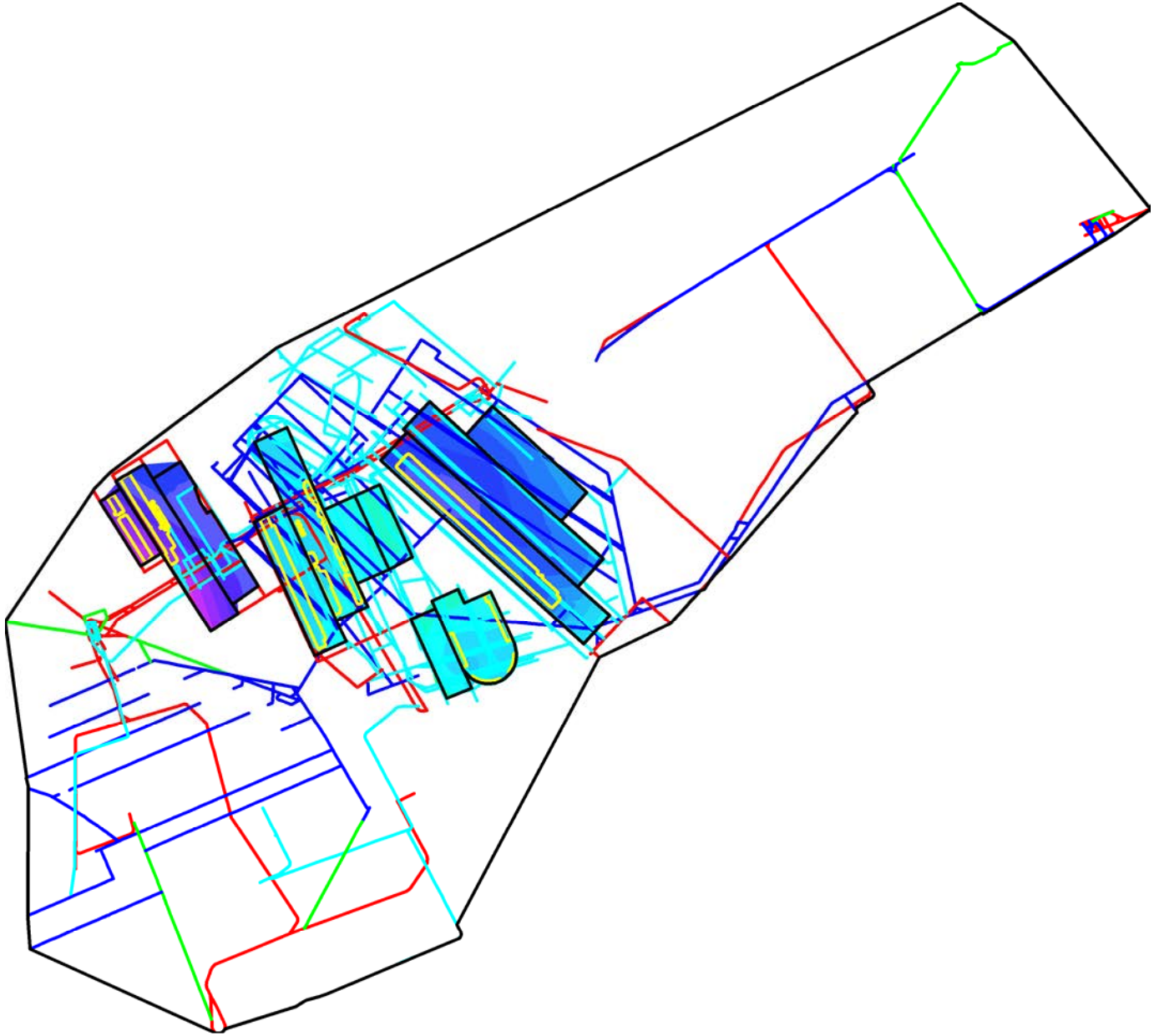
Flöz Zollverein 8



Abgebaute Flözfolge:

