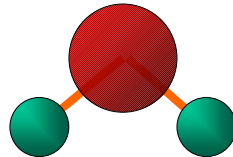


Vorlesung Wasserinhaltsstoffe

Dr. Thomas Dittmar



Schwermetalle II

Schwermetalle in der Hydrosphäre

Arsen As, Blei Pb, Cadmium Cd, Quecksilber Hg

2. Vorkommen, Quellen (natürlich, anthropogen), Wirkung (Humange-sundheit, Ökologie), Entfernung (Wasseraufbereitung)

Blei, Pb

Vorkommen

geogen: durchschnittlicher Pb-Gehalt der Erdkruste 0,0018 %

Bleierze:

Bleiglanz (Galenit) PbS , **Anglesit** PbSO_4 , **Cerrussit** PbCO_3

natürliche Freisetzung 5.870 t/a (0,2 % der jährlichen Gesamtemissionen)

geogene Hintergrundbelastung: $\leq 2,5 \mu\text{g/L}$

anthropogen: - in Hydrosphäre ab $> 9 \mu\text{g/L}$ (anthropogene Emissionen 2.030.000 t/a)

- * Grubenwässer (Bergbau)

- * Gebrauchsmetall

(Kabelummantelung, Munition, Lötzinn, Akkumulatoren,
Korrosionsschutzmittel Pb_2PbO_4)

Trinkwasser gegenwärtig Hauptexpositionspfad in Deutschland

- * Bleirohre (PbO_2)

- in Atmosphäre (Luftbelastung Ballungsräume $0,7 \mu\text{g/m}^3$)

- * Kohleverbrennung (Pb-Gehalte 2...40 mg/kg)

- * Bleitetraethyl $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ (ca. 200.000 t Pb in Deutschland)

Blei, Pb

Chemie der wässrigen Lösung

- Auftreten der Oxidationsstufen +2 und +4 ($p\varepsilon = 24,7$ / Pb^{2+} -Ionen sind rel. beständig)
- Tendenz zur **Komplexbildung**
 - Süßwasser: PbHCO_3^+
 - Salzwasser: PbCl_2 , PbCl^+ , PbClOH
 - Bodenwasser: Fulvin- u. Huminsäurekomplexe
- wässrige Systeme **ohne** anorganisch gebundenen Kohlenstoff (CO_3^{2-} , HCO_3^-), sulfidfreie und phosphatfreie Wässer (geringe Härte, $\text{pH} < 6$)
 - **hohe** Pb-Konzentrationen möglich (bis mg/l)
- wässrige Systeme mit CO_3^{2-} , HCO_3^- (hohe Härte, $\text{pH} > 6,5$)
 - **Löslichkeit** des Bleis wesentlich **geringer** (PbCO_3 , $\text{Pb}(\text{OH})_2$)
- zahlreiche schwerlösliche Verbindungen („äußerst unbewegliches“ Schwermetall)

Blei, Pb

Toxizität

- Akkumulation: - Mensch: Resorption bei Erwachsenen ca. 5 – 10 %
Resorption bei Kindern ca. 50 % (v. a. in Organen)
- Speicherung bevorzugt in Knochen (biolog. Halbwertszeit 2 a)
sowie in Leber, Niere (Exkretion), Blut (biolog. Halbwertszeit 15 d)

Wirkung:

- kein essentielles Element (kumulierendes Blut- und Nervengift)
- Wirkung auf menschlichen Organismen (chronische Exposition):
 - a) Schädigung des hämoglobinbildenden Systems (Häm-Synthese)
 - * Blockade Rkt. Glycin + Succinylcoenzym A, kat. δ -Aminolävulinsr.
 - b) Schädigung des sich entwickelnden Nervensystems
 - c) Veränderung der Zellpermeabilität
(Verhinderung des K- und Na-Austausches)
- Symptomatik der Bleikrankheit (Bleigehalten $> 300 \mu\text{g/L}$ im Blut)
 - * Müdigkeit, Appetitlosigkeit, Kopfschmerzen, schmerzhafte Koliken, Blässe der Haut, Anämie, Muskelschwäche (Gebrauchshand)
 - * Bleisaum (PbS–Ablagerungen) an Knochen (Zahnfleischrand!!)
 - * verminderte Lernfähigkeit und Verhaltensstörungen bei Kindern
 - * Fehl- und Frühgeburten (Placentapassage!!)

