



**TUBAF**

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.



**ITUN**

Institut für Thermische Verfahrenstechnik,  
Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik  
Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Braeuer

# Nachhaltige Grubenwasseraufbereitung und Gewinnung von strategischen Elementen an Altbergbaustandorten

## Ausgewählte Fallbeispiele



**kassel24**  
documenta Stadt Kassel 2024

02.-04. September 2024

## Inhalt

### 1 Fallbeispiele der Grubenwasserbehandlung

- Wassermanierung an Altstandorten des Uranbergbaus
- AMD Wasserbehandlung der Kupfermine Los Pelambres
- Von Bergbauschlämmen zum Geopolymer

### 2 Weitere Forschungsprojekte

- Theisenschlamm – r4 Verbundprojekt (BMBF)
- Hochtechnologieelemente (Audi – Stiftung für Umwelt)
- EXTRACT (EU Horizon)

### 3 Resümee

#### Trennproblem



#### Membran- screening (Lab-Scale)



#### Pilotierung



#### Prozess- entwicklung



#### Machbarkeits- studien (on- side)



Wassersanierung an Altstandorten des Uranbergbaus

- Ehemaliger Uranabbau via *in-situ* Laugung
- Kontinuierliche Laugung durch verbleibende Poren-, Gruben- und Drainagewässer
- Wasserbehandlung als Ewigkeitsaufgabe

**Ziel:** Abtrennung von Uran aus hydrogencarbonathaltigen Wässern  
 Grenzwerte: Hydrogencarbonat >20 mg/L ; Uran >10 µg/L

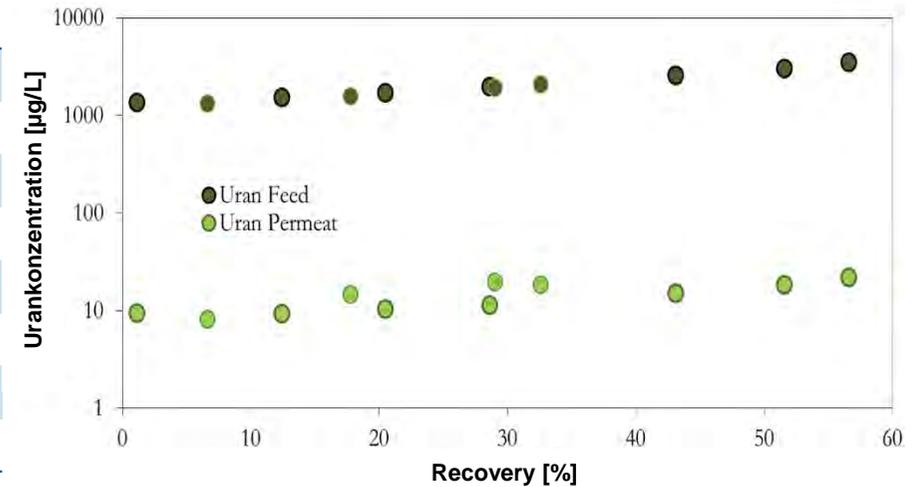
**Lösungsansatz:** Selektive Trennung mittels Membrantechnik und Ionentausch

Probe	Standort	Problematik
WBA Zulauf & Ablauf	Seelingstädt	Hydrogencarbonat, Sulfat
MEP1	Pilotanlage	Uran
Sickerwasser E-394	Culmitzsch	Speziation
PWBRCulm11	Culmitzsch	Ladung
Sickerwasser M-207	Helmsdorf	Uran; HCO <sub>3</sub> -Konzentration
A und B	Königstein	Konzentration
WBA Zulauf	Schlema	Speziation



Lösungszusammensetzung & Versuchsergebnisse

mg/L	Porenwasser	Sickerwasser	Culmitzsch	Helmsdorf
SO <sub>4</sub>	9414,2	5763,8	4313,3	3362,2
Mg	997,3	692,7	352,4	60,8
Cl	1162,9	667,5	602,7	591,0
Ca	420,6	280,6	320,6	76,2
HCO <sub>3</sub>	213,6	213,6	610,2	2196,6
NH <sub>4</sub>	31,6	8,3	0	0
U	0,5	1,0	3,1	11,9
As	0,2	0,04	0	1,0

