

**F+E-Projekt:  
„Einsatz von Recycling-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsschlacken  
als Material für Flussdeiche“**



**Dr.-Ing. Jürgen Reichelt**

**F+E-Projekt:**  
**„Einsatz von Recycling-Baustoffen und HMV-Schlacken  
als Material für Flussdeiche“**

**Förderung:**



**Projektnehmer:**



Dr.-Ing. Jürgen Reichelt  
Dipl.-Ing. Joachim Sauter



Dr.-Ing. Harald Vogel  
Dr.-Ing. Peter Mewis  
Dipl.-Ing. Jesper Steuernagel

**Baustoff-  
lieferanten:**

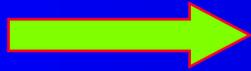
**Hermann Rauen GmbH & Co.**  
**Mannheim (MV-Schlacken)**

**Baustoffaufbereitung K&S GmbH**  
**Büttelborn (RC-Material)**

## Motivation und Ziel

### Motivation:

In der DIN 19712 „Flussdeiche“ werden als Baustoffe für den Deichbauneben natürlichen Mineralstoffen auch künstlich hergestellte Baustoffe als prinzipiell geeignet angesehen.



**Derzeit erfolgt in der Praxis kein Einsatz von RC-Baustoffen und HMV-Schlacken beim Bau von Flussdeichen!**

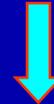
### Ziel:

**Nachweis der bautechnischen und umweltrelevanten Eignung von RC-Baustoffen und HMV-Schlacken als Material für den Bau und die Sanierung von Flussdeichen**

## Vorgehensweise

Im Bereich des Straßenbaus werden seit Jahrzehnten gütegesicherte RC-Baustoffe und HMV-Schlacken als Baumaterial eingesetzt!

Frage: **Qualitätsanforderungen an Mineralstoffe aus dem Straßenbau prinzipiell auf den Bau und die Sanierung von Flussdeichen übertragbar?**



Errichtung eines Flussdeiches im Maßstab 1 : 1 mit RC-Baustoffen und HMV-Schlacken als Stützkörper

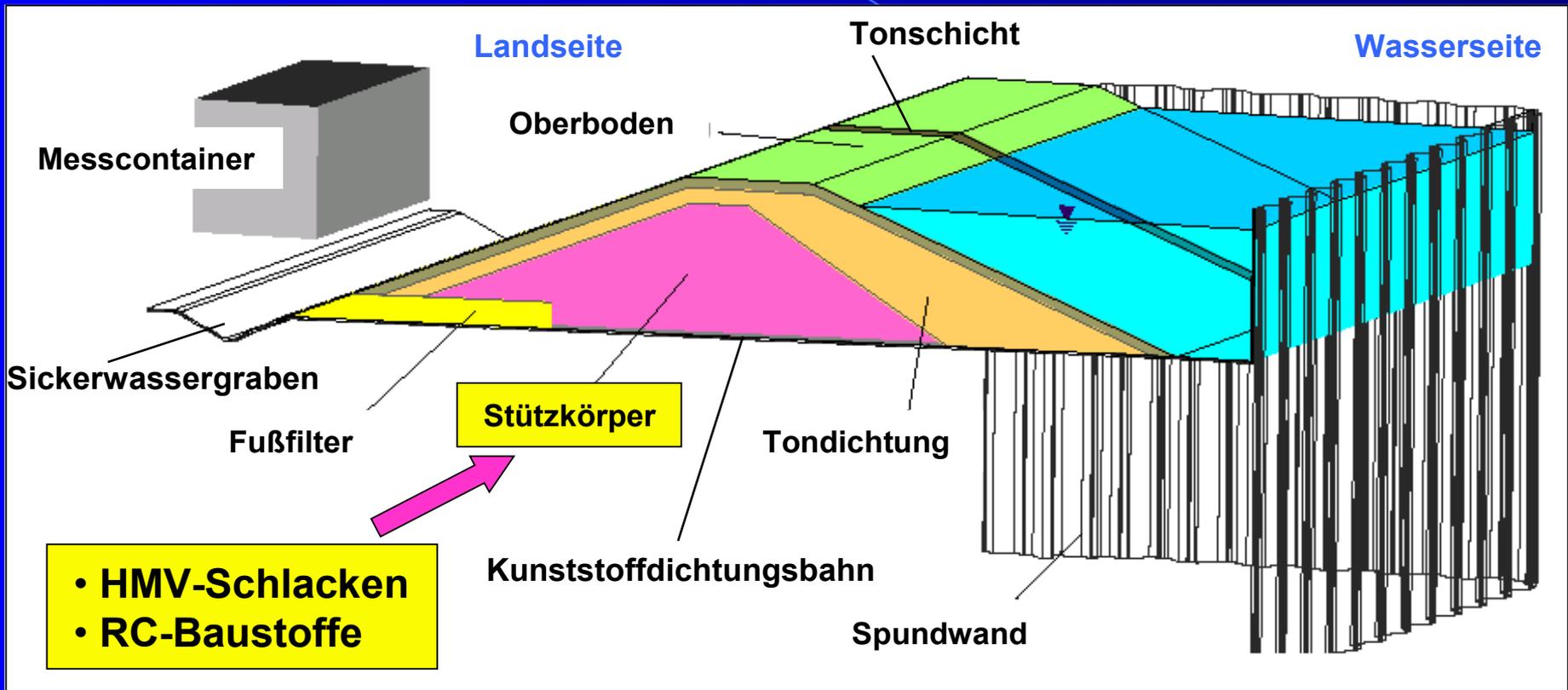
### Zweck:

- ➔ Simulation von naturähnlichen Hochwasserereignissen
- ➔ Überprüfung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften der eingesetzten Baustoffe
- ➔ Auswirkungen der Sickerwässer auf die Umwelt



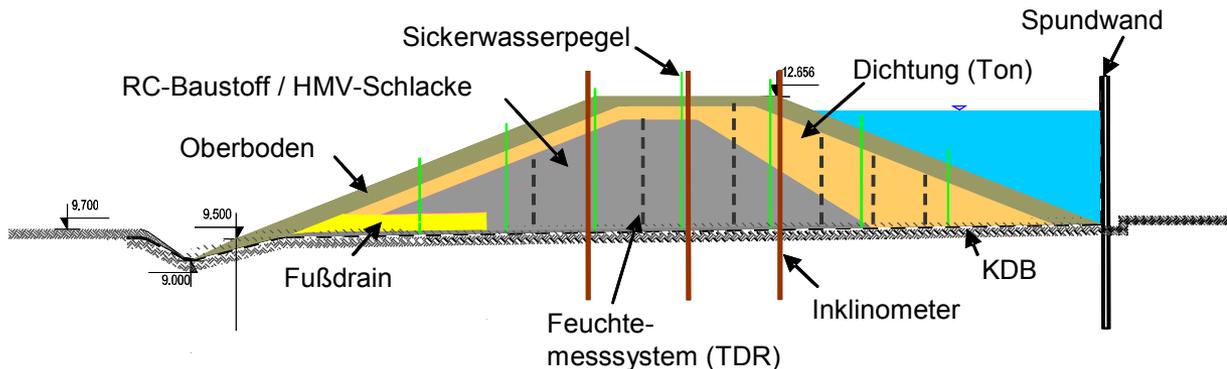
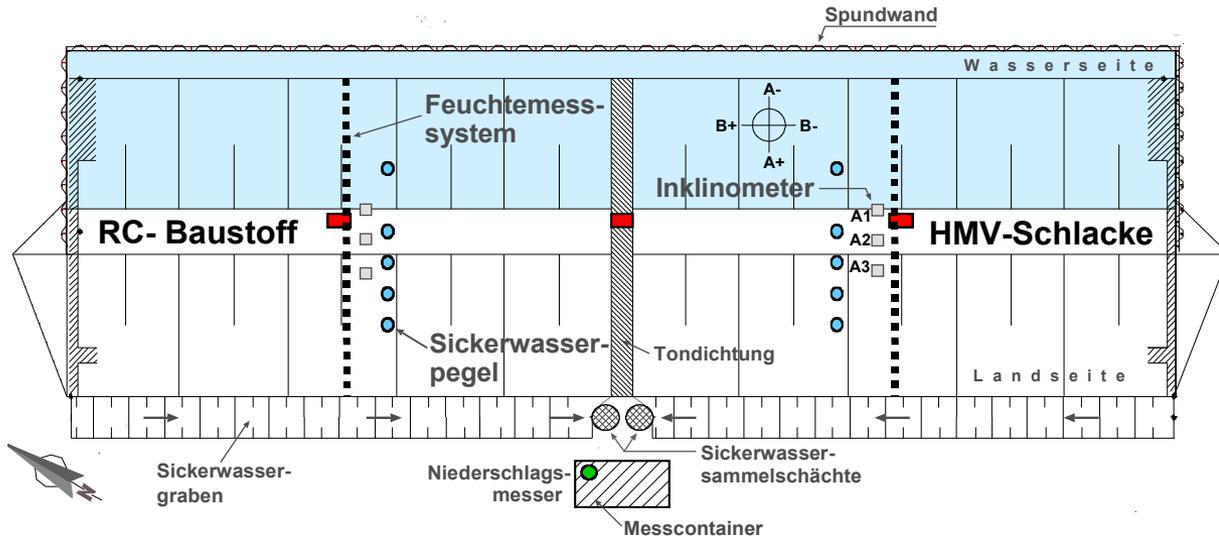
Forschungsdeich in Biebesheim

## Aufbau des Forschungsdeiches



**Bauart:** 3-Zonen-Deich entsprechend DIN 19712 „Flussdeiche“  
**Maße:** Länge: 60 m Breite: 17,5 m Höhe: 3 m  
**Standort:** Gelände der Deichmeisterei in Biebesheim/Rhein

## Messeinrichtungen im Forschungsdeich



### Durchströmungsverhalten

- Feuchtemesssystem  
(fest installiert: Sensoren)
- Wasserstandsmessung  
an 5 Sickerwasserpegel

