Aufkommen mineralischer Stoffe in der Stahlindustrie am Beispiel der AG der Dillinger Hüttenwerke

Dr.-Ing. Klaus-J. Arlt, AG der Dillinger Hüttenwerke

Zusammenfassung

Im Fachbeitrag wird die Herkunft und Menge typischer mineralischer Stoffklassen im metallurgischen Stoffffluß eines integrierten Hüttenwerkes dargestellt. Derartige Stoffklassen sind zum Beispiel verschiedene Kornfraktionen der Stahlwerksschlacken, Feuerfest-Ausbruch aus metallurgischen Gefäßen sowie verschiedene Stäube und Schlämme, welche in den unterschiedlichen Abgasreinigungsprozessen abgeschieden werden (Staubabscheidung durch Hydrozyklone, Elektrofilter bzw. Naßwäscher). Es wird abgeleitet, weshalb es für die Stahlindustrie z. Z. noch unabdingbar ist, eigene Deponien zu betreiben. Der Beitrag soll auch dazu dienen, die Diskussion zum Thema "Industrielle Deponien" auf eine breite fachliche Basis zu stellen. Am Beispiel der Ablagerung von hüttenstämmigen Reststoffen bei der AG der Dillinger Hüttenwerke (im folgenden Dillinger Hütte – DH genannt) auf einer mineralischen Monodeponie der Stahlindustrie ("Eisenhüttenmännischen Halde") wird die Ablagerungsstrategie aufgezeigt, Entwicklungsarbeiten zur Charakterisierung von Mischungen vorgestellt sowie Arbeitsthesen zur Umweltrelevanz derartiger Deponien abgeleitet.

1 Die Dillinger Hütte

Die Dillinger Hütte wurde im Jahr 1685 durch den Marquis Lenoncourt als Eisenwerk in Dillingen/Saar gegründet und bestand damals aus einer Frischhütte mit einem Luppenhammer, zwei Schnellhammer und einem Schmelzofen. Im Jahre 1809 wurde DH in eine Aktiengesellschaft umgewandelt. Sie ist damit sowohl die erste Aktiengesellschaft auf deutschem Boden als auch die älteste noch existierende Aktiengesellschaft (siehe **Abb. 1**).

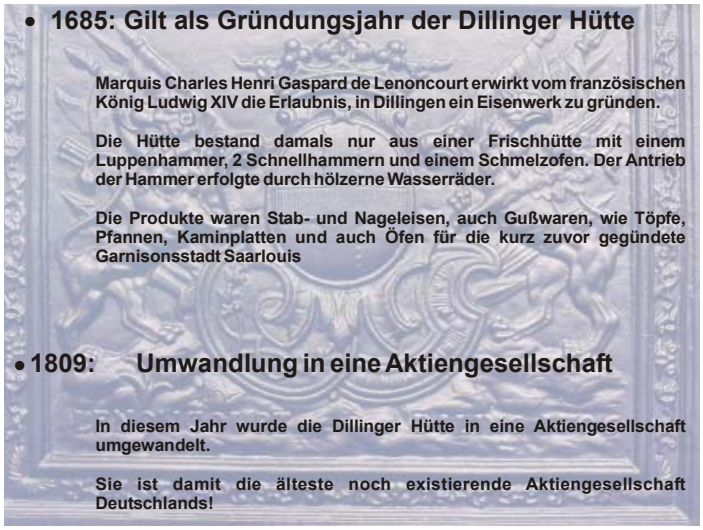

Abb. 1

Heute ist DH ein modernes integriertes Hüttenwerk mit etwa 5.300 Mitarbeitern. Am Standort Dillingen werden eine Kokerei (Zentralkokerei Saar – **ZKS**), ein Roheisenwerk Roheisengesellschaft Saar – **ROGESA**), ein Konverterstahlwerk sowie ein Grobblech-Warmwalzwerk betrieben. Als metallurgisches Finalprodukt werden in Dillingen Grobbleche der verschiedensten Stahlqualitäten in unterschiedlichsten geometrischen Abmessungen produziert (siehe **Abb. 2**). Unter einem Grobblech werden Bleche größer 6 mm Dicke bezeichnet.

aus: Melchior, S. & K. Berger, 2005 (Hrsg.) : Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 56 (ISSN: 0724-6382)

- **Die Dillinger Hütte ist heute ein integriertes Hüttenwerk:**
  - **Zentralkokerei Saar ZKS**
  - **Roheisengesellschaft Saar ROGESA** (bestehend aus Erzaufbereitungsanlage, zwei Sinteranlagen, zwei aktive Hochöfen)
  - **Konverterstahlwerk**
  - **Grobblech-Warmwalzwerk**
  - **Eisen- und Stahlgießerei**
  - **Preßwerk und Apparatebau**
- **Die Belegschaft beläuft sich gegenwärtig auf etwa 5.300 Mitarbeitern**
- **Produktion am Standort Dillingen (2003):**
  - **Koks:** **1.019 kt** (trocken)
  - **Sinter:** **4.603 kt**
  - **Roheisenbezug:** **1.850 kt** (flüssig)
  - **Rohstahlproduktion:** **2.117 kt** (flüssig)
  - **1.333 kt**

Abb. 2

6 mm Dicke bezeichnet. DH kann Grobbleche bis zu 400 mm Dicke bzw. bis zu 52 m Länge erzeugen.

Neben Koks, Sinter, Roheisen, Rohstahl und Grobblech werden am Standort Dillingen auch Kohlenwertstoffe wie Benzol, Rohteer, Schwefel sowie Koksgas, Hochofen- bzw. Gichtgas, Eisenhüttenschlacken (Hochofen-/ Stahlwerksschlacke), Konvertergas sowie Eigen- oder Besäumschrott (siehe **Abb. 3**) produziert.