Flöz C
Flöz B1
Zollverein 3
Zollverein 5 Obk
Zollverein 6 Obk
Zollverein 6 Ubk
Zollverein 8
Grimberg 2-3 / BHV
Röttgersbank
Wilhelm 1/1-2

Flöz Grimberg 2-3



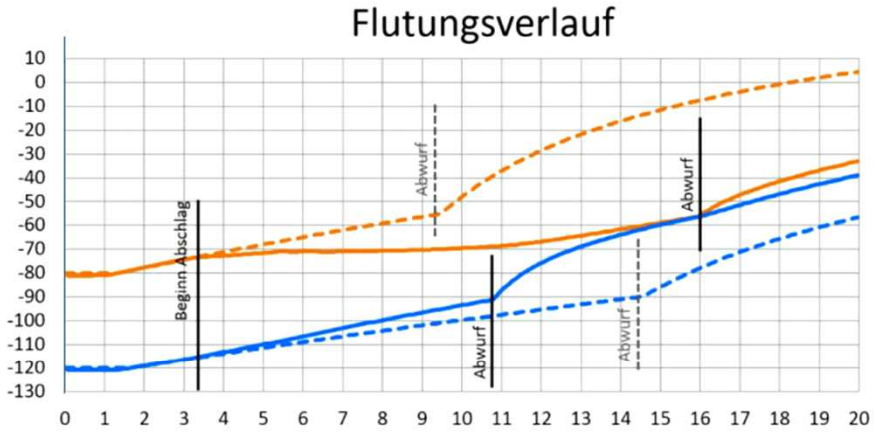
Abgebaute Flözfolge:

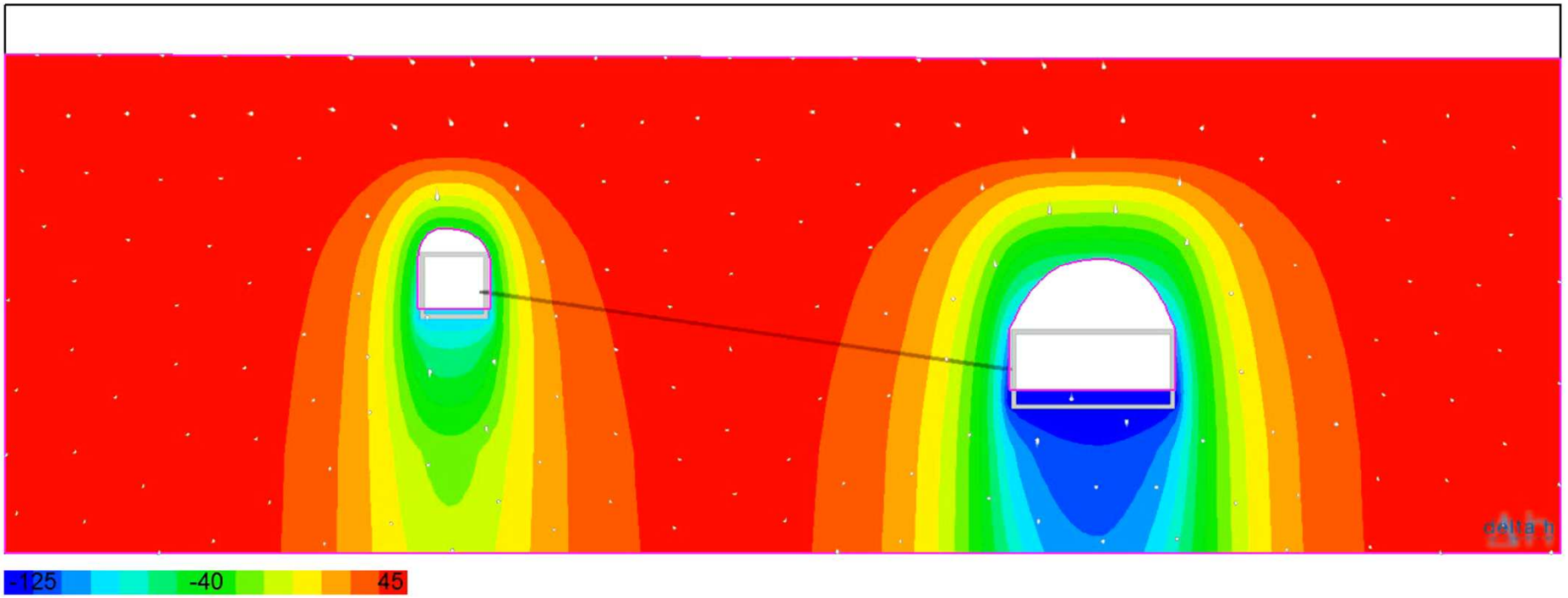
Flöz C
Flöz B1
Zollverein 3
Zollverein 5 Obk
Zollverein 6 Obk
Zollverein 6 Ubk
Zollverein 8
Grimberg 2-3 / BHV
Röttgersbank
Wilhelm 1/1-2