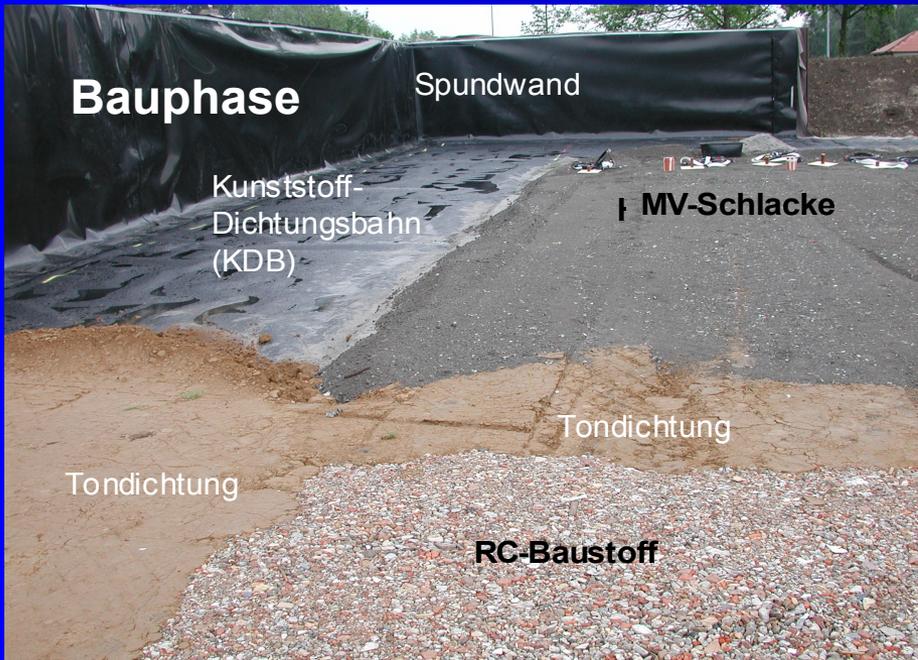
### Verformungsverhalten

- Inklinometermessungen  
(Inklinometerrohre/Sonden)

### Umweltverträglichkeit

- Einstauwasser
- Sickerwässer im Deich  
(5 Sickerwasserpegel)
- Sickerwässer aus dem  
Deich  
(2 Sickerwassersammelschächte)

## Verwendete Baustoffe und deren Funktion für den Forschungsdeich



<b>Baustoffe:</b>	RC-Baustoffe	Stützkörper
	HMV-Schlacke	Stützkörper
	Tondichtung	a) über dem Stützkörper
	KDB	b) zwischen dem RC-Baustoff / HMV-Schlacke
	Filterkies	Abdichtung des Deiches nach unten
	Mutterboden	Fußfilter (Drainage)
		Begrünung

## Verwendete Baustoffe für den Forschungsdeich: **Qualitätssicherung**

**Stützkörper:**

**vor der Lieferung:**

**vor dem Einbau:**

- Güteüberwachte Baustoffe (straßenbautechnisches Regelwerk)
- Deklarationsanalyse (Haldenbeprobung beim Produzenten vor Ort)
- Einbauanalyse (Beprobung des angelieferten Materials)



HMV-Schlacke



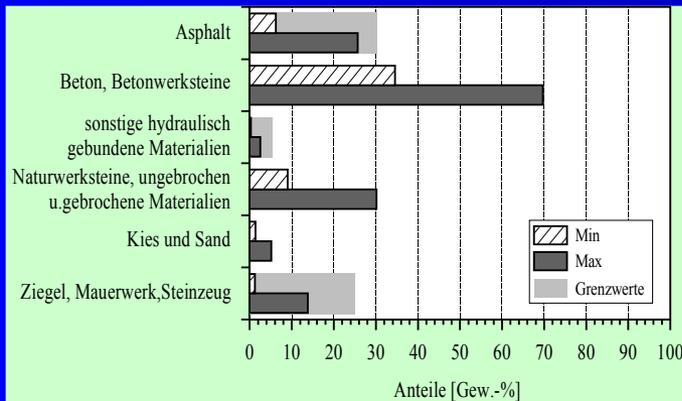
HMV-Schlackenhalde

**Nach den  
Einstauversuchen:**

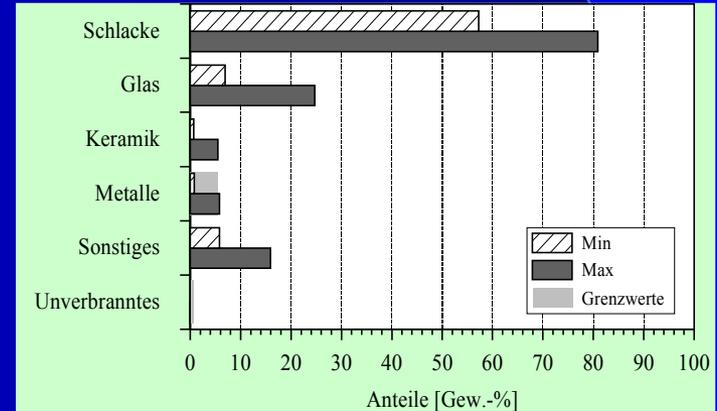
- Analyse des ausgebauten Materials

## Qualität der Baustoffe: Bautechnik – Stoffliche Bestandteile

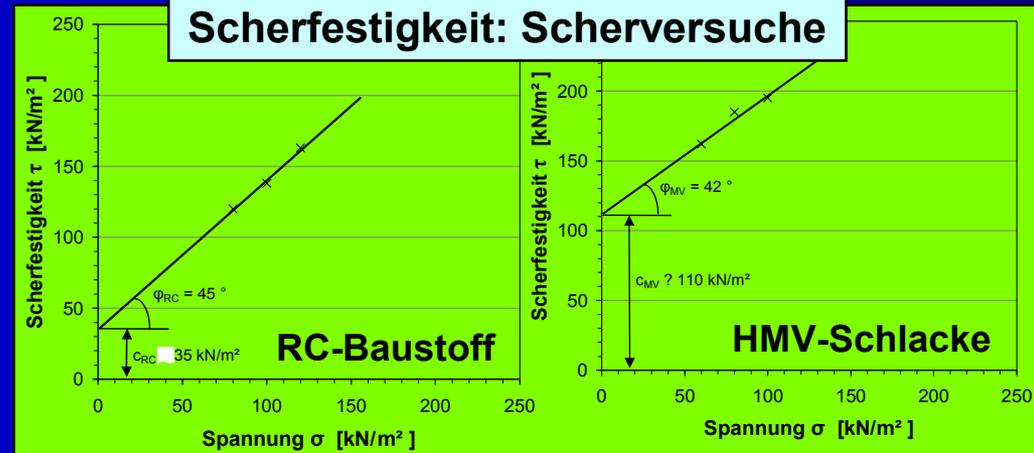
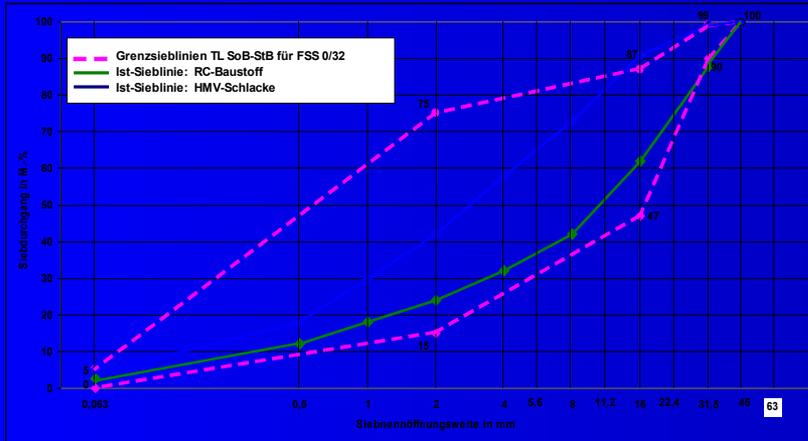
### RC-Baustoff 0/45 mm