Blei, Pb

Umweltverhalten

- hohe Bioakkumulation in Nahrungsketten (aquatische / terrestrische)
- pflanzentoxisch (Hemmung d. Photosynthese)
- Wirkung im Gewässer (Hemm- und Giftstoff)
 - * $\beta(\text{Pb}) > 0,1 \text{ mg/L} \Rightarrow$ Hemmung des biochemischen Abbaus
→ Beeinträchtigung der Selbstreinigung der Gewässer
 - * $\beta(\text{Pb}) > 0,3 \text{ mg/L} \Rightarrow$ tödlich für Forellen
 - * $\beta(\text{Pb}) > 0,5 \text{ mg/L} \Rightarrow$ Hemmung des Nitrifikationsprozesses in Gewässern

Blei, Pb

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 2, Teil II: Chemische Parameter, deren Konzentration im Verteilungsnetz einschließlich der Hausinstallation ansteigen kann

lfd. Nr. 4 (tritt am 01.12.2013 in Kraft)

0,010 mg/L

nach TrinkwV 2001 § 6, Absatz 2 gilt

vom 01.12.2003 bis 30.11.2013 0,025 mg/L

vom 01.01.2003 bis 30.11.2003 **0,040 mg/L**

Bemerkung: Grundlage ist eine für die durchschnittliche wöchentliche Wasseraufnahme durch Verbraucher repräsentative Probe; hierfür soll nach Artikel 7 Abs. 4 der Trinkwasserrichtlinie ein harmonisiertes Verfahren festgesetzt werden. Die zuständigen Behörden stellen sicher, dass alle geeigneten Maßnahmen getroffen werden, um die Bleikonzentration in Wasser für den menschlichen Gebrauch innerhalb des Zeitraums, der zur Erreichung des Grenzwertes erforderlich ist, so weit wie möglich zu reduzieren. Maßnahmen zur Erreichung dieses Wertes sind schrittweise und vorrangig dort durchzuführen, wo die Bleikonzentration in Wasser für den menschlichen Gebrauch am höchsten ist.

Blei, Pb

Elimination von Blei

1) Flockung/Fällung/Filtration mit Al- und Eisen(III)-Salzen

- * **sehr wirksam**
 - Fällung des ionogen vorliegenden Pb
 - Adsorption des partikulär vorliegenden Pb
 - im pH-Bereich $6 \leq \text{pH} \leq 10$: 80...100 %-ige Elimination
 - Schnellfiltration $\beta_0(\text{Pb}) = 0,5 \text{ mg/l} \rightarrow \beta_{\text{Rest}}(\text{Pb}) = 10 \text{ }\mu\text{g/L}$
- * weitgehend bereits an Trübstoffe gebunden (ca. 85 %)

2) Fällung mit Kalkhydrat

- * Entfernung bei der Wasserenthärtung durch Kalkhydrat/Soda (Vollenthärtung)
pH-Bereich $9 \leq \text{pH} \leq 10$: 99 %-ige Pb-Eliminierung
- * **effektiver** als Flockung mit Al- und Fe(III)-Salzen

3) Bodenpassage

- * Pb-Elimination:
 - 30 – 50 %, auch bis 75 % gemessen
 - Adsorption von Pb-Verbindungen an Mn-Oxide
 - Langsamsandfilter – ebenfalls gute Elimination
- * Pb-Remobilisierung durch Komplexbildner (EDTA)!!!

Blei, Pb

Elimination von Blei

4) Ionenaustausch

- * stark saure Kationenaustauscher (besonders mit Chelatfunktionen – $\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$)
 - hohe Selektivität gegenüber Blei
 - * natürliche anorganische Kationenaustauscher (Zeolithe)
 - gute Eliminierungsleistungen
 - Regenerierung: 2 – 2,5 %-ige NaCl-Lösung
 - * schwach saure Kationenaustauscher mit komplexierenden Diolgruppen
 - nach 10.000 BV noch 99 %-ige Eliminierung
- ▶ wichtiges Verfahren, aber nur wenn Pb-Entfernung im Mittelpunkt steht

5) Membranverfahren (Reversosmose)

- * hohe Eliminationsraten → hohe Kosten

Cadmium, Cd

Vorkommen

- geogen:
- sehr seltenes Vorkommen in der Erdkruste $5 \cdot 10^{-5} \%$
 - als Sulfid (Cadmiumblende *Greenockit* CdS), oder Otavit (CdCO₃)
 - Begleitmetall in Zink-, Blei- und Kupfer-Erzen
 - v. a. ähnelt dem Zink, deshalb vergesellschaftet mit Zn (ZnS/ZnCO₃)
 - natürlicher globaler Cd-Eintrag 40 t/a (ca. 5...10 %-Anteil),

- anthropogen:
- Eintrag in Umwelt weltweit 7.500 t/a (ca. 90 %-Anteil),
 - Weltproduktion 19.700 t (1986), BRD 1.300 – 2.000 t

Cd-Emissionen einzelner Industriezweige (BRD, 1990)

- Korrosionsschutz
- PVC-Stabilisator
- Legierungsbestandteil
- Ni-Cd-Trockenbatterien
- Pigmentfarbstoff

	Wasser	Boden	Luft
	in t/a		
Kohle- und Ölverbrennung			120
Zementproduktion			40
Batterieherstellung			40
Galvanikbetriebe			500
Farbstoff- und Plastproduktion	300		
Cd-Produktion (Rostschutz)	240		
Bergbau	3000		
Düngemittel		140	