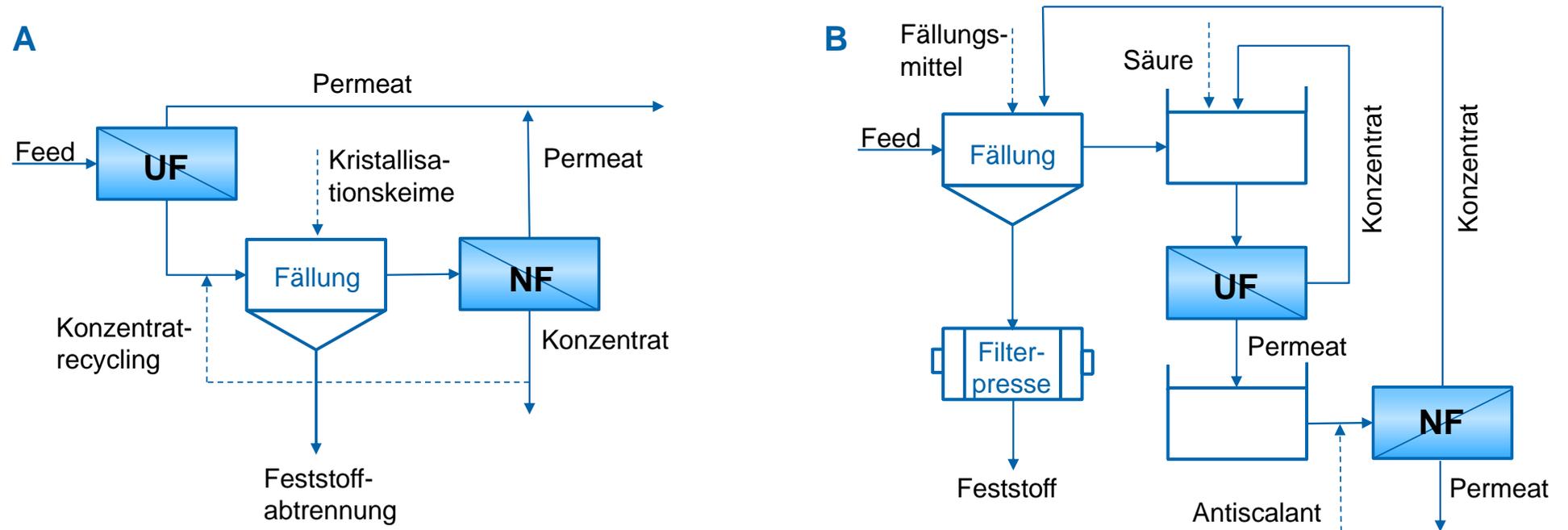


- Selektive Trennung von Hydrogencarbonat & Uran durch NF auch bei hohen Ionenkonzentrationen
  - ➔ Grenzwerteinhaltung; gute Permeabilität
  - ➔ Einfluss des Größenausschlusses > Ladungsausschluss
  - ➔ Einstufiger Prozess allein nicht zielführend

Up-Scale (Ausblick) – Alternatives hybrides Behandlungskonzept

- Selektive Abtrennung des Uran-Hydrogen-Komplexes durch NF
- Aufkonzentrierung bis zur Löslichkeitsgrenze (NF)
- Seeding-Precipitation zur Gewinnung eines deponierbaren Feststoffs

Mögliches Prozessdesign



Multifunktionelle Membrananlage für die kontinuierliche AMD-Behandlung

- AMD (Acid Mine Drainage) aus Kupferbergbau (Chile)