### HMV-Schlacke 0/32 mm



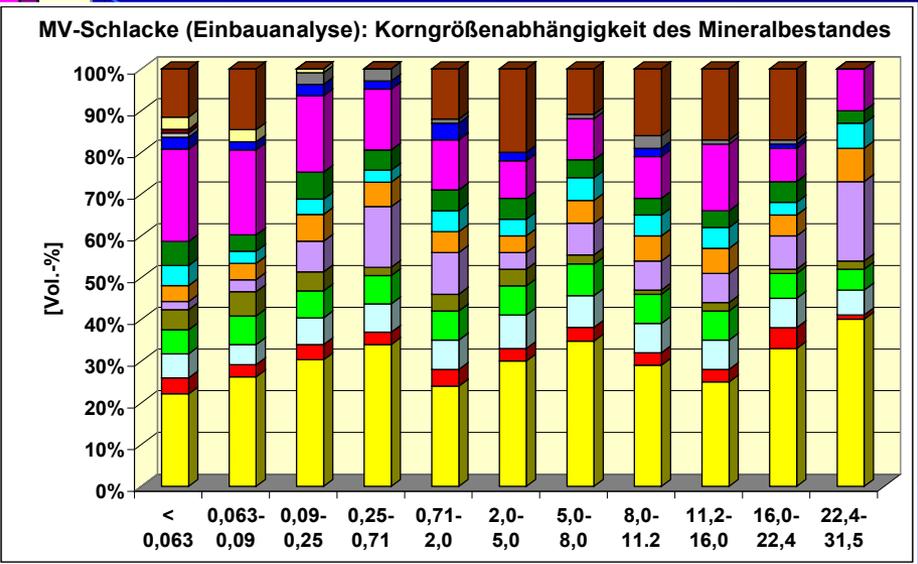
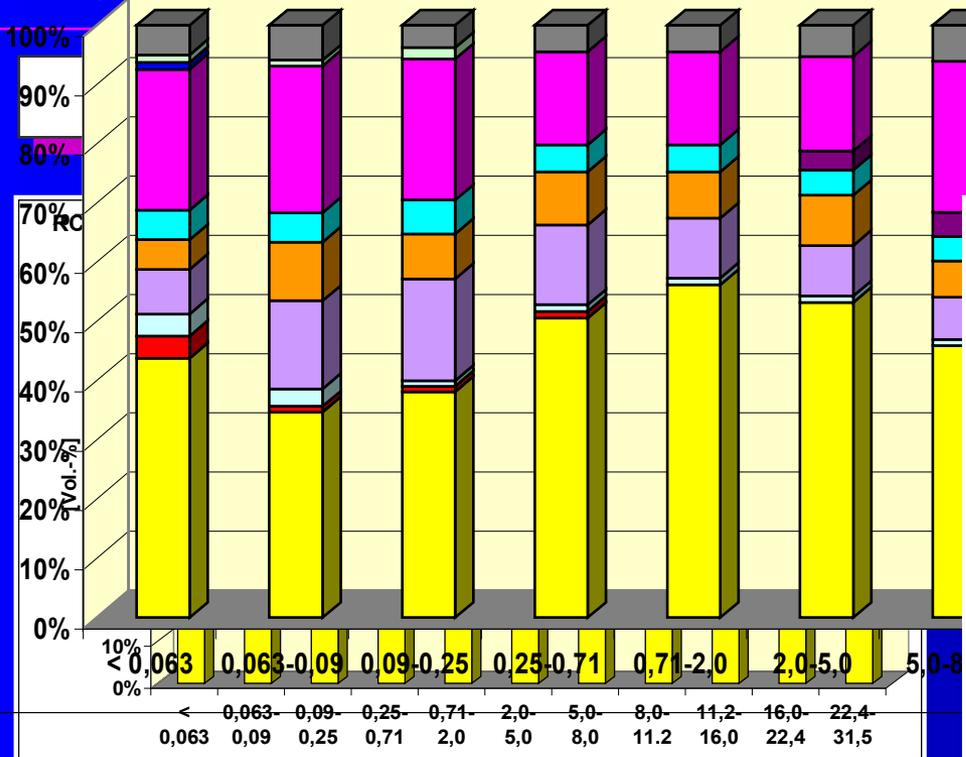
## Qualität der Ausgangsstoffe: Bautechnik



### TL Gestein-StB / TL SoB-StB

Parameter	Einheit	RC-Baustoff		HMV-Schlacke	
		Ist-Wert	TL SoB-StB	Ist-Wert	TL SoB-StB
Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,569		2,659	
Schüttdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,523		1,195	
Proctordichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,9		1,572	
optimaler Wassergehalt	[%]	9,2		20,2	
Wassergehalt	[M.-%]	4,1		9	
Widerstand gegen mechanische Beanspruchung	SZ8/12 [Gew.-%]	27,1	28	40	40
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Prüfkörnung 8/10 mm)	Abspl. < 5 mm Abspl. < 0,71 mm	5,5 1	3 (5) 2,5		
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	< 0,063			5,8	9
Anteil schlecht geformter Körner	[M.-%]	7,3	50	13,2	50

offe: Mineralogie



<b><u>Oxide:</u></b>		<b><u>Hydroxid:</u></b>	
Quarz	SiO <sub>2</sub>	Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>
Hämatit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		
<b><u>Silikate:</u></b>		<b><u>Carbonat:</u></b>	
Kalifeldspat	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Calcit	CaCO <sub>3</sub>
Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]		
Diopsid	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>		
<b><u>Tonmineral (Illit)</u></b>		<b><u>Sulfat:</u></b>	
		Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>
		<b><u>Zementphasen</u></b>	

<b><u>Oxide:</u></b>		<b><u>Phosphate:</u></b>	
Quarz	SiO <sub>2</sub>	Apatit	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)
Hämatit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		
<b><u>Silikate:</u></b>		<b><u>Hydroxide:</u></b>	
Gehlenit	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub>	Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>
Äkermanit	Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		
Kalifeldspat	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>		
Plagioklas	(Na,Ca)[(Si,Al)AlSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]		
Diopsid	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>		
<b><u>Carbonate:</u></b>		<b><u>Sulfate:</u></b>	
		Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>
		Gips	CaSO <sub>4</sub> x2H <sub>2</sub> O
		Ettringit	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> [(OH) <sub>4</sub> ISO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub> x24H <sub>2</sub> O
<b><u>neu gebildete Glasphasen</u></b>		<b><u>Salze:</u></b>	
		Halit	NaCl

## Qualität der Ausgangsstoffe: Umweltverträglichkeit

		RC-Baustoff							HMV-Schlacke				
		Deklarations-analyse	Einbau-analyse 1	Einbau-analyse 2	Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	Deklarations-analyse	Einbau-analyse 1	Einbau-analyse 2	LAGA	
DEV S4-Eluatgehalte	pH-Wert	9,8	11,1	11,3	7,0 - 12,5	7,0 - 12,5	7,0 - 12,5	7,0 - 12,5	10,2	9,8	9,9	7,0 - 13	
	el. Leitfähigkeit	μS/cm	259	1220	991	500	1500	2500	3000	1330	1210,0	1209	6000
	Sulfat	mg/l	43	74	150	50	150	300	600	210	492	380	600
	Chlorid	mg/l	10	36	11	10	20	40	150	100	107	76	250
	Cyanid	μg/l	5	10	5					0,005	0,01	0,005	0,02
	Arsen	μg/l	5	6	5	10	10	40	50	2	6	5	zu best.
	Cadmium	μg/l	0,2	3	0,2	2	2	5	5	0,2	3	1,4	5
	Chrom ges.	μg/l	5	16	18	15	30	75	100	8	10	25	200
	Kupfer	μg/l	78	10	10	50	50	150	200	99	32	54	300
	Quecksilber	μg/l	0,27	0,5	0,2	0,2	0,2	1	2	0,2	0,5	0,2	1
	Nickel	μg/l	5	10	5	40	50	100	100	10	10	5	40
	Blei	μg/l	5	10	5	20	40	100	100	10	10	5	50
	Zink	μg/l	19	10	5	100	100	300	400	14	9,7	5	300
	AOX	μg/l	49	10	20					20	10	20	
	DOC	mg/l	3	4,2	3,2					11	3,7	4	
	Phenol-Index	μg/l	43	11	13	< 10	10	50	100	29	10	130	
	PAK (EPA)	μg/l	13,6	n.n.	2,6					0,42	n.n.	0,2	
	Chrom VI	μg/l	10	10	10					10	10	10	
	Feststoffgehalte	Trockenrückstand	M.-%	99,9	n.b	100				98,1		100	
		Glühverlust	M.-%	3,27	n.b.	n.b.				4			
EOX		mg/kg	0,5	0,59	0,5				< 0,5	0,1	< 0,5	3	
TOC		M.-%	3,6	0,5	1,9				2,4	0,65	0,37	1 (3)	
PAK (EPA)		mg/kg	2,81	2,04	2,4				n.n.	n.n.	0,02		
PCB		mg/kg	0,07	n.n.	0,1				n.n.	n.n.	n.n.		
KW		mg/kg	290	206	8	100	300	500	1000	97	23	99	
Arsen		mg/kg	6	6,8	6	20				9,5	8,7	9	
Blei		mg/kg	28	44,9	21	100				1300	895	650	
Cadmium		mg/kg	0,2	0,3	0,7	0,6				4,3	6	2,3	
Chrom, ges.		mg/kg	16	28,5	25	50				110	176	87	
Kupfer		mg/kg	16	62,1	30	40				10000	3240	560	
Nickel		mg/kg	12	19,4	13	40				110	169	168	
Quecksilber	mg/kg	0,2	0,37	0,2	0,3				0,07	0,86	< 0,2		
Zink	mg/kg	69	86,5	69	120				6900	3130	2000		

**RC-Baustoff:** Anforderungen erfüllt gemäß LAGA M20 für Z1.1 /Z1.2 „RC-Baustoffe“  
**HMV-Schlacke:** Anforderungen erfüllt gemäß LAGA M20 „HMV-Schlacke“

## Versuchsdurchführung: 3 Einstauversuche

- Wasserstand: 2,50 m über der Kunststoffdichtungsbahn / 0,5 m unter Deichkrone
- Um eine komplett ausgebildete Sickerlinie im Deich zu erzielen, wurde der Wasserstand im Becken durch regelmäßiges Nachfüllen von Wasser konstant gehalten.
- Einstau erfolgte sehr schnell (2 Tage): Belastungen durch den Wasserdruck auf den Deichkörper höher als bei einem theoretischen Bemessungshochwasser
- Abstau mittels Tauchpumpe (1 Tag)