Cadmium, Cd

Vorkommen

- Haupteintrag: v. a. industrielle Abwässer
- Grundwasser: 0,13 – 0,2 µg/L
- Oberflächenwasser: < 0,1 – 0,4 µg/L (Eintrag über Schwebstoffe)
- Kontaminationen im Trinkwasser sind auf Unreinheiten verzinkter Rohre zurückzuführen in der Regel < 1 µg/L, maximal 10 µg/L

Anthropogen bedingter Cd-Eintrag

Jahr		1750	1930	1970	2100
Luft	[ng/m ³]	0	2,4	5,7	8,7
Boden	[µg/kg]	100	160	320	750
Flusssediment	[µg/kg]	150	900	3.900	15.000
Flusswasser	[µg/L]	0,03	0,18	0,78	3,0

Cadmium, Cd

Chemie der wässrigen Lösung

Cd²⁺

- starke Tendenz zur **Komplexbildung**

Süßwasser: CdHCO_3^+ , CdSO_4^0 , $\text{Cd}(\text{SO}_4)_2^{2-}$

Salzwasser: CdCl_2^0 , CdCl^+ , CdClOH

- $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ($\text{pK}_L = 13,8$), CdCO_3 ($\text{pK}_L = 13,7$), CdS ($\text{pK}_L = 27,2$)
- hohe Mobilisierung durch pH-Wertabsenkung („gut bewegliches“ Schwermetall)
- Bildung von $\text{Cd}(\text{OH})_2$ stark pH-abhängig (β_{\min} bei pH 10...11)
- Cd-Huminsäure-Komplexe lagern sich vorzugsweise an Trübstoffe an (Möglichkeit der Entfernung)