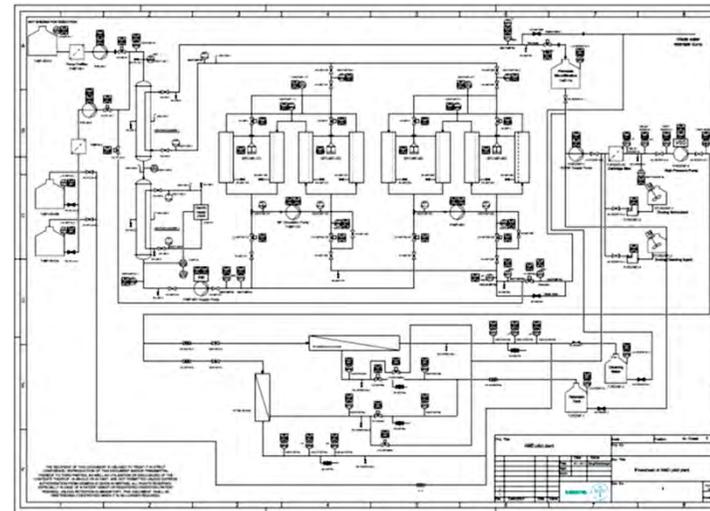
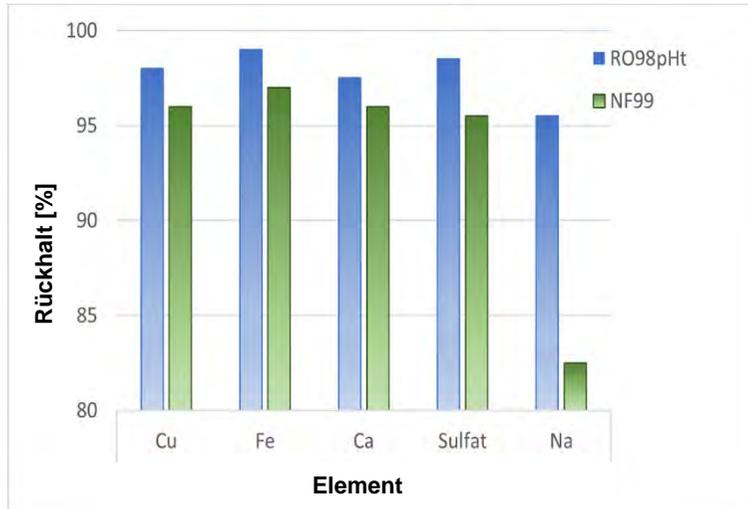
**Ziel:** Selektive Trennung monovalenter & multivalenter Ionen

**Lösungsansatz:** Entwicklung eines ökonomischen Trennprozesses zum Wasserrecycling und Metallionenabtrennung

	AMD (mg/L)	Typisches Meerwasser (mg/L)
<b>Na<sup>+</sup></b>	20	10 556
<b>Cl<sup>-</sup></b>	17	18 980
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	14 100	2 649
<b>Cu<sup>2+</sup></b>	2 830	-
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	983	-
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	759	1 262
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	413	400
<b>Elek. Leitfähigkeit (mS/cm)</b>	11,1	30,0
<b>pH</b>	2,2	7 - 8



Versuchsergebnisse



- Umfassendes Membranscreening, Langzeitstudien & Verifizierung des Behandlungskonzeptes
- Prozessdesign (Pilotmaßstab) & Bau einer multifunktionelle Membrananlage
- Kontinuierliche on-site AMD-Behandlung
- ➔ Bestätigung der Laborresultate, Prozessbelastbarkeit & ökonomischen Effizienz in Bezug auf Wasserrecycling & Metallionenabtrennung



Von Bergbauschlämmen zum Geopolymer

- Funktionsverlust des „Roter Grabens“ durch  $\approx 13.000$  t Schlamm (Metall- und Eisenhydroxidpräzipitate)
- Ableitung von belasteten Grubenwässern in den Vorfluter
- Keine Schlammverwertungsmöglichkeiten, keine Verantwortlichen