Eingestauter Versuchsdeich



Versuchsdeich nach Abstau

## 1. Einstauversuch: 7 Tage

### Extreme Belastung des Versuchsdeiches infolge mangelhafter Bauausführung:

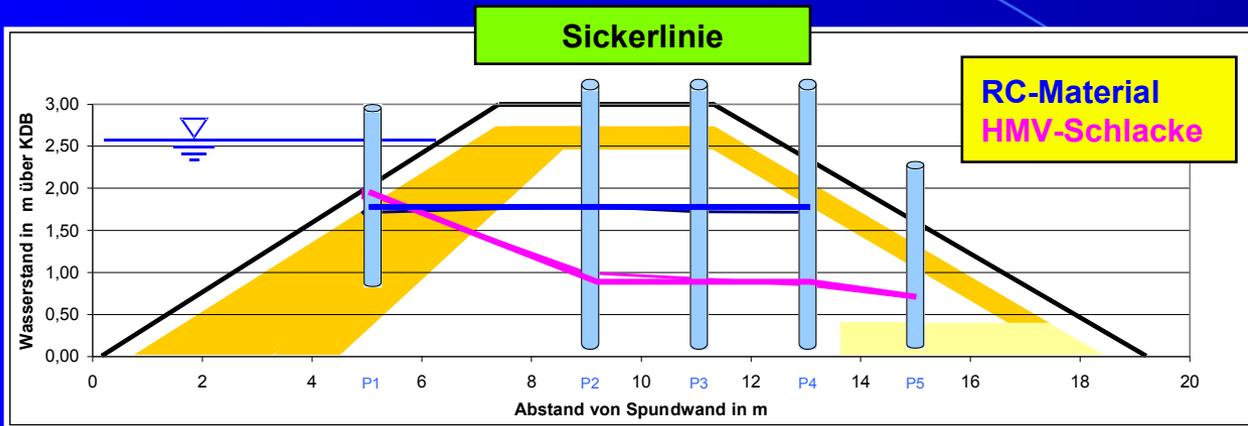
- schlechte Funktion der wasserseitigen Tondichtung infolge Fehlstellen → zu hohe Durchlässigkeit auf der Wasserseite
- Versagen des Fußfilters wegen zu hoher Feinanteile im Filterkies → zu geringe Durchlässigkeit des Fußfilters



### Resultat der Baufehler:

- Anstau des Sickerwassers im Deichkörper!
- Austritt von Wasser oberhalb des Fußfilters!
- Hohe Sickerwassermengen!  
(RC-Baustoff: 10l/min; HMV-Schlacke 3,5 l/min)!

# 1. Einstauversuch: Sickerlinien und Feuchteverteilung

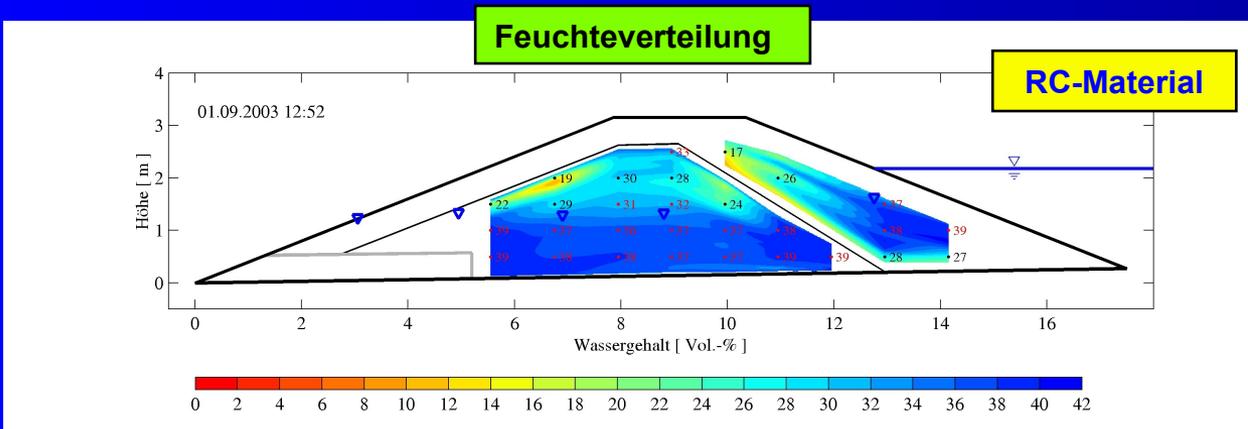


## Verlauf der Sickerlinien:

- RC-Material: horizontale SL
- HMV-Schlacke: Absenkung der SL, aber Austritt über dem Fußfilter



**Austritt von Wasser oberhalb des Fußfilters!**



## Feuchteverteilung: (RC-Baustoff)

- horizontaler Wasserstand
- wassergesättigter unterer Teil des Stützkörpers

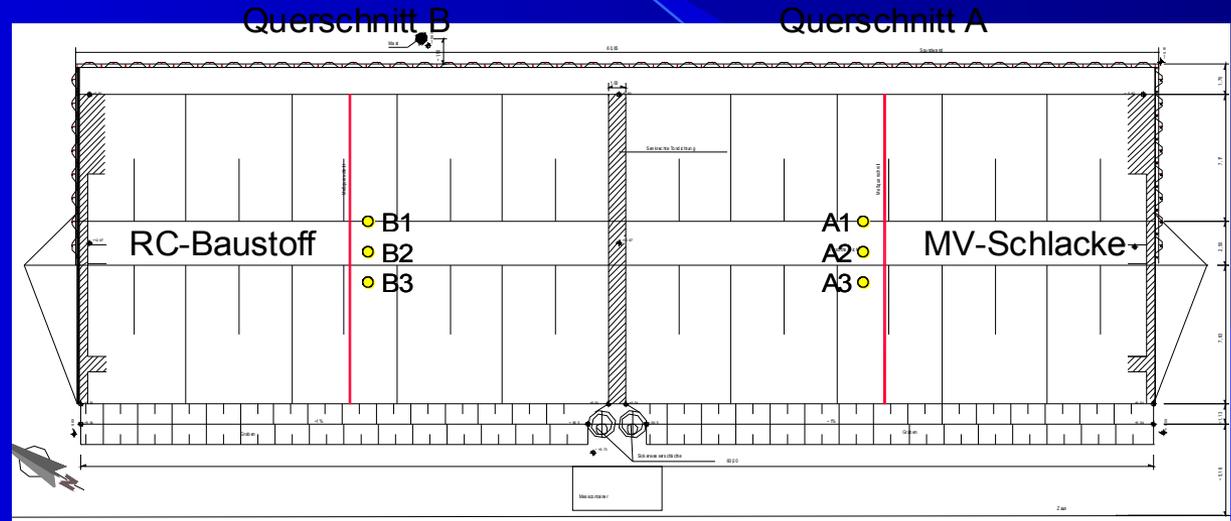
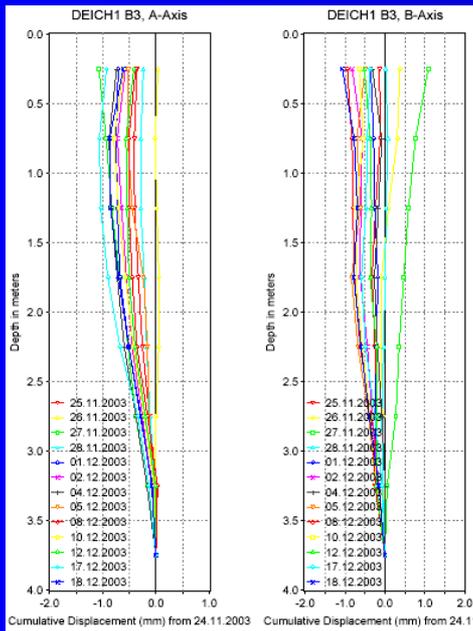
**Ergebnis:**

**Extrem ungünstiger Belastungsfall, aber visuell beobachtet:**

- ➔ Deich bleibt vollständig stabil!
- ➔ Deichböschung intakt!

# 1. Einstauversuch: Inklinometermessungen

**Inklinometermessungen:** Verformungsmessungen zur Beurteilung der Standsicherheit



Verschiebung der  
Hauptachsen

Lage der Inklinometer

**Ergebnis:**

Vernachlässigbar geringe Verformungen (< 2 mm), trotz kritische Belastung der landseitigen Böschung durch den extrem hohen Sickerwasserstand im Deichkörper!



Sehr gute Standsicherheit des Deiches

## 2. und 3. Einstauversuch:

### 2. Einstauversuch: 23 Tage (Teilsanierung der wasserseitigen Tondichtung)

- Funktion der Tondichtung in Ordnung
- Fußfilter zu geringe Durchlässigkeit → **Sickerlinie über dem Fußfilter!**

### 3. Einstauversuch: 23 Tage

- Funktion der Tondichtung und des Fußfilters in Ordnung

#### Ergebnis:

Vernachlässigbar geringe Verformungen (Gesamtverformung < 2 mm)  
Keine Erosionen feststellbar, weder an der landseitigen Böschung  
noch am wasserseitigen Böschungsfuß

#### Ursache:

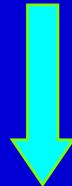
Hohe Scherfestigkeit der RC-Baustoffe und HMV-Schlacken:  
Reibungswinkel  $\varphi = 42 - 45^\circ$   
Sekundäre Verfestigungsprozesse während der Liegezeit, die  
insbesondere innerhalb der HMV-Schlacken verstärkt auftreten.