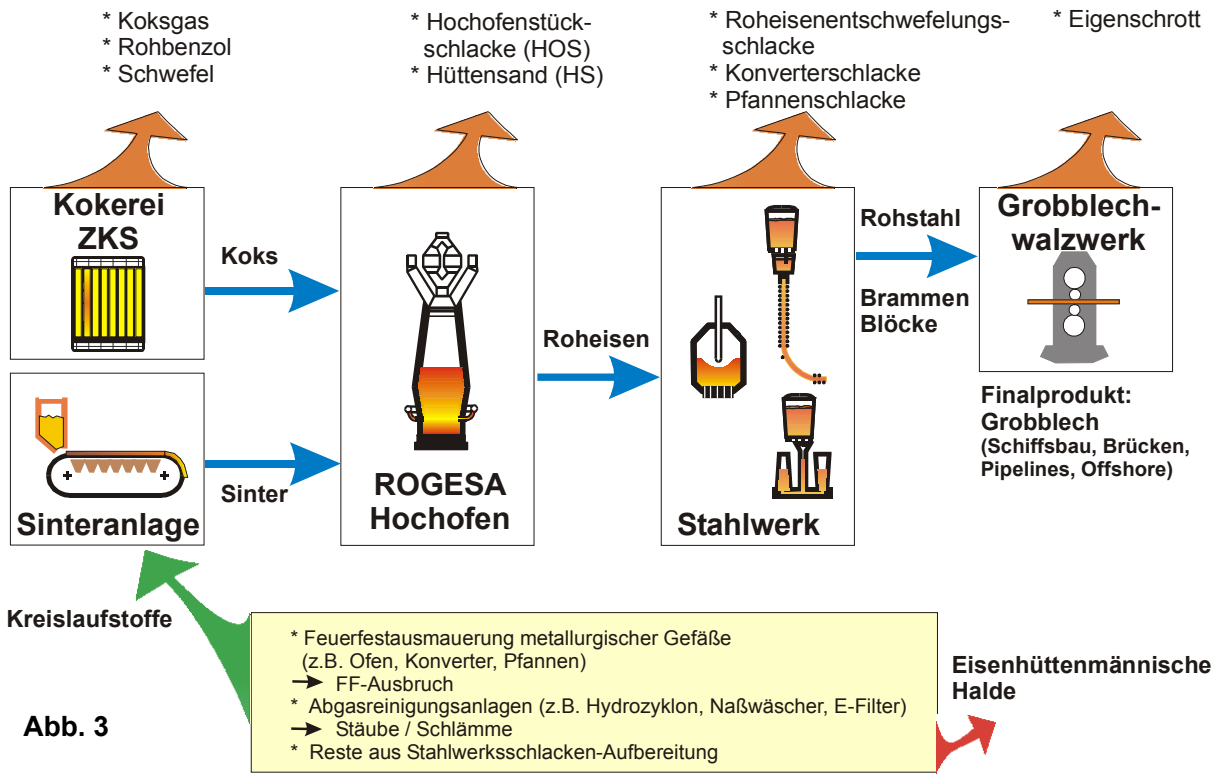

Abb. 3

2 Mineralische Stoffklassen

2.1 Eisenhüttenschlacken

Die Lage der unterschiedlichen Eisenhüttenschlacken in den jeweiligen ternären Schlackensystemen sind im **Abb. 4** wiedergegeben. Wie aus Abb. 4 ersichtlich ist, liegen sowohl die Konverterschlacke (auch als LD-Schlacke bezeichnet) im System CaO-SiO_2-FeO und die Pfannenschlacke im System CaO-Al_2O_3-SiO_2 aus metallurgischen Gründen verständlicherweise nahe der jeweiligen Kalksättigungskurve. Die Roheisen-Entschwefelungsschlacke (RE-Schlacke) liegt von ihrer Grundzusammensetzung her unter Berücksichtigung des Anteils an metallischem Fe (bedingt durch Fe-Granalien bzw. direkt abgeschlacktem Fe bis zu 70 % Fe_{met} möglich) in der Nähe der Lage der Hochofenschlacke.

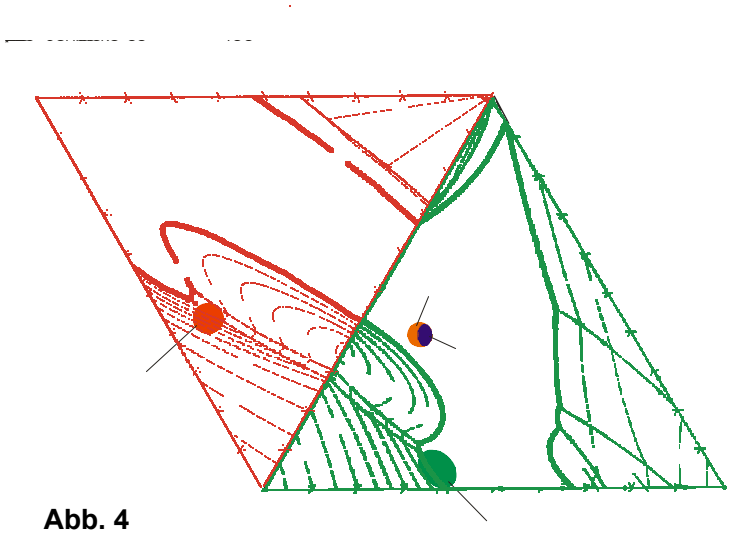

Abb. 4

Eine typische chemische Analyse der verschiedenen Eisenhüttenschlacken ist in **Tab. 1** wiedergegeben.