ahu AG

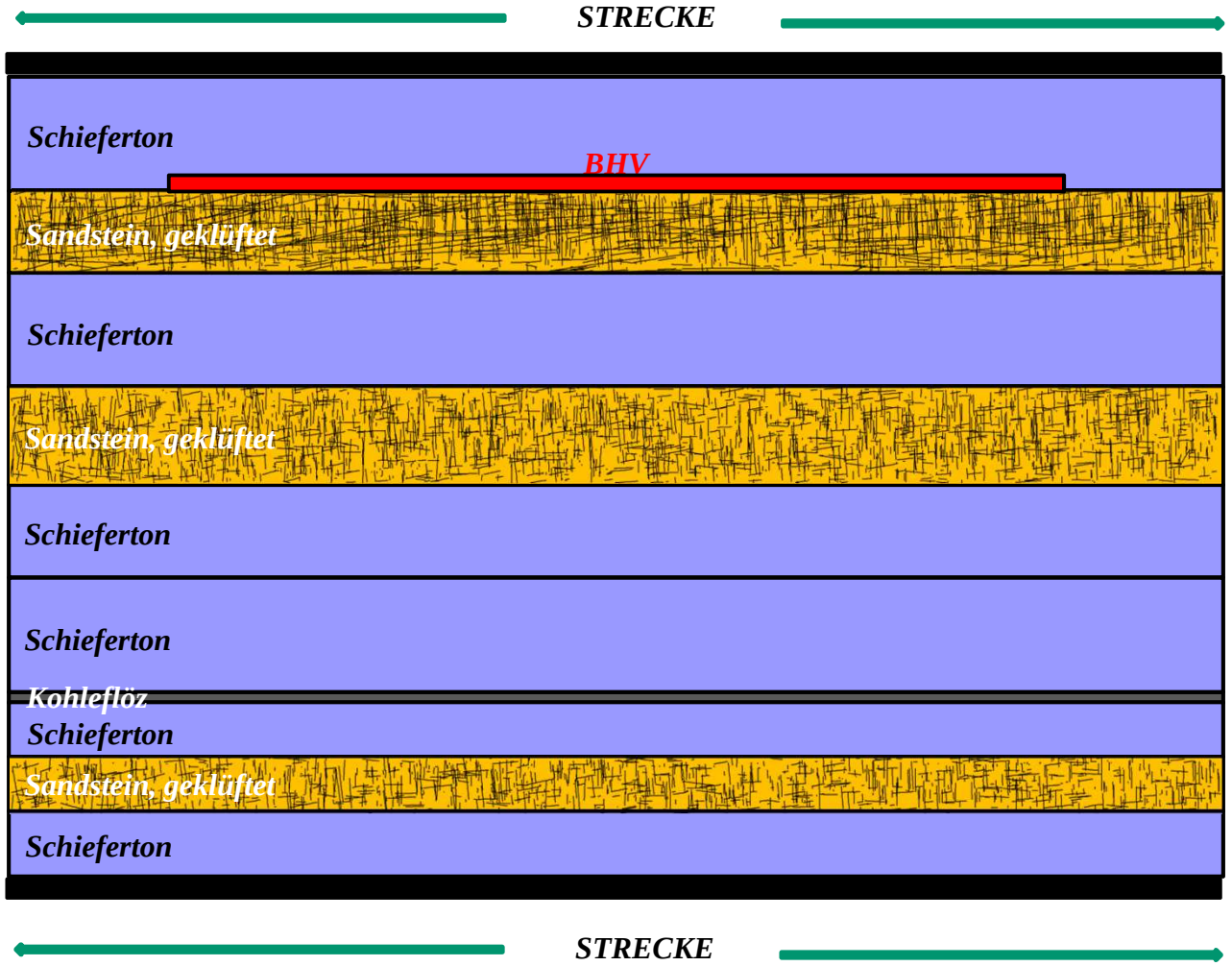
Flutungsmodell

Time: 0
Unit: Days
Vector Field Multiplier: 100
Variable: Potentiale
Color Mapping: Linear