## Ergebnis der bautechnischen Untersuchungen

RC-Baustoffe und HMV-Schlacken zeichnen sich aus durch:

- hohe Scherfestigkeit und damit hohe Standsicherheit, auch bei steilen Böschungen
- hohe Sicherheit gegenüber innerer Erosion und Suffosion
- erhöhte Sicherheit gegenüber Grabgänge
- hohe Erosionssicherheit bei Überströmung ist zu erwarten

**Ergebnis:**



**„RC-Baustoffe und HMV-Schlacken eignen sich in bautechnischer Sicht  
als Material für Stützkörper in Flussdeichen“**

## Ergebnis der mineralogischen Untersuchungen

### RC-Baustoff:

Keine Änderungen des Mineralbestandes, außer:



### HMV-Schlacke:

Keine Änderungen des Mineralbestandes, außer:

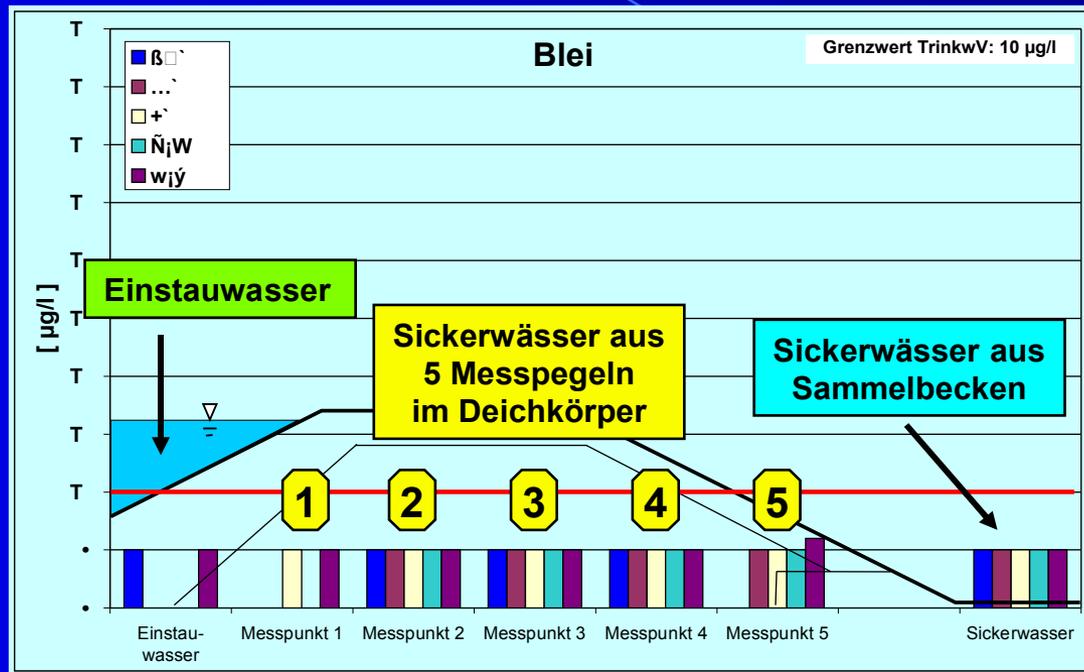


**Sulfatgehalte**

## Ergebnis der mineralogischen Untersuchungen

**Aufgrund des Mineralbestandes der ausgebauten RC-Baustoffe und HMV-Schlacken sind konstante Materialeigenschaften zu erwarten, welche die Funktionsfähigkeit des Deiches gewährleisten.**

## Ergebnis der umweltrelevanten Untersuchungen



Beispiel:  
2. Einstauversuch

1. Einstauversuch: 7 Tage
2. Einstauversuch: 23 Tage
3. Einstauversuch: 23 Tage

**Bewertung:**

**Grenzwerten der TrinkwV**

**UVP bestimmt an:**

(getrennt für RC-Baustoffe und HMV-Schlacke)

- Einstauwasser im Becken
- Sickerwasser aus 5 Messpegeln im Deichkörper
- Sickerwasser im Sickerwassersammelbecken

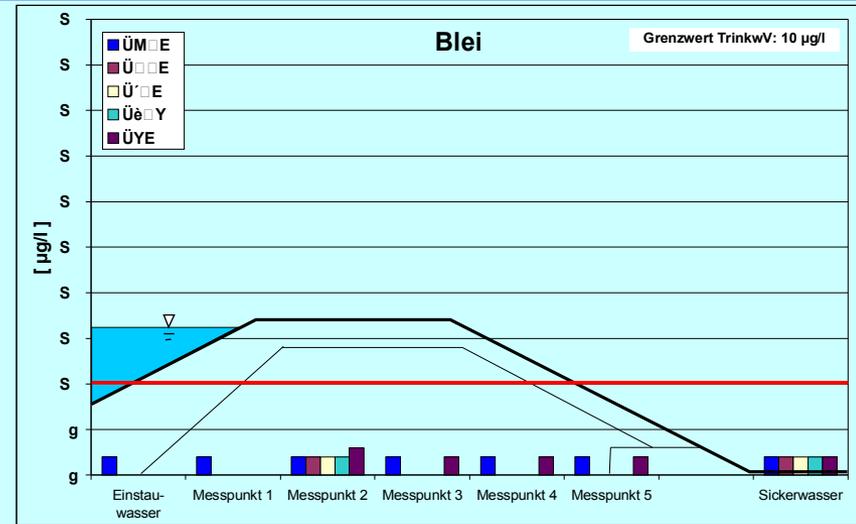
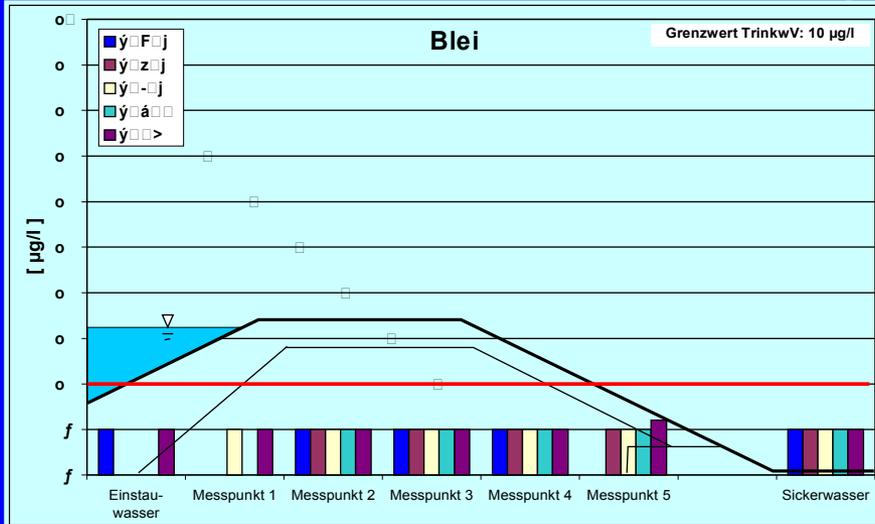
➡ bis zu 5 Einzelmessungen der Sickerwasser je Messpunkt

2. Einstauversuch

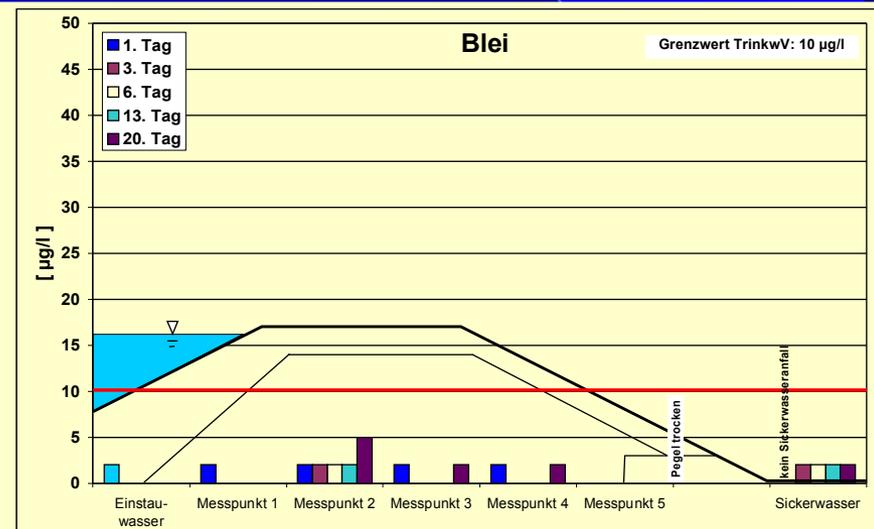
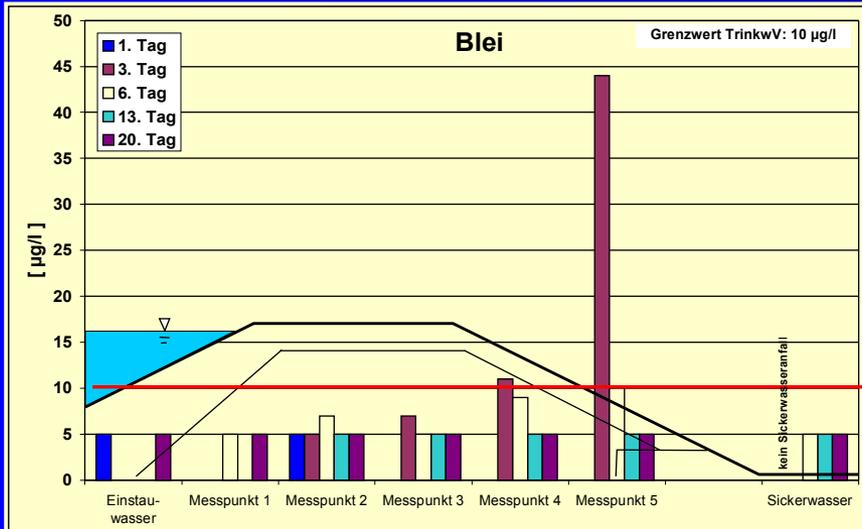
Blei