	CaO	SiO2	Fe	Mn	P2O5	S	Al2O3	MgO	TiO2	K2O
	%	%	%	%		%	%	%	%	%
HO-Schlacke	40,25	38,21	0,29	0,29		1,15	11,07	7,82	0,48	0,55
LD-Schlacke	45,27	10,75	20,02	2,89	1,35		2,47	2,60	0,52	0,03
Pfannenschlacke	56,75	6,15	0,77	0,26	0,02	1,07	29,2	4,52	0,32	

Tab.1

Die am Standort Dillingen erzeugten Eisenhüttenschlacken ***(siehe Abb. 5)*** werden weitestgehend als Produkte vermarktet. So wird die bei der Roheisengesellschaft Saar (ROGESA) erzeugte Menge an Hochofenschlacke entweder als güteüberwachte Hochofenstückschlacke für den Straßen-und Wegebau oder als Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) für die Produktion von Hochofenzement vollständig mit positivem Marktwert verkauft. Die bei ROGESA erzeugte Gesamtmenge an Hochofenschlacke beträgt jährlich etwa 1,1 Mio. t.

Die Stahlwerksschlacken werden kampagnenweise nach Art der Stahlwerksschlacke in einer Separationsanlage ***(siehe Abb. 6)*** aufbereitet (d.h. getrennter Durchsatz z. B. der LD-Konverterschlacke, Pfannenschlacke und RE-Entschwefelungsschlacke; Brechen – Magnetabscheidung – Absiebung). Nach Durchlaufen der Separationsanlage werden hüttenintern die eisenhaltigen und kalk- bzw. kieselsäurehaltigen Kreislaufstoffe zur Substitution teurer Rohstoffe (u. a. Eisenerze, Branntkalk, Sand) im me-

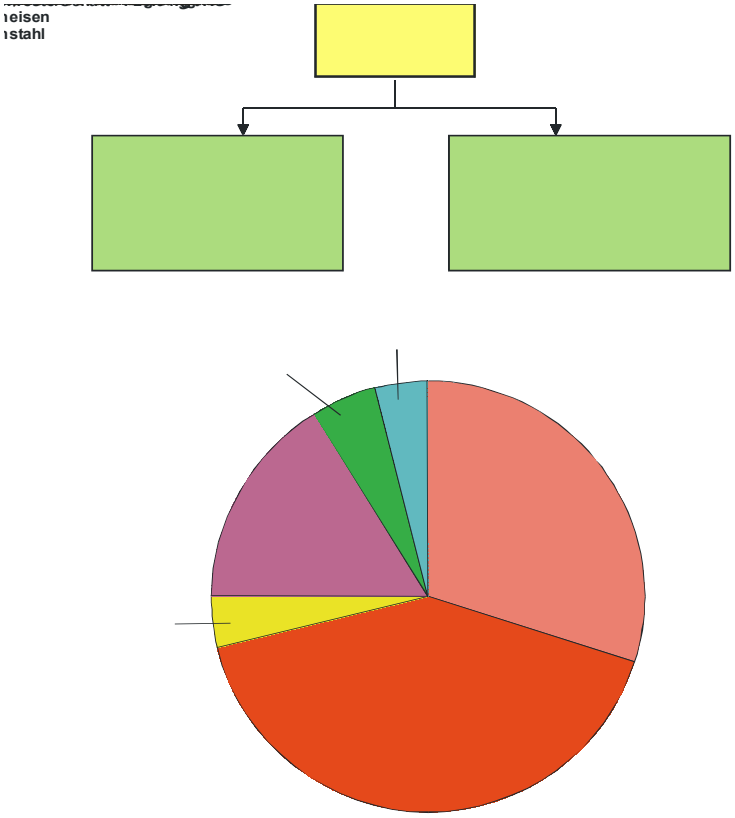

Abb. 5

tallurgischen Produktionszyklus wie im Sinter-, Hochofen- oder Konverter-prozeß eingesetzt. Ein großer Teil der separierten LD-Konverterschlacke wird bei DH unmittelbar als Kalkträger in der Sinteranlage eingesetzt (etwa 130.000 t/a). Die zusätzlich abgesiebte Fraktion kleiner 3 mm der LD-Konverterschlacke entspricht den Anforderungen des deutschen Düngemittelgesetzes und wird als Kalkträger kommerziell mit dem Produktnamen “Konverterkalk feucht/ körnig” vertrieben (etwa 30.000 bis 40.000 t/a). Die Situation zur Nutzung der LD-Schlacke ist im ***Abb. 7*** wiedergegeben.

Ein erheblicher Teil der sogenannten „selbstzerfallenden“ Stahlwerksschlacke aus der Pfannen- bzw. Sekundärmetallurgie wird auf der betriebseigenen Halde als mineralischer Deponiebaustoff für den verdichteten Einbau und zur Konditionierung (siehe auch Pkt. 3.2) der abzulagernden Stäube und Schlämme/entwässert aus den verschiedenen Gasreinigungsstufen eingesetzt.