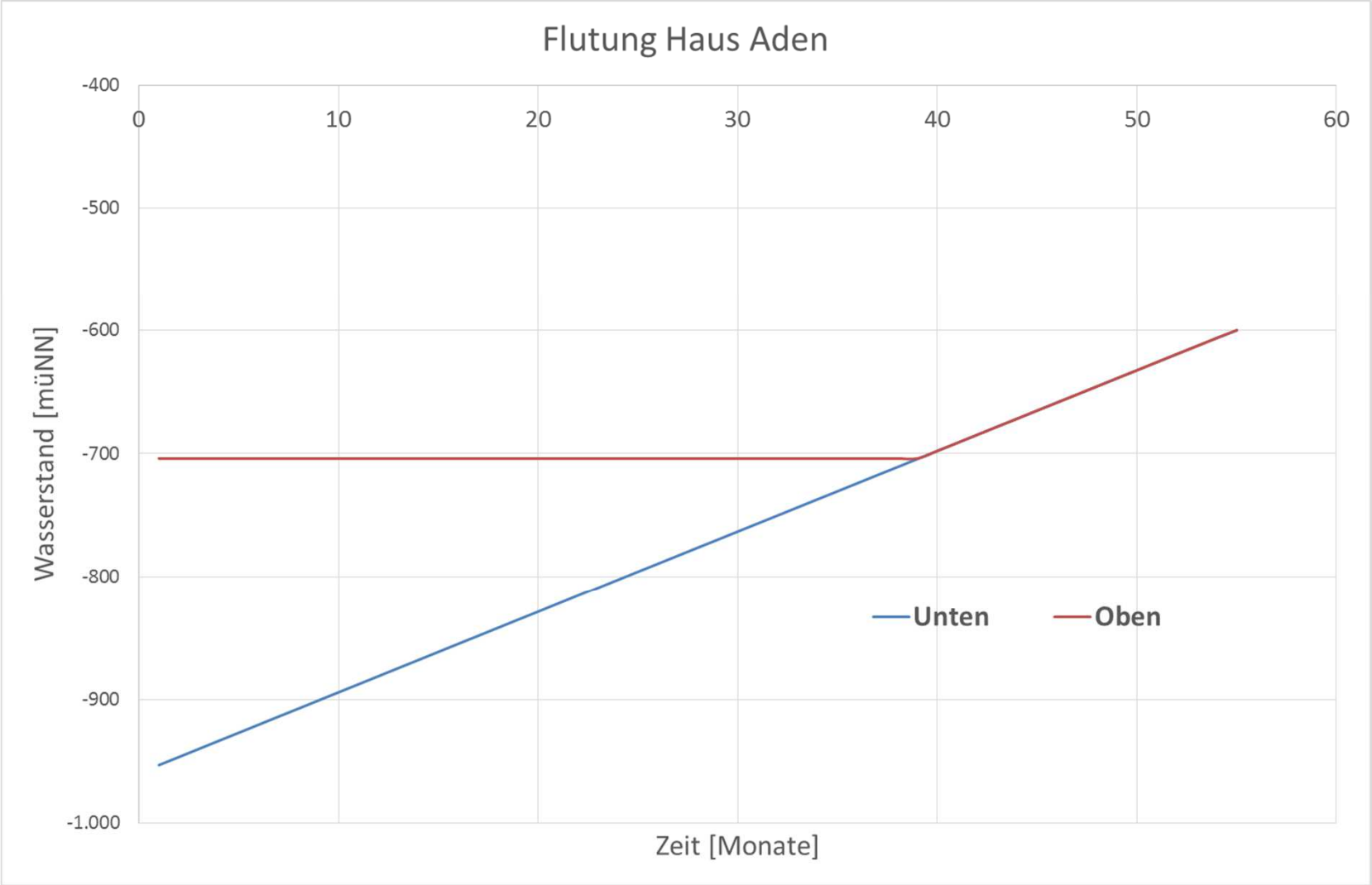


Hydrogeologische Systemvorstellung Nahfeld

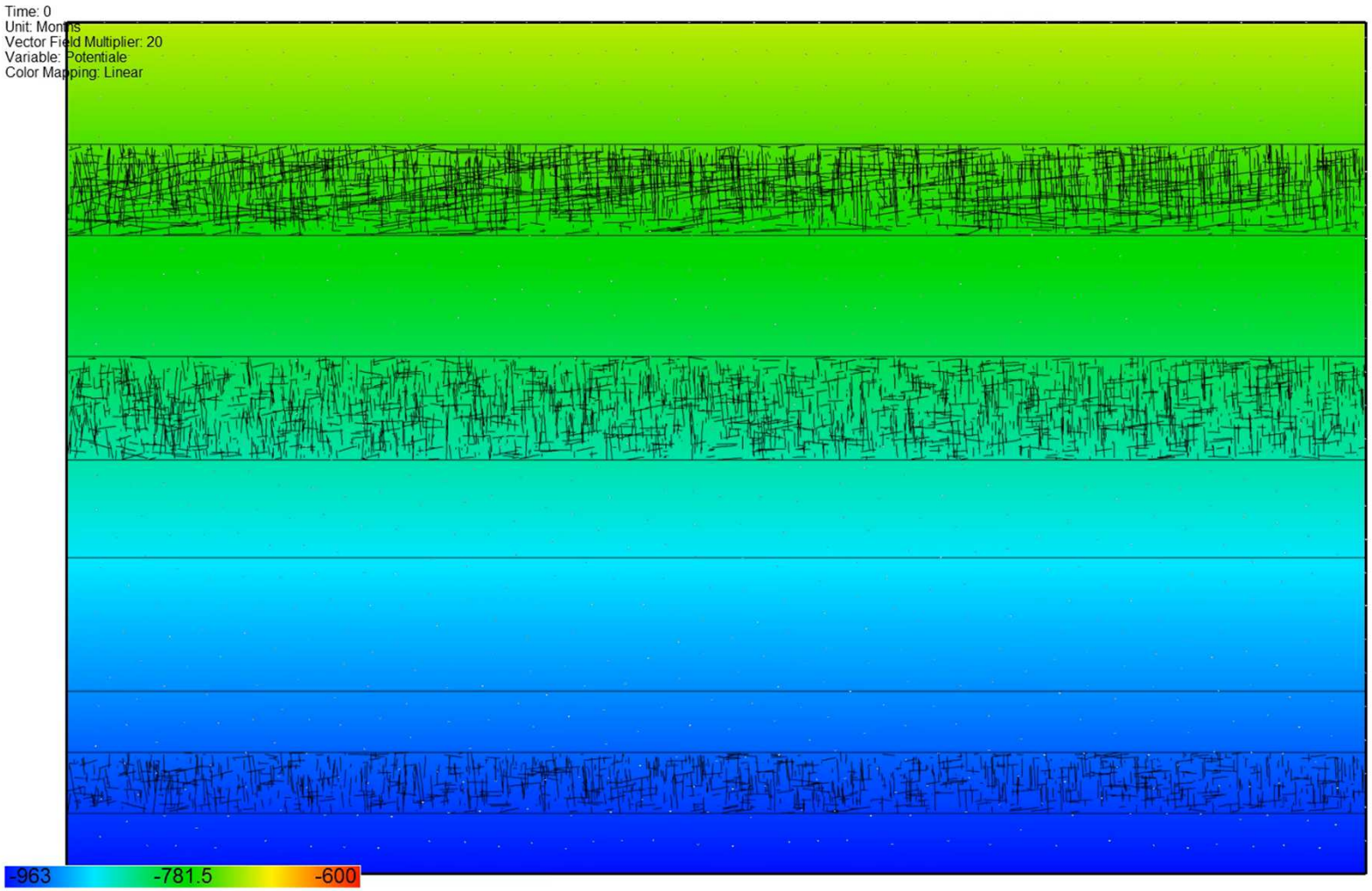


k_h [m/s]	k_v/k_h	n [-]
3×10^{-9}	1 / 3	0,02
1×10^{-8}	1 / 1	0,035
7×10^{-9}	1 / 1	0,07
3×10^{-9}	1 / 3	0,02
7×10^{-9}	1 / 1	0,07
3×10^{-8}	1 / 3	0,02
1×10^{-8}	1 / 3	0,02
3×10^{-8}	1 / 1	0,03
3×10^{-8}	1 / 3	0,02
7×10^{-9}	1 / 1	0,06
1×10^{-9}	1 / 3	0,02