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke

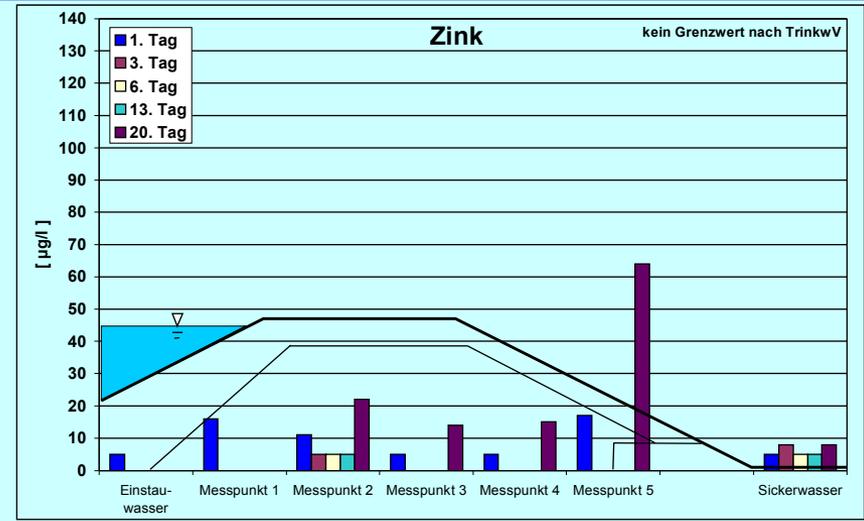
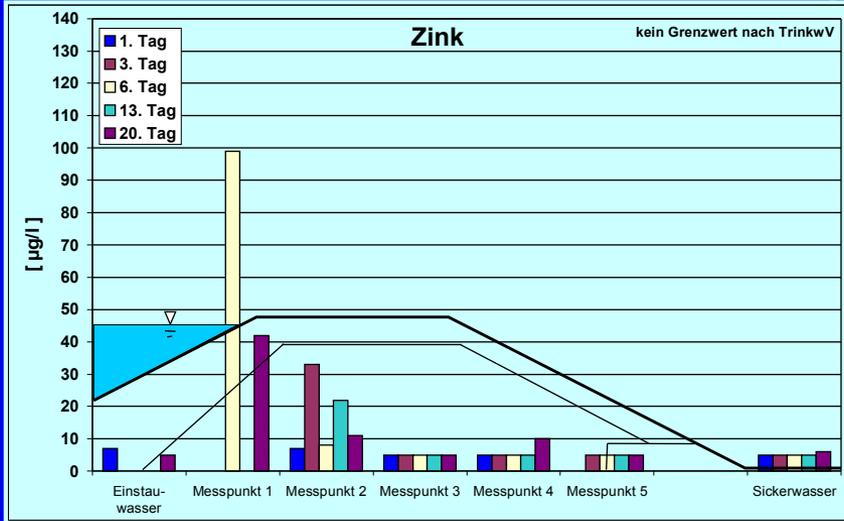


2. Einstauversuch

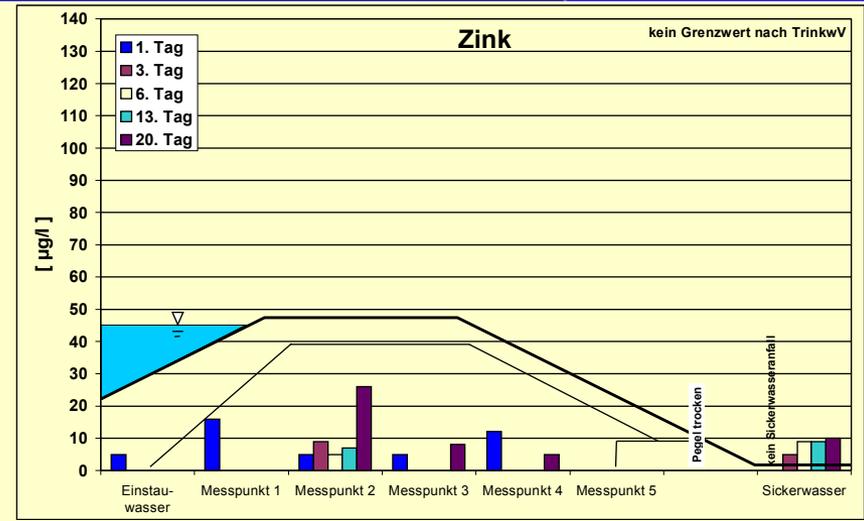
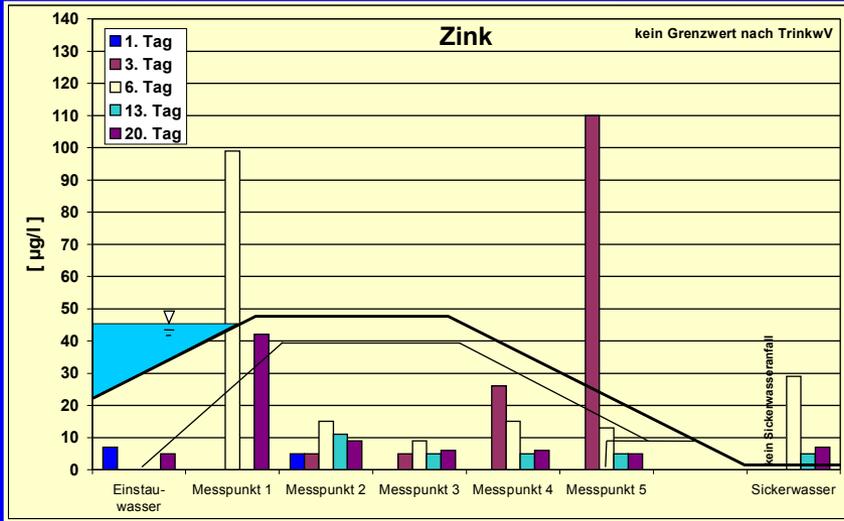
Zink

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke

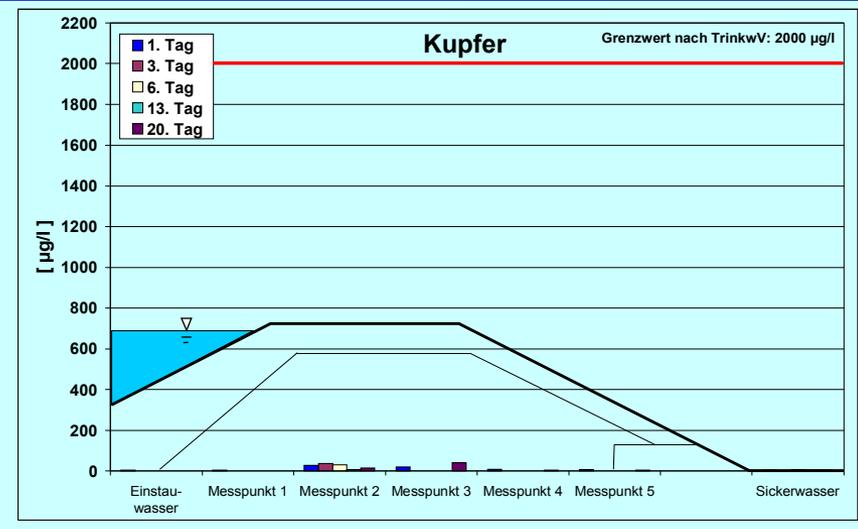
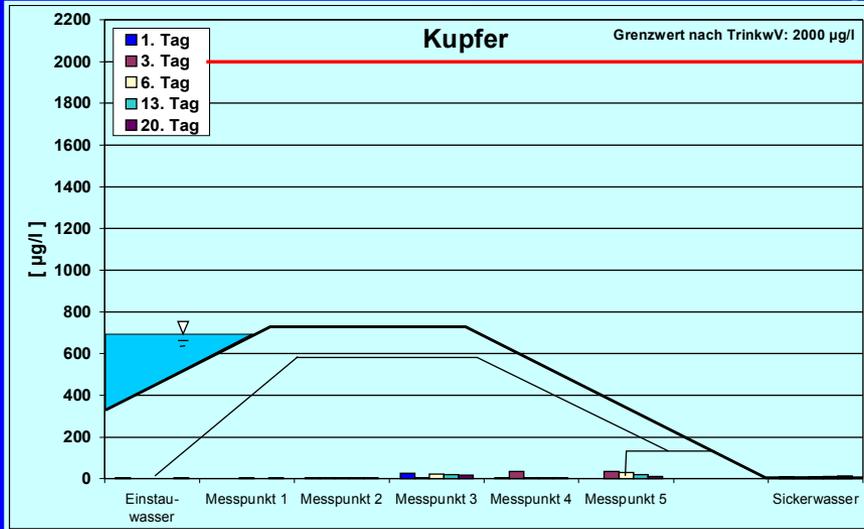


2. Einstauversuch

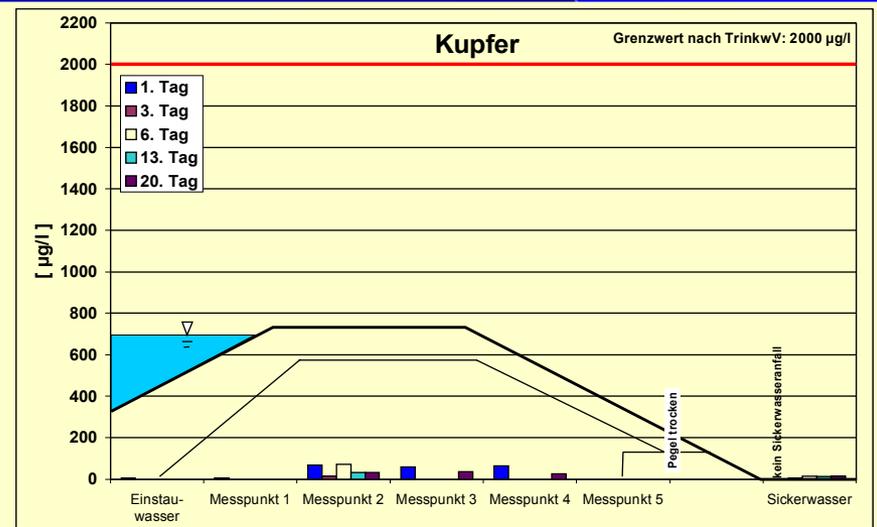
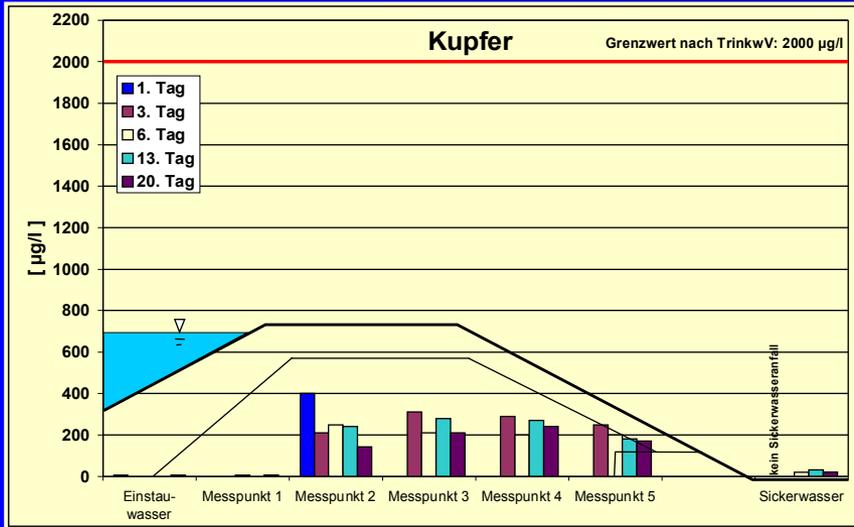
Kupfer