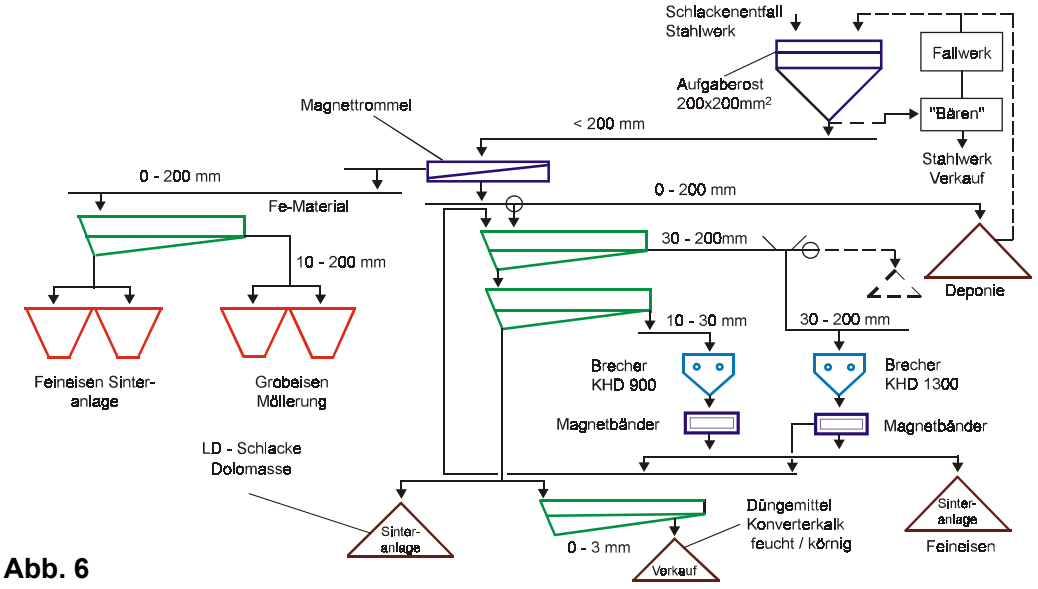

Abb. 6

2.2 Feuerfest-Ausbruch

Eine andere typische Stoffgruppe für hüttenstämmige Reststoffe ist der Feuerfest-Ausbruch. Im **Abb. 8** sind schematisch einige wesentliche, in den unterschiedlichen metallurgischen Gefäßen angewendete Feuerfestwerkstoffe sowie deren Mengen dar-

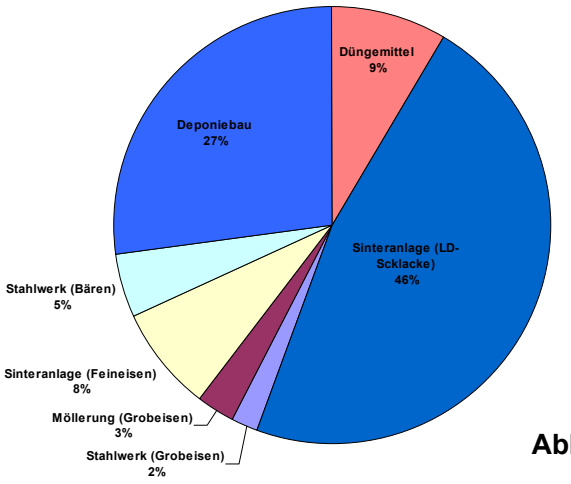

Abb. 7

gestellt. Zur Verdeutlichung der grundlegenden chemischen Zusammensetzung der in den Metallurgischen Gefäßen eingesetzten unterschiedlichen Feuerfestmaterialien ist ihre Lage in den jeweiligen quasiternären Dreistoffsystemen CaO'-Al_2O_3'-MgO' und CaO'-Al_2O_3'-SiO_2' im **Abb. 9** dargestellt.

Nach Beendigung der Lebensdauer z.B. einer feuerfesten Verschleißfutterausmauerung des Konverters (Feuerfeststeine aus Magnesit) oder bei den Stahlpfannen (Feuerfeststeine aus Dolomit) werden die noch verbleibende Teile

Abb. 8

der feuerfesten Werkstoffe mechanisch ausgebrochen. Dieser Feuerfest-Ausbruch wird anschließend nach Werkstoff und Größe selektiert und entweder an die Feuerfestindustrie verkauft oder im eigenen metallurgischen Produktionsprozeß als