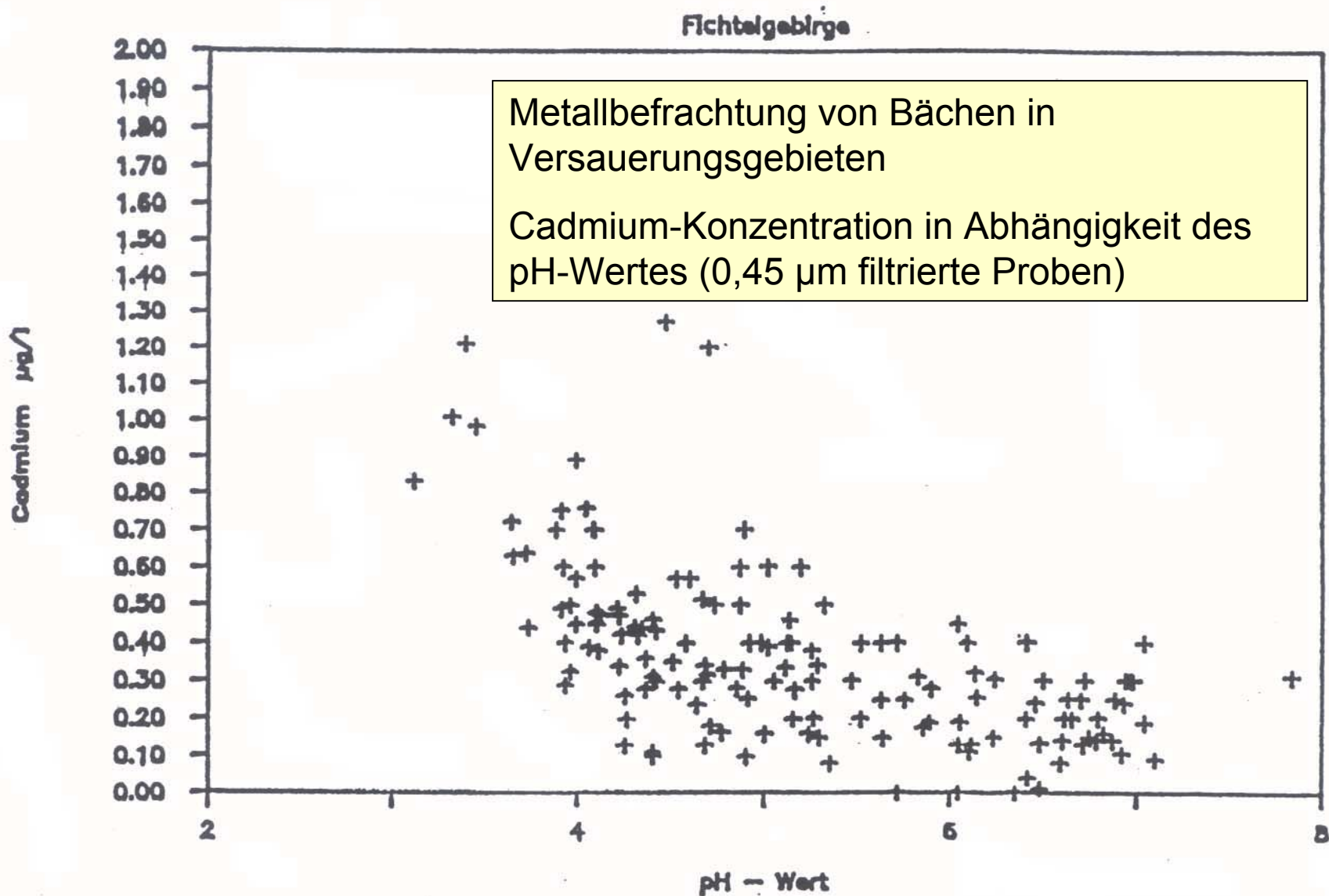
Cadmium, Cd

Umweltverhalten

- Akkumulation im Gewässersediment bis 30.000fache des Wassergehaltes
- Gefahr der Remobilisierung!
 - * Bodenversauerung führt zu Cd-Anstieg im Grund- /Oberflächenwasser bis $> 10 \mu\text{g/L}$
 - * Einfluss konkurrierender Ionen, organischer Komplexbildner, Redoxreaktionen
- **starke Bioakkumulation**
 - * in aquatischen Organismen Konzentrierungsfaktor bis 2000
 - * Anreicherung in Fischen (Niere), im Menschen (Niere, Leber)
 - * Aufnahme über Verdauungstrakt und über Luft (Tabakrauch $0,1 \dots 0,2 \mu\text{g/Zigarette}$)
- **lange Verweildauer** in Umweltstrukturen

Verweildauer	Konzentration	Umweltstruktur
20 – 30 d	0,1 – 500 ng/m ³	Atmosphäre
bis 2 a	0,01 – 42.000 $\mu\text{g/L}$	Oberflächenwasser
13 – 40 a		Mensch (Ausscheidung über Harn)
bis 280 a	0,1 – 500 mg/kg	Boden (Anreicherung in der Pflanze)

Cadmium, Cd



Cadmium, Cd

Toxizität

- **hohe (chronische) Toxizität**
 - ersetzt Zink in den Enzymen → unwirksam
 - Bindung an Proteine → Eingang in Leber und Niere sowie Knochen
 - akute Fischtoxizität ca. 1 µg/L
 - PTWI = 500 µg beim Erwachsene ($t_{1/2}$ = 13 ... 47 Jahre)
 - Störung der **Nierenfunktion**, Leber- und Lungenschäden, Knochenveränderungen (schmerzhafte Knochenerweichung)

1947 **ITAI-ITAI-Krankheit (Japan)** durch Verzehr von Cd-verseuchtem Trinkwasser und Nahrungsmitteln (Reis, 50 – 60 mg/kg)

Symptom: Nierenschmerzen, Ermüdung, **schmerzhafte Skelettveränderungen** mit oft letalem Ausgang (→ 100 Tote, v. a. Frauen betroffen), hohe Cd-Konz. in Nieren, Leber u. Skelett, Eindämmung durch Zugabe von Calcium und Vitamin D

Cd gelangte in Hydrosphäre (Fluss Jintsu, Präfektur Toyama) durch Auslaugung von Abraumhaldenmaterial eines Bergwerks (Zinkmine) u. die Abwässer einer Zinkhütte, Bewässerung mit Flusswasser bzw. Hochwasser (Belastung der Felder)

- **Kanzerogenität** wahrscheinlich, **Gentoxizität** umstritten (Chromosomenaberration)

Cadmium, Cd

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 2, Teil II: Chemische Parameter, deren Konzentration im Verteilungsnetz einschließlich der Hausinstallation ansteigen kann