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke

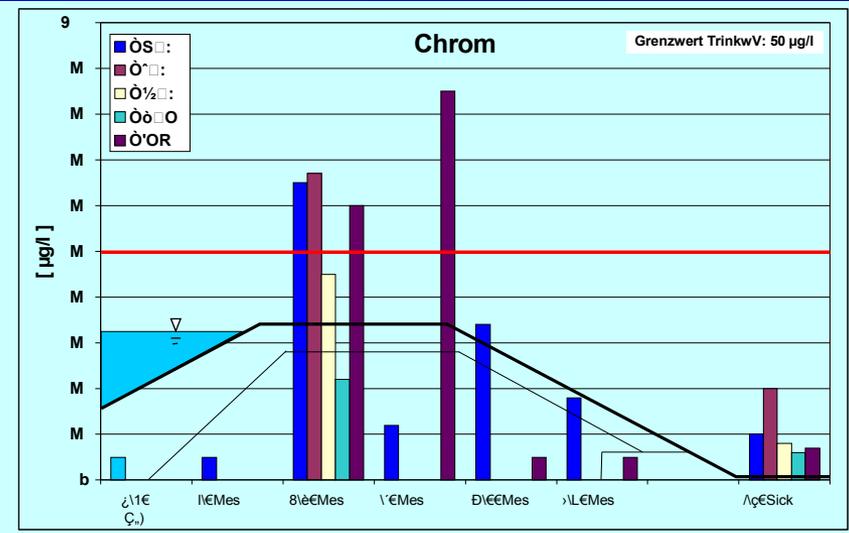
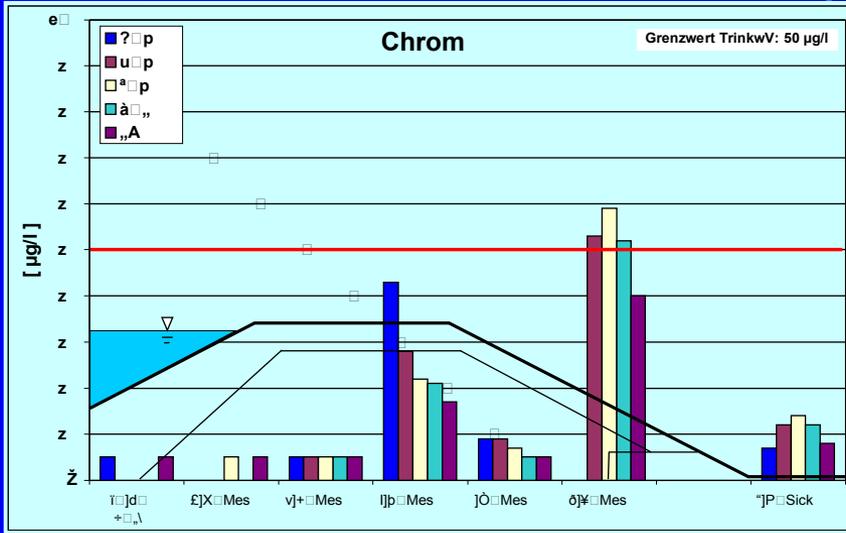


2. Einstauversuch

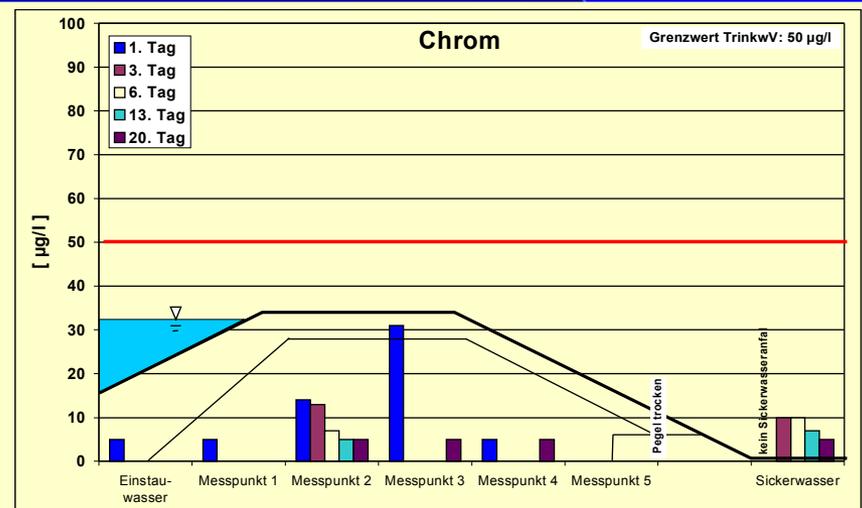
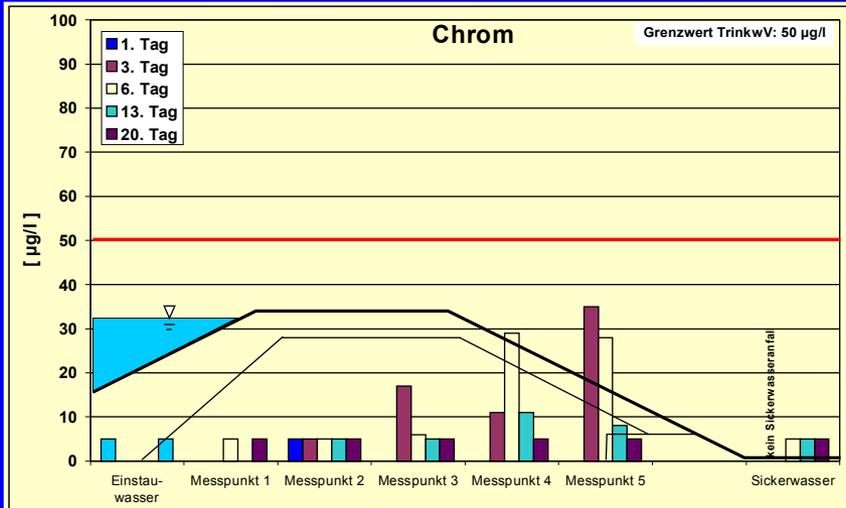
Chrom

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke

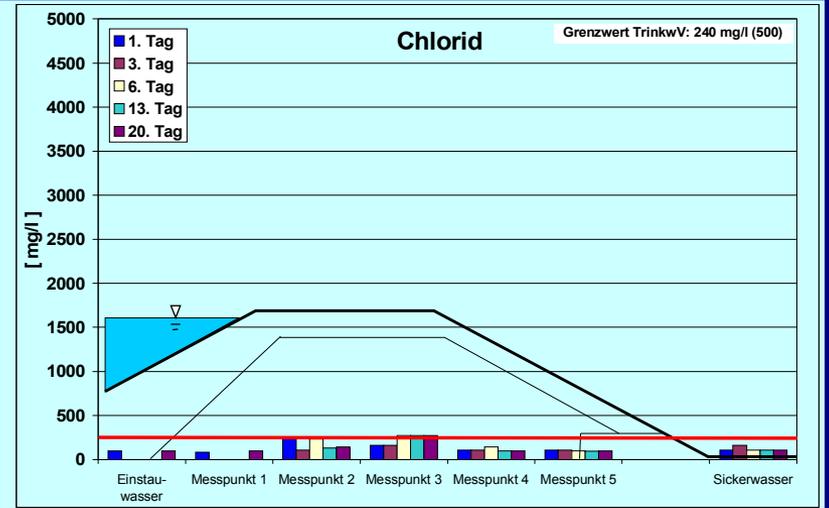
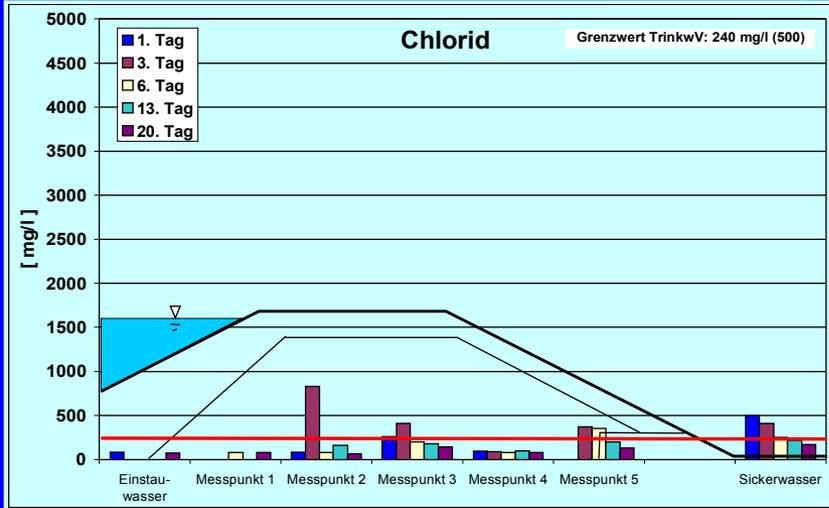