Flutung Haus Aden

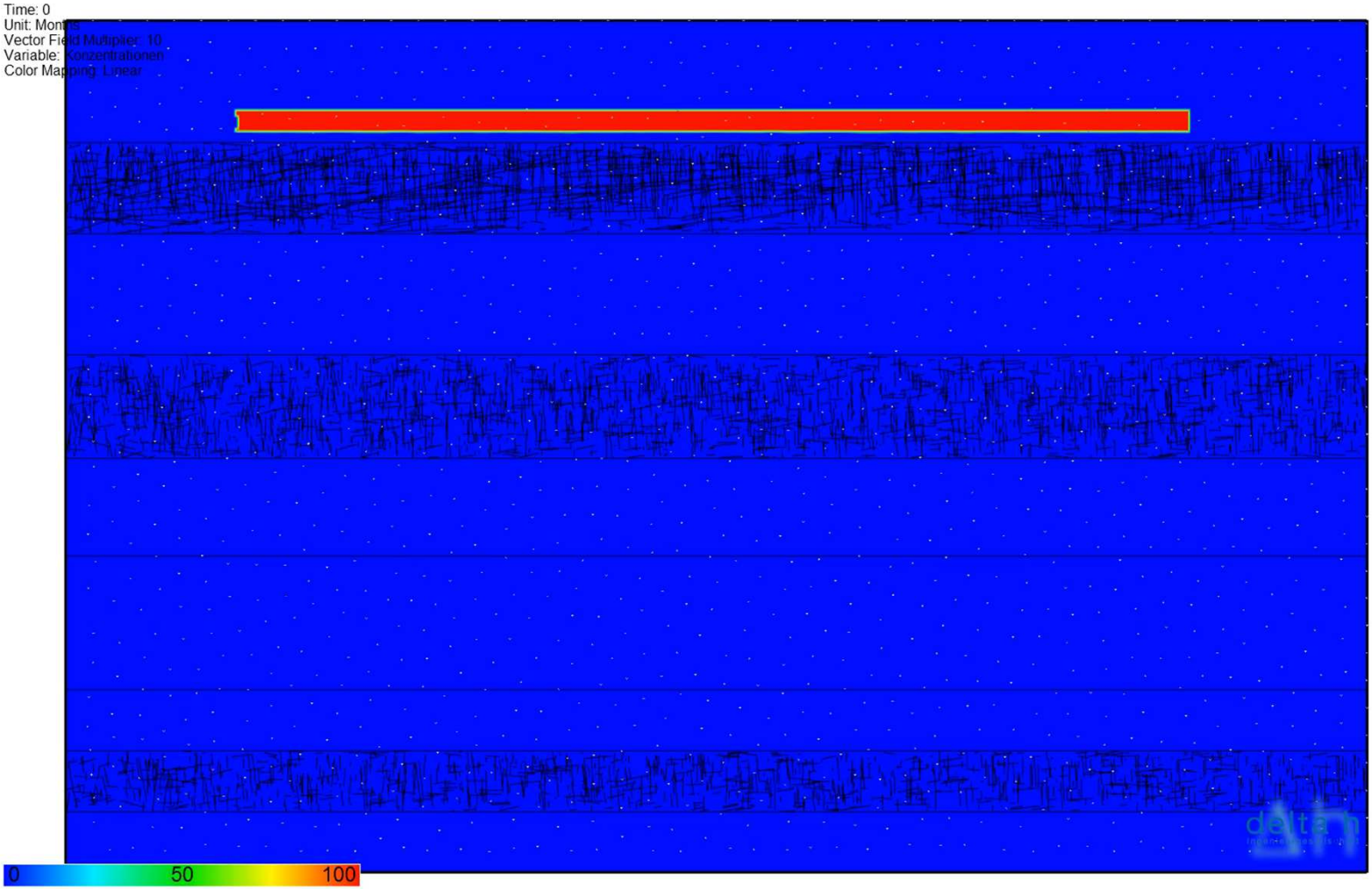


Wasserdruck



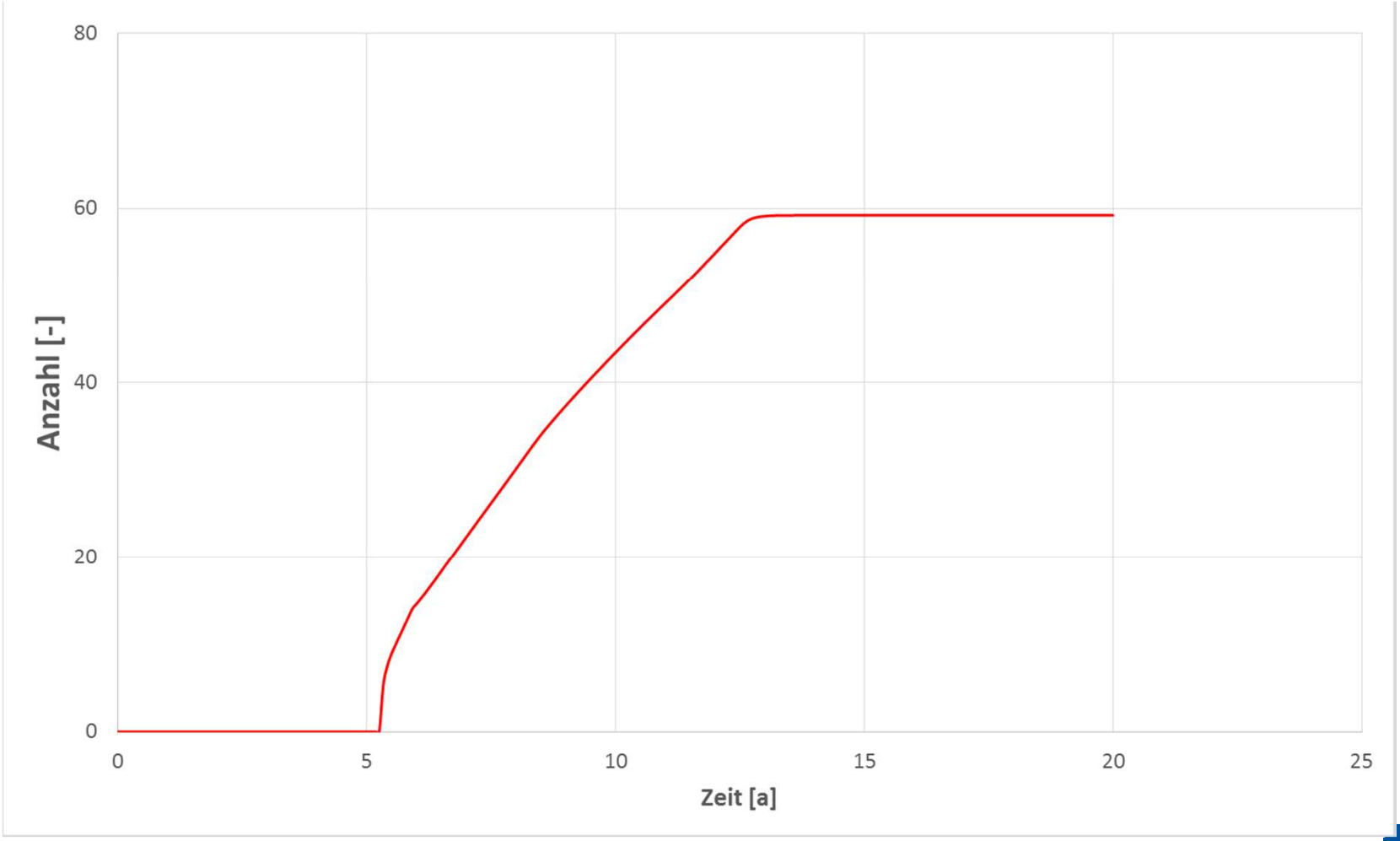
ahu AG

Konzentrationen - Tracer



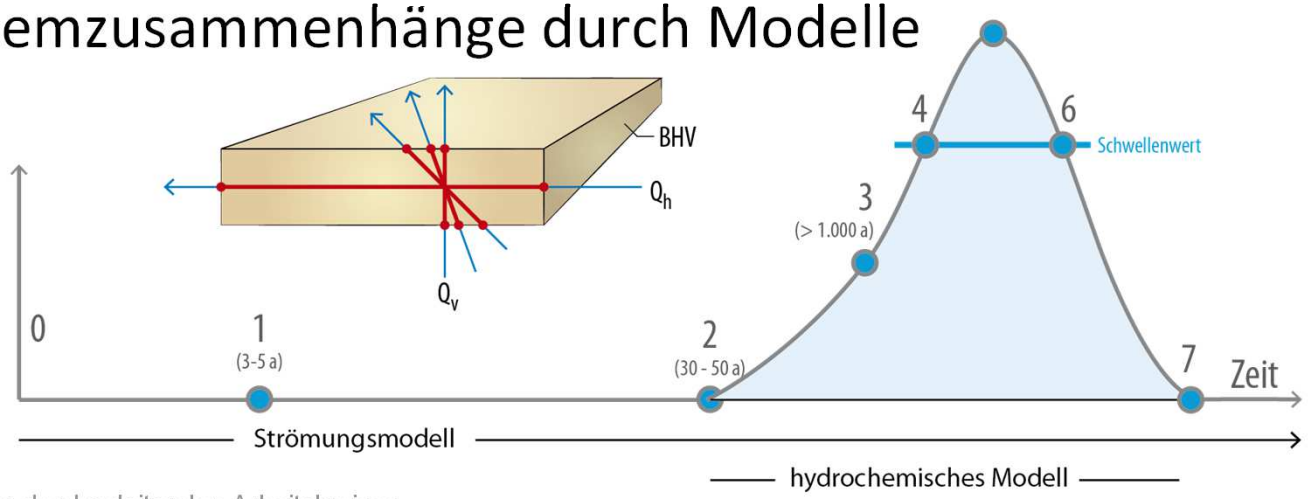
ahu AG

Porenwasseraustausch BHV



Zusammenfassung Freisetzung und Ausbreitung

- Schnelles (Röhre) + langsames Fließsystem (Matrix)
- Röhrenströmung bestimmt das Fließsystem
- Komplexe hydrochemische Prozesse in der BHV:
  - Verfestigt
  - Hohe pH-Werte / hydrochemische Barriere
  - Langfristig Auflösung (> 1.000 a)
- Langsame Strömung durch die Matrix zur nächsten Röhre
- Systemzusammenhänge durch Modelle



(6) SONSTIGES / AUSBLICK

4. AK: 24.05.2016

1. Ablauf des Betriebsplanverfahrens
2. Ergebnisse zusätzliche Untersuchungen PCB
3. Gefährdungspotential
4. Ergebnisse der Modellierungen
   - Freisetzung
   - Ausbreitung
5. Tagnahe Beeinflussung / Gespräch Prof. Carls
6. Erste Überlegungen Monitoring
7. ggf. AK 5 im Juni:
   Schwerpunkt: Risikoeinschätzung und Monitoring
8. ggf. AK 6 im August:
   Vorstellung des Gutachtens im Entwurf