lfd. Nr. 5

0,005 mg/L

Elimination von Cadmium

1) Flockung/Fällung/Filtration

- Flockung mit Aluminium- und Eisen(III)-Salzen

Al: pH = 8,5 ... 11

Fe(III): pH > 8

- Fällung mit Kalkhydrat bei pH = 8,5 ... 11

Fällung als $\text{Cd}(\text{OH})_2$ und CdCO_3

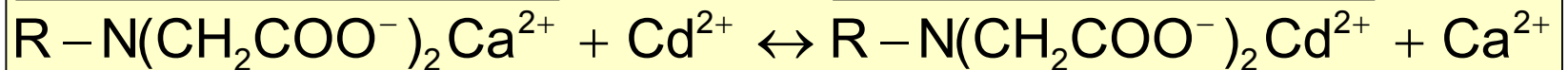
Cadmium, Cd

Elimination von Cadmium

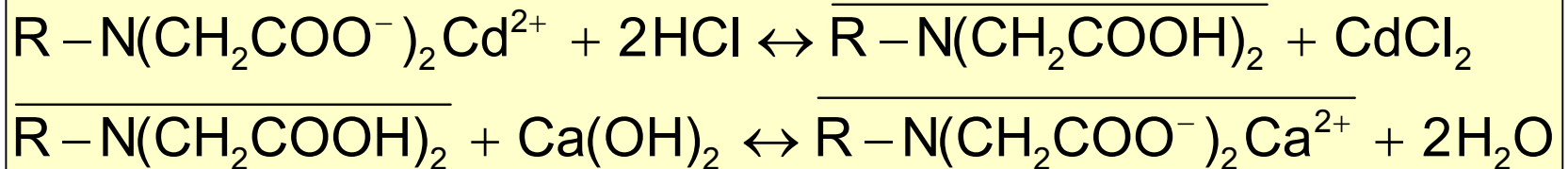
2) Ionenaustausch

- Kationenaustauscher mit Chelatgruppen (Imino-Diacetat-Gruppen) für spezielle Anwendungen
- Industrie zur Abwasserreinigung meist in Mono-Natriumform
- für Trinkwasseraufbereitung Calciumform

Beladung



Regeneration



Quecksilber, Hg

Vorkommen

- geogen:
- mittl. Konz. in der Erdkruste 0,03 – 0,08 mg/kg ($5 \cdot 10^{-5} \%$)
 - Verwitterung von Hg-haltigen Mineralien (z. B. Zinnober HgS, $pK_L = 53$)
 - Verflüchtigung aus Erdrinde, Vulkanausscheidungen und Ozeanen
(ca. **40.000...60.000 t/a** gelangen aus natürlichen Quellen in Atmosphäre)

- anthropogen:
- vielfältige Anwendung, Eintrag in Gewässer meist anthropogenen Ursprungs (Einleitung max. $c = 50 \mu\text{g/L}$)
 - anthropogene Emissionen ca. **15. 000 t/a**
 - Emission aus Bergbauaktivitäten 5.000 t/a
 - Verbrennung von fossilen Energieträgern ca. 5.000 t/a
 - Hg-Dampflampen (UV-Reaktoren), Batterien, Messinstrumente, Dental-Hg
 - Chemische Industrie (PBSM [Beizmittel für Saatgut], Pigmente, Kat.)
 - Kathodenmaterial bei der Chloralkalielektrolyse (Hg-Verfahren)
 - Extraktionsmittel (Amalgambildung, Edelmetallgewinnung)
- * Goldgräber haben in den vergangenen 20 Jahren mehr als 2.500 t Quecksilber in das Einzugsgebiet des Amazonas eingetragen

Quecksilber, Hg

Chemie der wässrigen Lösung

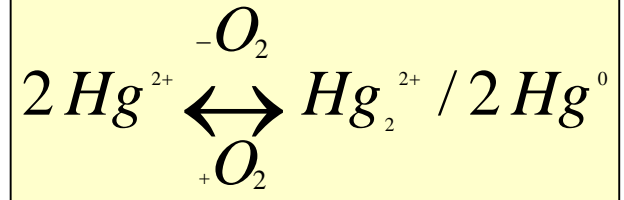
anorganisch: Hg^{2+} , Hg_2^{2+} , Hg^0

- O_2 -arme Systeme (reduzierend) **vorrangig $\text{Hg}_2^{2+} \rightarrow \text{Hg}^0$**
(unter anoxischen Bed. im Sediment/ flüchtig)

- oxidierendes Milieu \rightarrow **vorrangig Hg^{2+}**
vor allem als $\text{Hg}(\text{OH})_2^0$ - und $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}^0$ -Komplexe

- HgS ($\text{pK}_L = 53$), Hg_2Cl_2 ($\text{pK}_L = 18$)

- „äußerst unbewegliches“ Schwermetall



organisch:

erhöhte Löslichkeit bzw. Flüchtigkeit

Entstehung durch Biomethylierung

- R-Hg^+ besonders $\text{CH}_3\text{-Hg}^+$

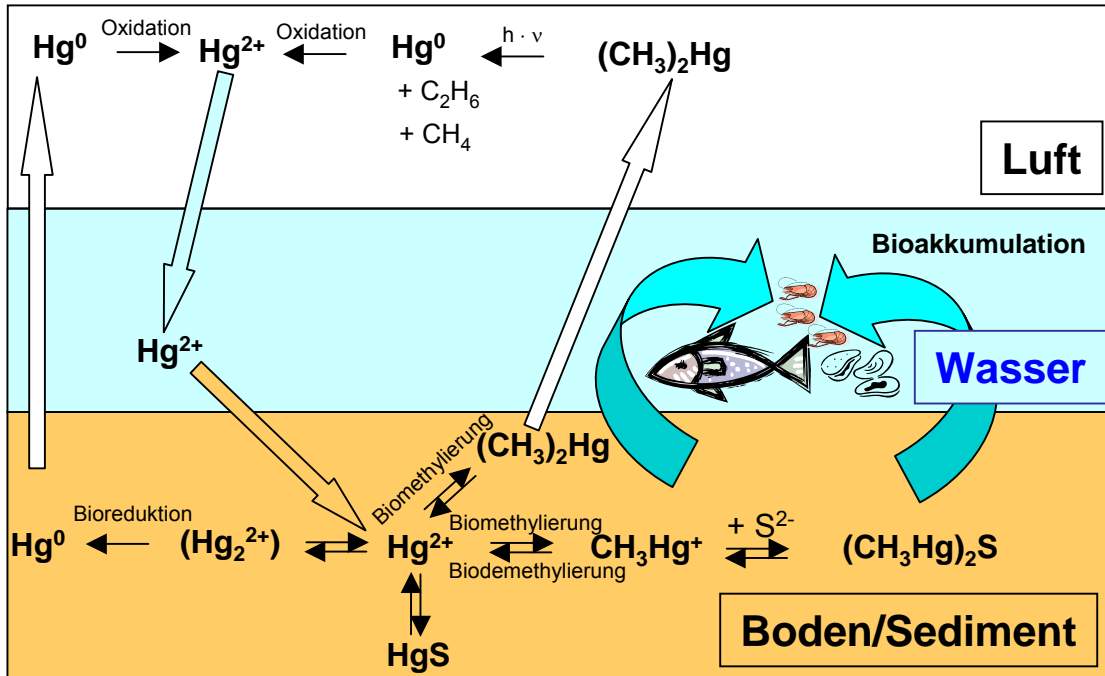
Monomethylquecksilber

- R-Hg-R_1 besonders $\text{CH}_3\text{-Hg-CH}_3$
 $\text{CH}_3\text{-S-Hg-CH}_3$

Dimethylquecksilber

Quecksilber, Hg

Mikrobielle, biochemische Reaktionen (Hg-Zyklus)



vereinfachter
Quecksilberkreislauf

Quecksilberspezies:

- HgS unter anoxischen Bedingungen / im Sediment fixiert
- Hg^{2+} unter oxidierenden Bedingungen Mobilisierung in Wasserphase, Mobilisierung in Atmosphäre sowie Bioakkumulation
- Hg^0 Entstehung durch Bioreduktion (1 a)
- H_3CHg^+ Entstehung durch Biomethylierung
- $(\text{H}_3\text{C})_2\text{Hg}$ Entstehung durch Biomethylierung (2d)

Eigenschaft	Hg^0	CH_3HgCl	$(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$	HgCl_2	Hg_2Cl_2	HgS
Wasserlöslichkeit g/L bei 25°C	$2 \cdot 10^{-5}$	5	0,015	73	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-24}$
Dampfdruck Pa bei 25°C	0,25	1,76	8.300	0,016	$1,3 \cdot 10^{-8}$	n. d.

Quecksilber, Hg

Umweltverhalten

- **starke Tendenz zur Adsorption** an verschiedenen Materialien (Schlämmen wie Ton, Eisenoxid, S-haltige Verbindungen „Thiophilie“)
 - Anreicherung im Sediment (Hg_2Cl_2 , **HgS**)
(Remobilisierung durch bakterielle Oxidation des Sulfidschwefels)
 - Anreicherung an feinen Trübstoffen
(gute Entfernung durch konventionelle Fällungs- und Flockungsverfahren)
 - „äußerst unbewegliches“ Schwermetall

Umweltkompartiment	Konzentration
Atmosphäre (globaler Mittelwert)	1...10 ng/m ³
Regenwasser	0,02...0,5 µg/L
Oberflächenwasser (Mittelwert)	0,1 µg/L
Grundwasser	0,01...0,4 µg/L
Rheinsediment (Mittelwert)	4,5 µg/g
Sediment d. Minamata-Bucht	2,01 mg/L

Quecksilber, Hg

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 2, Teil I: Chemische Parameter, deren Konzentration sich im Verteilungsnetz einschließlich der Hausinstallation in der Regel nicht mehr erhöht

lfd. Nr. 12

0,001 mg/L

Toxizität

- organische Quecksilberverbindungen **10 -100 mal** toxischer als anorganische Verbindungen
- unter anorganische Quecksilberverbindungen sind **2-wertige toxischer als 1-wertige**

1) anorg.: oral aufgenommenes anorganisches Hg₀ nur untergeordnete toxikologische Relevanz eher Hg²⁺ (aber Toxizität bei Inhalation von Hg₀-Dämpfen, MAK 0,1 mg/m³)

2) org.: über Nahrungsmittel, speziell Fische und Schalentiere (Höchstmenge 1 mg/kg)

chron.: Schädigungen des ZNS, Einschränkungen Hör-, Seh- und Tastfähigkeit, Überwindung Blut-Hirnschranke und Placenta (embryotoxisch)
biologische Halbwertszeit 1 a im Gehirn, (in anderen Organen ca. 70 d)

akut: Magen- u. Darmkoliken, lokalen Schleimhautverätzungen, einem dunklen Saum von HgS im Zahnfleisch (ähnlich dem Bleisaum, s. Blei), Nierenversagen