2. Einstauversuch

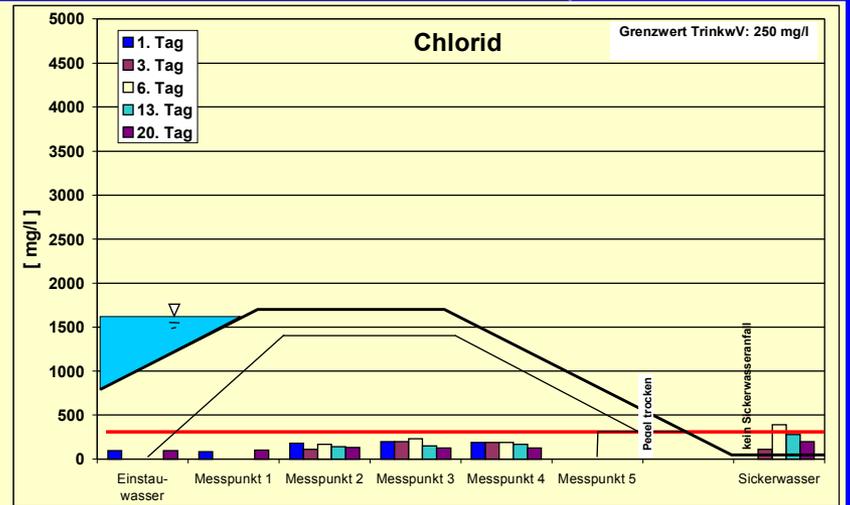
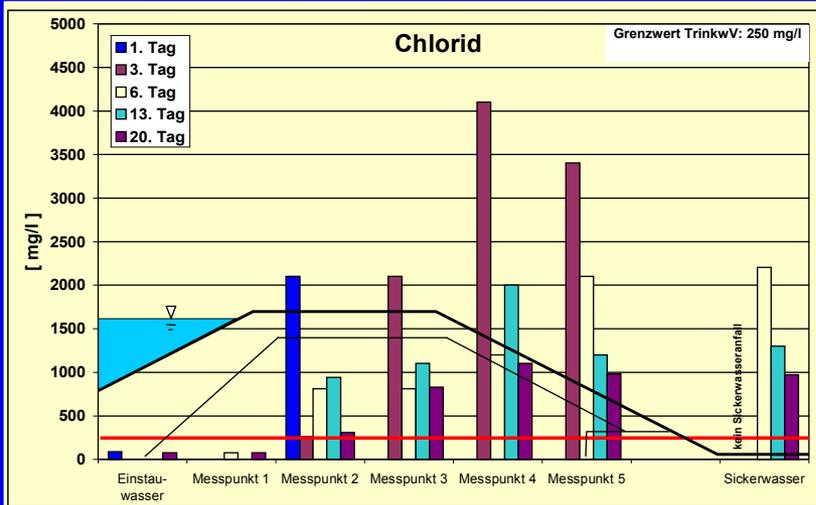
Chlorid

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke

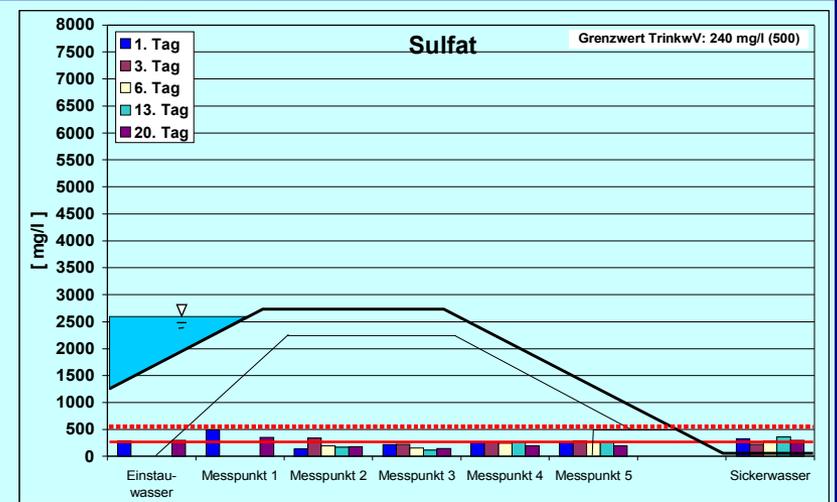
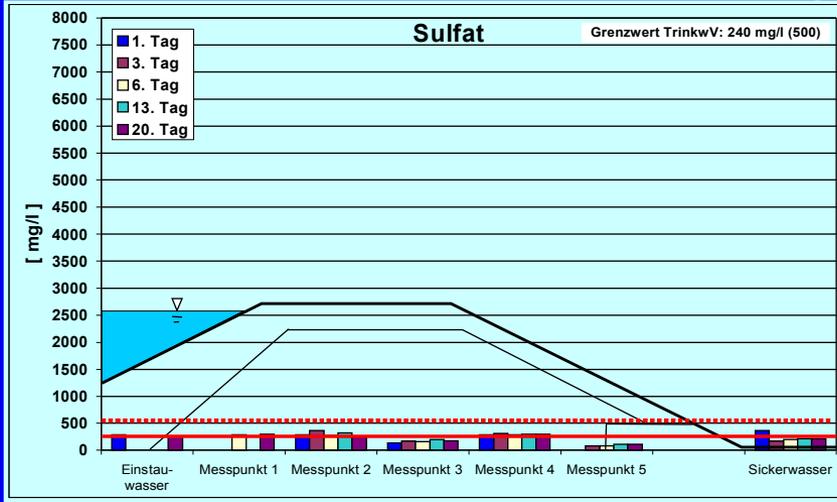


2. Einstauversuch

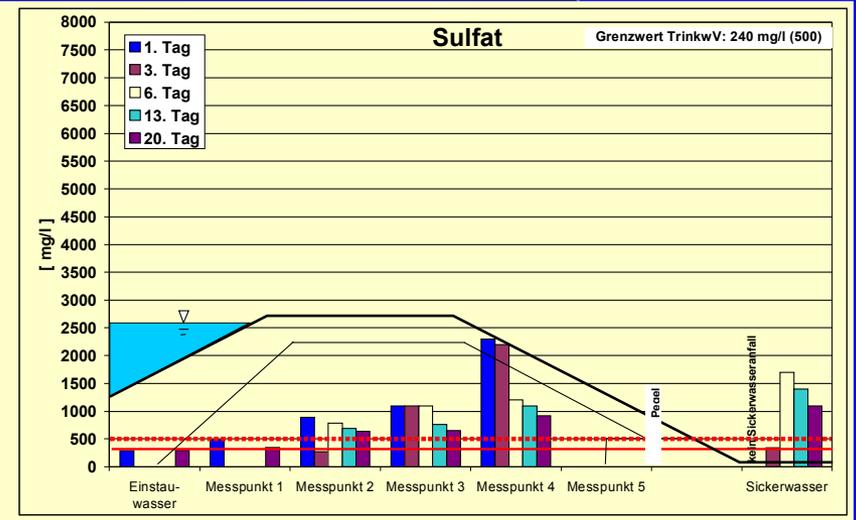
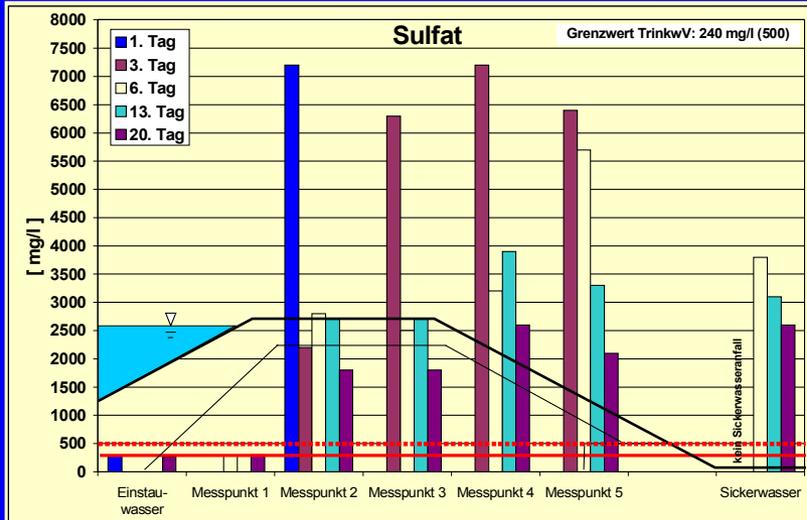
Sulfat

3. Einstauversuch

RC-Baustoff



HMV-Schlacke



## Ergebnis der umweltrelevanten Untersuchungen

**Ein Einsatz der RC-Baustoffe ist hinsichtlich der Umweltverträglichkeit unbedenklich.**

**Ein Einsatz der HMV-Schlacken ist hinsichtlich der Umweltverträglichkeit unbedenklich, unter Berücksichtigung, dass**

- sich die Chloride und Sulfate sehr schnell auswaschen und somit kein dauerhafter Austrag erfolgt,
- die Chloride und Sulfate bei der vorgeschlagener Bauweise nur zeitlich begrenzt bei langanhaltenden Hochwässern freigesetzt würden, und
- die bei Hochwässern tatsächlich freigesetzten Chloride und Sulfate in Relation zu den Stofffrachten der Vorfluter zu sehen sind, in denen der überwiegende Teil der Sickerwässer nach den Hochwässern wieder zugeführt wird.
- Die sehr guten bautechnischen Eigenschaften sowie die Schonung natürlicher Ressourcen durch die Verwendung von HMV-Schlacken anstelle von natürlichen Mineralstoffen könnte die zeitlich begrenzt auftretende erhöhte Stofffracht an Chloriden und Sulfaten wieder aufwiegen.

Ergebnis der bautechnischen, mineralogischen und umweltrelevanten Untersuchungen



„Ein Einsatz von güteüberwachten RC-Baustoffen und  
HMV-Schlacken als Material für Flussdeiche ist möglich“



Aus Vorsorgegründen sollten nur Baustoffe verwendet werden, die einer spezifischen  
Qualitätssicherung unterliegen, die im Rahmen eines Leitfadens geregelt sein könnten.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**