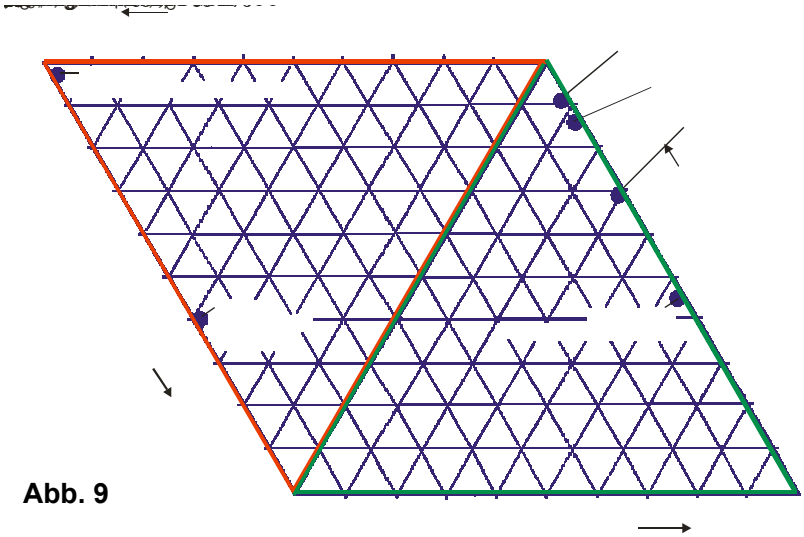

Abb. 9

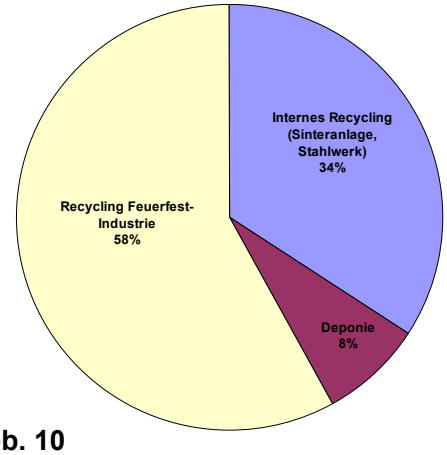

Abb. 10

Kalkträger (z. B. als sogenannter Dolokalk) in der Sinteranlage wieder eingesetzt. So werden etwa 92% des bei DH gewonnenen Feuerfestausbruchs unmittelbar wieder eingesetzt ***(siehe Abb. 10)***.

Die noch verbleibende Menge von etwa 8% besteht hauptsächlich aus hochtonerdehaltigen Feuerfestmaterialien. Für diese werden z. Z. bei DH neue Einsatz-/ Wiederverwertungsmöglichkeiten untersucht. So wird gegenwärtig bereits eine Teilmenge als feuerfeste Spritzmasse für die Auskleidung der Pfannendeckel erfolgreich in der Produktion eingesetzt.

2.3 Stäube und Schlämme

Bei DH werden große Anstrengungen unternommen, für die im gesamten metallurgischen Produktionszyklus produzierte hüttenstämmigen Nebenprodukte im Sinne einer Kreislaufwirtschaft nach Recyclingmöglichkeiten sowohl direkt im eigenem metallurgischen Produktionszyklus als auch nach weiteren volkswirtschaftlich sinnvollen Wiederverwertungsmöglichkeiten in anderen Industriezweigen zu suchen. Das gilt insbesondere für die verschiedenen Stäube und Schlämme, welche in den unterschiedlichen Abgasreinigungsprozessen aufgefangen werden (Staubabscheidung durch Hydrozyklone, Elektrofilter bzw. Naßwäscher). Diese Stäube weisen in der Regel u. a. hohe Gehalte an Eisenoxid sowie Kalk auf, so daß sie zum großen Teil als interne Kreislaufstoffe unmittelbar im metallurgischen Produktionszyklus als Eisen- bzw. Kalkträger wieder eingesetzt werden können. So werden z. B. die im Stahlwerks- und Sinteranlagenbereich abgeschiedenen Stäube weitestgehend über die Sinteranlage recycliert. Ebenso werden die aus dem Hochofenbereich erfaßten Stäube zu etwa 2/3 ihrer Gesamtmenge wieder eingesetzt ***(siehe Abb. 11)***.

Werk	Gesamt Anfall Staub / Schlamm 2003		Recycling Staub / Schlamm 2003		Deponie	
	t/a	%	t/a	Quote %	t/a	%
Sinteranlage	54.891	38	54.000	98	891	2
Hochofen	51.354	36	32.000	62	19.354	38
Stahlwerk	37.765	26	36.000	95	1.765	5
Gesamt	**144.010**	100	**122.000**		**22.010**	

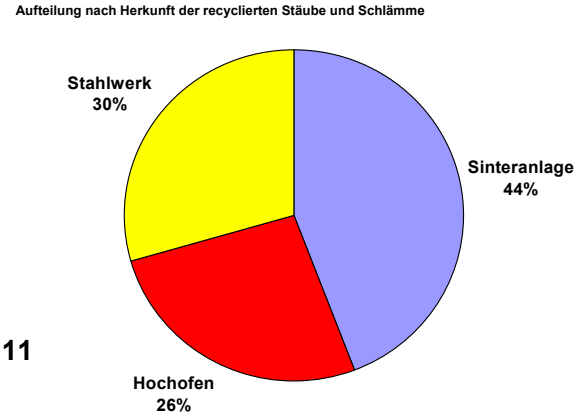

Abb. 11

3 Eisenhüttenmännische Halde DH

Trotz aller Bemühungen zur Erhöhung des Recyclinggrads am Standort Dillingen und erreichtem hohem Stand der Kreislaufwirtschaft ist es für die Sicherung der Produktion unabdingbar, eine umweltschonende und betriebswirtschaftlich vertretbare Ablagerung von hüttenstämmigen Reststoffen vornehmen zu können.

Die betriebseigene Halde der Dillinger Hütte ist etwa 100 Jahre alt. In dieser Zeit wurden dort die zuvor beschriebenen nicht mehr verwertbaren Hüttenreststoffe aus den Produktionszyklen zwischen- oder abgelagert. So kamen zu Beginn des 20. Jahrhun-

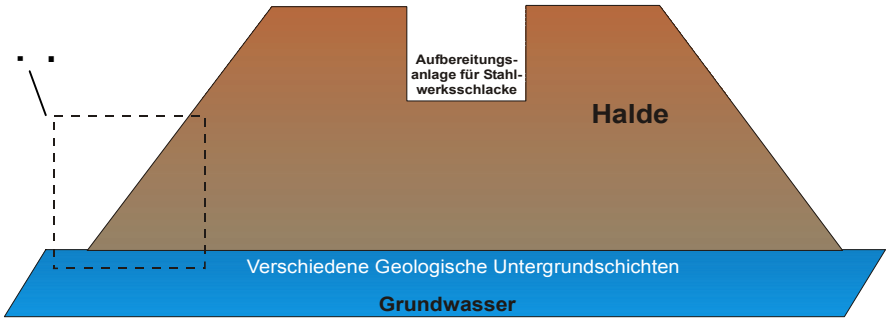

Abb. 12

derts z. B. Schlacken zur Ablagerung, welche heute nach Vorliegen entsprechender wissenschaftlich-technischer Kenntnisse wieder aufbereitet und zu den o. g. Straßenbaustoffen, Baustoffen und Düngemitteln weiterverarbeitet werden. Dadurch hat sich die Ausdehnung des Haldengeländes in den letzten Jahrzehnten nahezu halbiert.