**Ziel:** Aufreinigung von Grubenwässer & Schlammbehandlung  
 Verarbeitung der behandelten Schlämme & Schlackenmischung zu Geopolymeren  
 Erstellen eines Grubenschlammkatasters & Öffentlichkeitsarbeit

**Lösungsansatz:** Entwicklung & Umsetzung eines on-site Schlammbehandlungsprozesses zur Aufbereitung/ Verwertung von Grubenwässern & Schlämmen im Tonnenmaßstab



Charakteristik des „Roten Grabens“

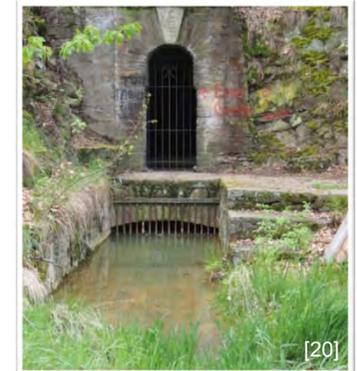
	Fluid		Sediment		
	min	max	min	max	
pH-Wert	4,9	7,09	5,2	7,2	[-]
Leitfähigkeit bei 25°C	829	1040	969	1820	[µS/cm]
TOC	1,2	2,6	6,4	17	[mg/l] bzw. [Ma.-% TS]
Gelöster Feststoffe	-	-	620	1100	[mg/l]
Trockenmasse	-	-	5,5	11,5	[Ma.-%]
Wasserlöslicher Anteil	-	-	0,62	1,06	[Ma.-%]
Cl	84	120	88	210	[mg/l]
SO <sub>4</sub>	220	390	260	570	[mg/l]
As	0,002	0,028	665	1810	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Pb	0,001	0,022	422	1380	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Cd	0.0104	0.216	11.4	252	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Cu	0,305	0,026	725	3000	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Zn	2,85	19,3	1430	17300	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Fe	89	109	107100	330100	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Al	0,02	6,29	20000	101300	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]
Hg	< 0,0001	< 0,0001	0,07	0,67	[mg/l] bzw. [mg/kg TS]

Wertstoffe

Al    Fe    Zn

Schadstoffe

As    Pb    Cd



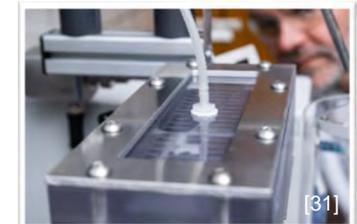


- ✓ **„Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus Stäuben der Kupferherstellung – Theisenschlamm - r4-Projektverbund“ (BMBF)**
  - Entwicklung eines Verfahrenskonzeptes (Biolaugung; chem. Laugung; Membranprozesse; Lösungsmittel-Extraktion; Adsorption) zur selektiven Gewinnung wirtschaftsstrategischer Elemente (Lab-Scale)
  
- ✓ **“Nachhaltige Gewinnung von Hochtechnologieelementen für die Elektromobilität mittels *in-situ* Extraktion und Fraktionierung” (Audi – Stiftung für Umwelt)**
  - On-site Studien zur *in-situ* Biolaugung in Kombination mit einem hybriden Membranprozess zur selektiven Gewinnung von Indium & Germanium (TRL 7-8)
  
- **„XTRACT – A sustainable Ecosystem for the innovative resource recovery and complex ore extraction“ (EU Horizon)**
  - Geplanter Aufbau einer *in-situ* Biolaugungsstrecke in Kombination mit einem mehrstufigen Membransystem zur selektiven Aufbereitung und Indiumkonzentrat-Gewinnung (Pilotmaßstab, TU BAF)



### Zusammenfassung

- Membrantechnik besitzt vielseitige Anwendungspotentiale bei der Behandlung von Grubenwässern (und anderen fluiden Stoffströmen)
  - ✓ Dekontamination
  - ✓ Wasserrecycling
  - ✓ Selektive Gewinnung von Wertstoffen
  - ✓ Effizienzerhöhung nachgeschalteter Prozesse
  