Quecksilber, Hg

Minamata-Krankheit

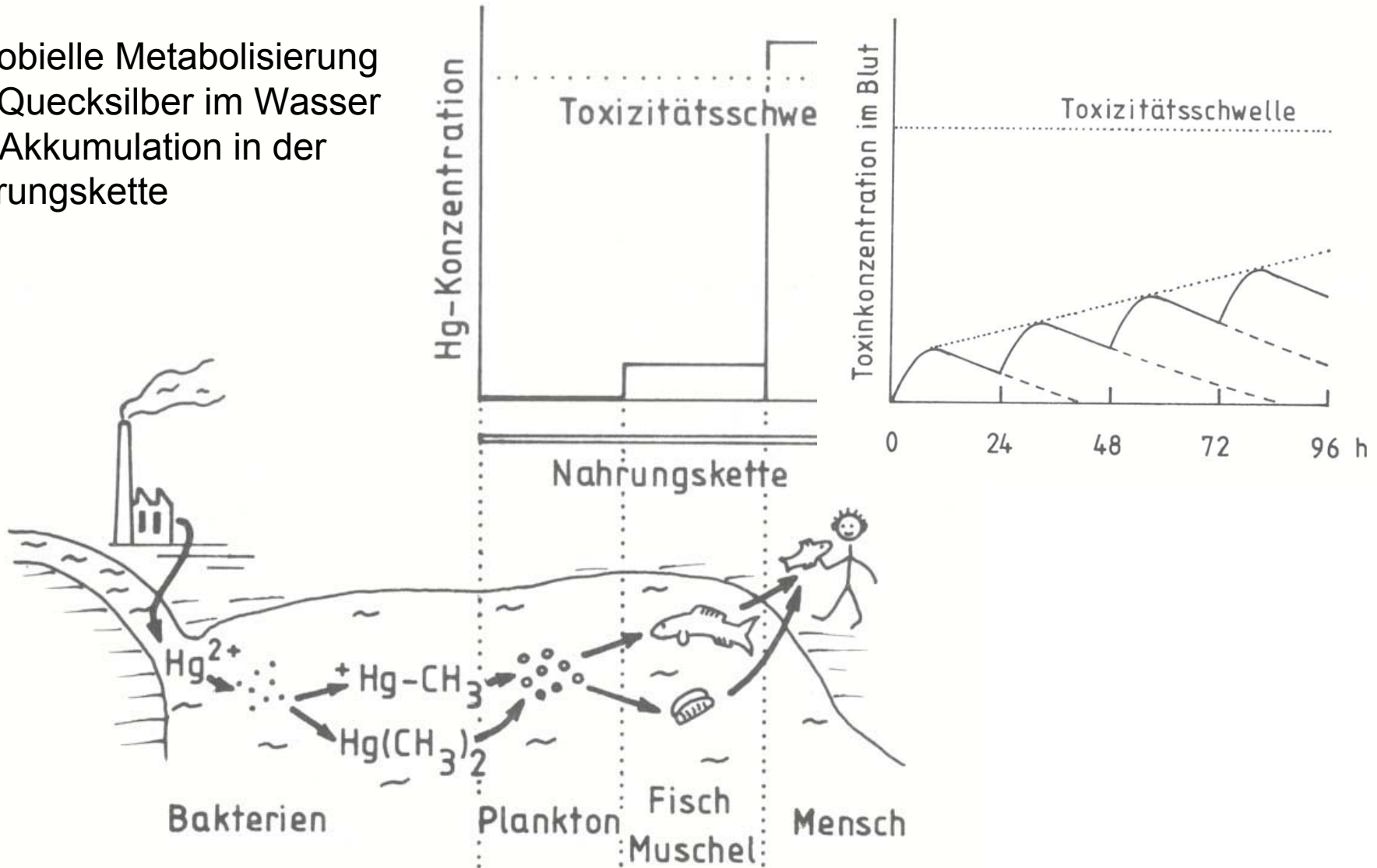
- chronische Quecksilberintoxikation aufgrund der Bioakkumulation von organisch gebundenem Quecksilber (Methyl-Hg) über die aquatische Nahrungskette
- Einleitung von ungereinigtem quecksilberhaltigen Abwasser (**Chisso AG**) in die Bucht von Minamata ab 1932 (ca. Σ 200...600 t)

$$\text{HC}\equiv\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{HgSO}_4} (\text{H}_2\text{C}=\text{CHOH})$$
- Anreicherung von Methyl-Hg, v. a. über Verzehr von Fisch und Schalentieren (rätselhafte Symptomatik und hohe Sterberaten bei Tierarten „Katzentanzkrankheit“)
- ab 1954 Auftreten erster Vergiftungserscheinungen beim Menschen
- ab 1956 epidemieähnliches Ausmaße (ca. 2000 Tote, ca.10.000 Geschädigte)
- erst 1962 eindeutige Beweisführung (Ursache-Wirkung) durch die Universität Kumamoto
- 1966 weitgehende Einstellung des Quecksilberdumpings (wirksame Abwasserbehandlung, später Produktionseinstellung)
- Dekontamination durch Abtragung von Sediment ($1,78 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, > 20 ppm), Erdauffüllung und Sedimentüberdeckung sowie Aufbau von Netzbarrieren