Auf der Halde selbst ist heute die Aufbereitungsanlage für Stahlwerksschlacke in Betrieb. Durch das ständige Zwischenlagern und Aufnehmen verändert dieser Bereich immer wieder sein Aussehen. Die Halde der Dillinger Hütte stellt quasi eine „Lebende Halde“ dar. Für das Weiterbestehen der Produktion am Standort der Dillinger Hütte ist es jedoch vor allem aus wirtschaftlichen Gründen notwendig, daß u. a. typische eisenhüttenmännische Reststoffe auch in Zukunft abgelagert werden können. In den metallurgischen Produktionszyklus z. Z. nicht integrierbare Reststoffe sind z. B. basische Reststoffe aus der Schlackenaufbereitung sowie Stäube und Schlämme aus den Gasreinigungsprozessen (z. B. Feinstfraktionen der E-Filter/Sinteranlage oder Gichtschlamm aus der Naßreinigungsstufe des Gichtgases).

3.1 Haldenbewirtschaftung

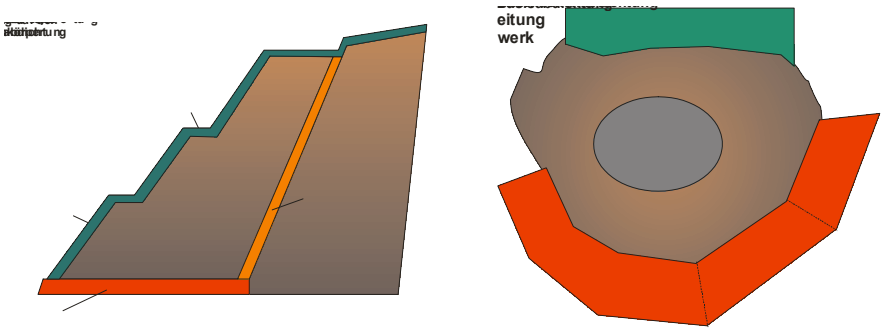

Abb. 13

An dieser Stelle kann die Thematik der "Industriellen Deponien" in der Stahlindustrie nicht allumfassend behandelt werden. Jedoch sollen die folgenden Ausführungen grundlegende Aspekte streifen.

Für derartige Industriedeponien bestanden bis in jüngster Zeit in Deutschland keine speziellen gesetzlichen Regelwerke. Vielmehr werden die für Haus- und Sondermüllablagerungen geltenden Regelungen herangezogen, wie z. B. Deponie-VO, Abfallablagerungs-VO sowie die TA Siedlungsabfall und TA Abfall. DH hat ein Haldenbewirtschaftungskonzept erstellt, welches im Mai 1994 den zuständigen saarländischen

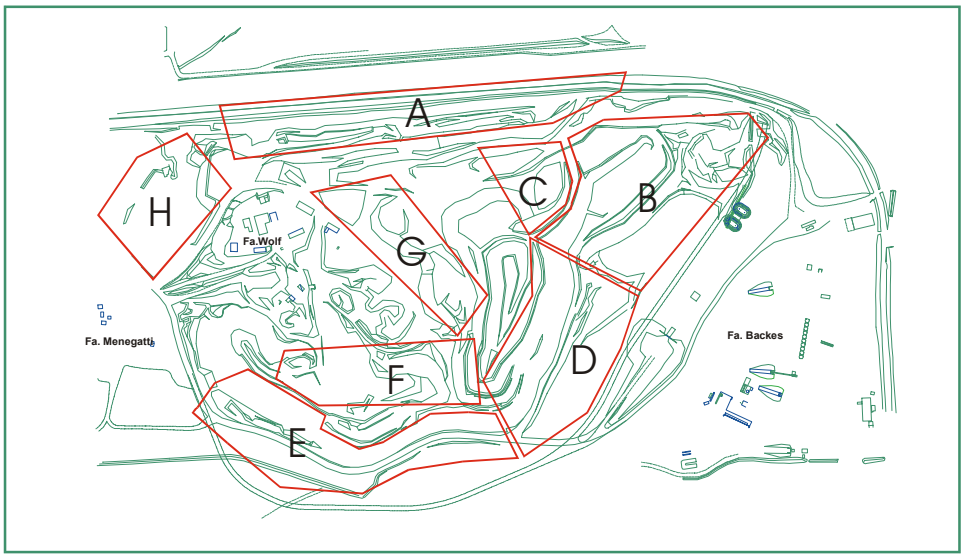

Abb. 14

Behörden übergeben wurde. Nach diesem vorgelegten Haldenbewirtschaftungskonzept müssen geregelte Oberflächen- und Basisabdichtungen aufgebracht werden. Derartige Abdichtungssysteme sind mit enormen Kosten verbunden.