- Membranprozesstechnik
  - ✓ Kaum Chemikalienbedarf
  - ✓ Vergleichbar niedriger Energiebedarf (z.B. SX-EW)
  - ✓ Kompakte & mobile Systeme möglich





**TUBAF**  
Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.



**ITUN**  
Institut für Thermische Verfahrenstechnik,  
Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik  
Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Braeuer

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



## Bildnachweis

Titelfolie v.l.n.r.: Kupfermine Los Pelambres: P.Steinberger/TU BAF;  
 „Roter Graben“: K.Götze/TU BAF;  
 Wasserbehandlung: Wismut GmbH: Umweltbericht 2021;  
 Culmitzsch: Wismut GmbH/BMWK;  
 ZauBer-Membrananlage: K.Götze/TU BAF;  
 Ausstellung ZauBer: C.Seifert/Terra Mineralia

- [1] Probenahme Reiche Zeche: D.Müller/TU BAF
- [2] Batch-Zellen ITUN: K.Götze/TU BAF
- [3] Pilotanlage ITUN: P.Steinberger/ TU BAF
- [4] Prozessleitsteuerung *in-situ* Laugungsstrecke „Reiche Zeche“: D.Müller/ TU BAF
- [5] BHMZ-Membrananlage in der „Reichen Zeche“: R. Kunz
- [6] Deutschlandkarte: verändert nach commons.wikimedia.org
- [7] Culmitzsch: Wismut GmbH/BMWK
- [8] Wasserbehandlung Wismut: Wismut GmbH: Umweltbericht 2011.
- [9] Karte von Chile: verändert nach commons.wikimedia.org
- [10] AMD Lösungen Chile: P.Steinberger/TU BAF
- [11] Kupfermine Los Pelambres: P.Steinberger/TU BAF
- [12] AMD Los Pelambres: P.Steinberger/TU BAF
- [13] Containeranlage ITUN: R.Haseneder/TU BAF
- [14] Containeranlage Innenausbau ITUN: P.Steinberger/TU BAF
- [15] Containeraufstellung in Los Pelambres: P.Steinberger/TU BAF
- [16] Deutschlandkarte: verändert nach commons.wikimedia.org
- [17] „Roter Graben“: K.Götze/TU BAF
- [18] ZauBer-Membrananlage: K.Götze /TU BAF
- [19] Historische Darstellung „Roter Graben“: hSLUB/ Deutsche Fotothek, P.Schulz, 1906
- [20] „Roter Graben“ Mundloch HSU 2023: K. Götze/TU BAF
- [21] „Roter Graben“: Hess/HZDR

- [22] Containeranlage ZauBer: K.Götze/TU BAF
- [23] Geopolymere Ausstellung Terra Mineralia: C.Seifert/Terra Mineralia
- [24] Behandelte Schlämme: R.Reiber/TU BAF
- [25] Theisenschlamm. K. Meschke/TU BAF
- [26] *In-situ* Laugungsstrecke „Reiche Zeche“: D.Müller/TU BAF
- [27] BHMZ-Membrananlage: R. Kunz
- [28] Mikrobiologie Untertage: Institut für Biowissenschaften/TU BAF
- [29] Reiche Zeche, Freiberg: D.Müller/TU BAF
- [30] Biolaugungslösung Reiche Zeche: K.Götze/TU BAF
- [31] Schülerdemonstratoranlage: D.Müller/TU BAF
- [32] Erz und Membranmodul: K.Götze/TU BAF

Schlussfolie v.l.n.r.: Kupfermine Los Pelambres: P.Steinberger/TU BAF;  
 „Roter Graben“: K.Götze/TU BAF;  
 Wasserbehandlung: Wismut GmbH: Umweltbericht 2021;  
 Culmitzsch: Wismut GmbH/BMWK;  
 ZauBer-Membrananlage: K.Götze/TU BAF;  
 Ausstellung ZauBer: C.Seifert/Terra Mineralia