Quecksilber, Hg

Mikrobielle, biochemische Reaktionen (Hg-Zyklus)

Mikrobielle Metabolisierung von Quecksilber im Wasser und Akkumulation in der Nahrungskette



Quecksilber, Hg

Glied der Nahrungskette	Hg-Konz. [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	MeHg-Anteil an Ges.-Hg [%]
Sediment	300	0,02
Wasser	0,001	5
Phytoplankton	30	13
Zooplankton	56	29
Friedfische	100	70
Raubfische	300	100
Seevögel (Federn)	5.000	100
<i>Fische (Minamatabucht)</i>	<i>6.000 – 35.000</i>	<i>70 - 100</i>

Quecksilber, Hg

Elimination von Quecksilber

1) Aktivkohlefiltration

- * vor allem für Sorption von organisch gebundenem Quecksilber
bei 10.000 – 20.000 Bettvolumina Durchsatz noch 90 %ige Eliminierung
- * bei Pulverkohletechnologie – Dosierung bis zu 100 mg/L Aktivkohle notwendig

2) Flockung mit Eisen(III)-Salzen und Fällung mit Kalkhydrat

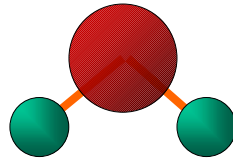
- * weniger wirksam als Aktivkohle
- * in Gewässern: Adsorption von anorganischem Hg an Trübstoffen
- * Kombination Flockung/Fällung/Filtration/A-Kohleadsorption bzw. Bodenpassage
 $\beta_0(\text{Hg}) > 1 \mu\text{g/L} \rightarrow \beta_{\text{GW}}(\text{Hg}) < 0,3 \mu\text{g/L}$

3) Ionenaustausch

- * mit kommerziell erhältlichen Chelationenaustauschern möglich
→ spezifische Entfernung in einem Schritt

Vorlesung „Wasserinhaltsstoffe“

Anmerkungen zur Klausur: Anorganischen Wasserinhaltsstoffe



Dr. Thomas Dittmar

07/2010

Themenschwerpunkte

Allgemeines

Berechnungen (1 – 2 Aufgaben)

Einteilungskriterien für **Wasserinhaltsstoffe** (Auswahl):

- nach Konzentration (*anorg. Beispiele nennen*),
- nach der Natur,
- nach dem Dispersionsgrad

Häufigkeit des **Auftretens** von Ionen in Hydrosphäre (Häufigkeit Erdkruste, Löslichkeit, Bindungsform)

Eintragspfade von anthropogenen Wasserinhaltsstoffen (Definiton, **punktueller/diffuse Quelle**)

Grenzwerte für **Wasserinhaltsstoffe** (Grundsätze der Festlegung mit Beispielen)

Eigenschaften, die aus einem Wasserinhaltsstoff einen **Schadstoff** machen

konservative Ionen (Beispiel; Verhalten; Methoden der Entfernung)

Härtebildner [Definitionen: Gesamthärte, Temporäre (Carbonat-) Härte, Permanente (Nichtcarbonat-) Härte; vor- und nachteilige Wirkung auf technische Prozesse sowie auf aquatische Ökosysteme]

Trinkwasseraufbereitung (Bsp. naturnaher Verfahren u. technischer Verfahren)

Abwasserbehandlung (Verfahrensstufen; Vor- und Nachteile zentraler u. dezentraler Konzepte)

Themenschwerpunkte

Eisen, Mangan, Aluminium [Randbedingungen für Auftreten in Hydrosphäre, Hydrolysereaktion, Trinkwasseraufbereitung (Probleme, organoleptischer Grenzwert, Entfernung) Pyritverwitterung/Acid Mine Drainage, Bodenpuffersysteme]

mikrobiologische Stoffkreisläufe (Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Kohlenstoff), Sequenz der Elektronenakzeptoren, Eutrophierung)

gelöste Gase und **Stoffhaushalt** (Henry-Gesetz, anthropogene Beeinflussung der Sauerstoffkonzentration), Bedeutung für Standgewässer (Sauerstoffhaushalt in Abhängigkeit von Zirkulation/Stagnation)

Schwermetalle – wichtigste anorganische Wasserschadstoffe (Definition, allg. Eigenschaften, essentielle, nicht essentielle, Bioakkumulation, Sediment als Senke, Remobilisierungsprozesse)

As, Pb, Cd, Hg – Mobilität, Auftreten in wässriger Lsg., Toxizität, Entfernung