Im **Abb. 12** und **Abb. 13** ist die Situation bezüglich der Halde DH schematisch wiedergegeben. Mit der Auflage vom Dezember 1996 des Ministeriums für Umwelt, Energie und Verkehr des Saarlandes (MUEV) müssen u. a. folgende Vorgaben zum Weiterbetrieb der Halde realisiert werden:

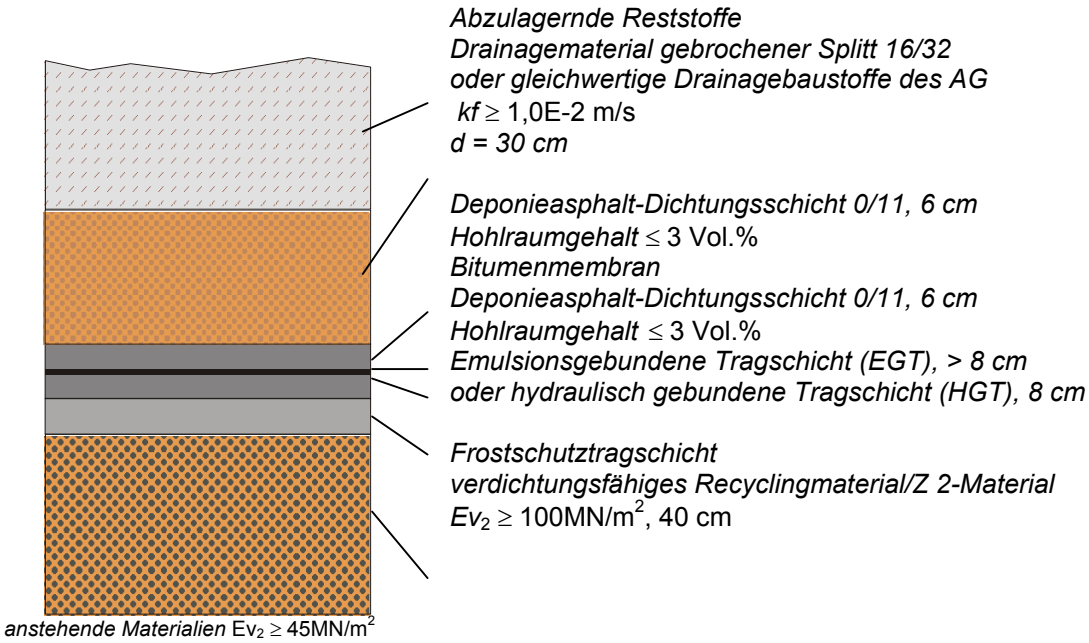

Abb. 15

- Es ist ein geregelter „Betrieb Halde“ für den verdichteten, konditionierten Einbau der Hüttenreststoffe auf abgedichteten Haldenflächen aufzubauen.

- Der gesamte Haldenkörper ist flächendeckend an der Oberfläche abzudichten. Da die Flanken des bestehenden alten Haldenkörpers zu steil und somit nicht tragfähig für Oberflächenabdichtungssysteme sind, müssen sie neu profiliert werden.

- Aufgrund der Profilierung des gesamten Haldenkörpers mit einem flacheren Böschungswinkel ergibt sich am Haldenfuß eine größere Grundausdehnung. Diese neu hinzukommenden Flächen müssen mit einer Basisabdichtung versehen werden.

- Eine Grundwasserüberwachung für die Dillinger Halde ist aufzubauen.

Die Gesamtplanung zur Umsetzung dieser Auflagen wurde im Oktober 1998 der zuständigen saarländischen Behörde übergeben. Erste Realisierungsschritte zur Umsetzung dieser Auflagen waren Planung, Bau und Inbetriebnahme der verschiedenen, neuen Haldenteilfläche B bis E mit einer Basisabdichtung (die Bezeichnungen der einzelnen Haldenteilflächen sind im **Abb. 14** grafisch dargestellt). Hierfür wurde eine spezielle Asphaltbasisabdichtung geplant und realisiert. Der Aufbau der Asphaltabdichtung ist im **Abb. 15** schematisch wiedergegeben. Zu dieser Baumaßnahme gehörte auch der Bau eines Sickerwasserfassungssystems. Die einzelnen Haldenteilfläche B bis E haben jeweils eine Ausdehnung von etwa 10.000 m^2 bis 12.000 m^2. Die erste Haldenteilfläche (Teilfläche B) wurde im Januar 1999 in Betrieb genommen. Zwischenzeitlich wird gerade unsere letzte Haldenteilfläche (Haldenteilfläche E) vorbereitet.

Die abzulagernden hüttenstämmigen Reststoffe werden verdichtet unde konditioniert abgelagert. Sowohl aus bodenmechanischen Gründen als auch aus Gründen der chemischen Immobilisierung potentieller Schadstoffe werden

die Ablagerungen in gezielter Schichtenfolge aufgebaut. Außerdem erfolgte eine Profilierung des äußeren Haldenkörperbereichs mit einem flacheren Böschungsneigungswinkel von 1:2,5 gegenüber früher von etwa 1:1,1 und entsprechenden Ausbau mit Bermen. Somit haben alle Haldenteilflächen die technischen Voraussetzungen für das Aufbringen eines Oberflächenabdichtungssystems.

Abfall (neue Bezeichnungen ab 1.1.99)	**EAK**
Verbrauchte Auskleidungen und feuerfeste Materialien	10 02 06
Feste Abfälle aus der Gasreinigung	10 02 03
Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke	10 02 01
unverarbeitete Schlacke	10 02 02
Gießformen und -sande nach dem Gießen	10 09 02
Schlämme aus der Gasreinigung	10 02 04
andere Schlämme	10 02 05
Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke	10 02 01
unverarbeitete Schlacke	10 02 02
andere Schlämme	10 02 05
Feste Abfälle aus der Gasreinigung	10 02 03
andere eisenhaltige Teilchen	12 01 02
	Summe:
gem. Bau- und Abbruchabfälle	17 07 01
Erde und Steine	17 05 01
Straßenreinigungsabfälle	20 03 03
Straßenreinigungsabfälle	20 03 03
Sieb- und Rechenrückstände	19 08 01
Beton	17 01 01
Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik und Baustoffe aus Gips- oder Asphaltbasis mit schädl. Verunreinigungen	17 01 99 D1

Tab. 2

In **Tab. 2** ist eine Übersicht der Reststoffe wiedergegeben, welche auf der Halde DH abgelagert werden.

3.2 Entwicklungsarbeiten

Parallel zu den Planungs- und Bauaktivitäten zum Aufbau des Haldenbetriebs werden bei DH umfangreiche eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur chemisch-physikalischen Charakterisierung der abzulagernden eisenhüttenmännischen Reststoffen vorgenommen. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Eignung dieser Stoffe als Bestandteile neu zu entwickelnder Abdichtungssysteme für Monodeponien der Stahlindustrie durchgeführt. Auf einen Teil der Grundlagenuntersuchungen soll im folgenden kurz eingegangen werden.

3.2.1 Untersuchungen an Tonstein/Gichtschlammgemengen

Seit 1993 wurden alle hüttenstämmigen Nebenprodukten bei DH in Form einer kritischen Bestandsaufnahme hinsichtlich ihrer Verwendung bzw. Entsorgung aufbereitet. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden bereits 1994 u. a. Untersuchungen angestellt, inwiefern Mischungen aus nordsaarländischem Tonstein/Tonvorkommen und der Feinstaubfraktion aus der Gichtgasreinigung (Naßreinigungsstufe; entwässert über Vakuumtrommelfilter – sogenannter Gichtschlamm) stabilisierend hinsichtlich ihres Eluatverhaltens wirken. Gleichzeitig sollte überprüft werden, inwieweit derartige Mischungen als Oberflächen-/Basisabdichtungsmassen auf der Halde DH genutzt werden können.

Die durchschnittliche chemische Feststoffanalyse des Gichtschlamms ist in **Tab. 3** zusammengestellt und im **Abb. 16** dessen Korngrößenverteilung wiedergegeben.

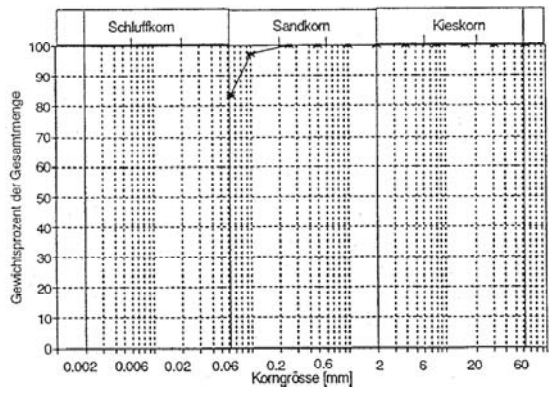

Abb. 16

Parameter	Durchschnittlicher Gehalt
H_2O (105° C)	30 %
CaO	2 %
SiO_2	6 %
Fe	38 %
Mn	0,15 %
P_2O_5	0,15 %
Al_2O_3	2 %
MgO	1 %
TiO_2	0,2 %
Pb	0,5 %
Na_2O	0,15 %
K_2O	0,2 %
Zn	2 %
C	30 %

Tab. 3

Dieser Gichtschlamm kann gegenwärtig im metallurgischen Produktionszyklus nicht recycliert werden. Der Grund hierfür ist vor allem auf die relativ hohen Gehalte an Alkalien sowie Zink- und Bleiverbindungen zurückzuführen. An kühleren Stellen im Hochofen sublimieren diese Stoffe. Das führt zu Anbackungen an der Feuerfestausmauerung. Diese Anbackungen können sich unkontrolliert ablösen und führen damit zu nicht mehr steuerbaren Zuständen in der Führung des Hochofenprozesses.

- **chemische-Analyse des Tonsteins:**

SiO_2	57,4 %
Al_2O_3	22,2 %
CaO	0,44 %
MgO	1,25 %
Na_2O	0,15 %
K_2O	3,53 %
Fe_2O_3	5,51 %
MnO_2	0,09 %
Glühverlust	8,7 %

rechn.: max. 65 % Kaolinit und 31 % Quarz

- **Bodenmechanische Eigenschaften**

- natürl. Wassergehalt w =	10,0 %
- Ausrollgrenze w_A =	19,7 %
- Fließgrenze w_L =	31,7 %
- Plastizität I_P =	12,0 %
- Konsistenz I_C =	1,81

Tab. 4

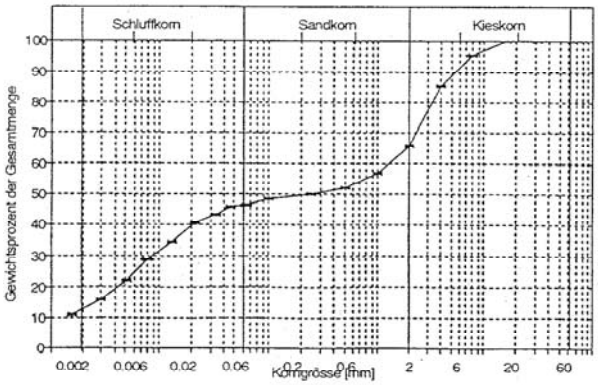

Abb. 17

Im nördlichen Saarland werden in einem Tagebau graue Tonsteine aus der Lebacher Gruppe des Unterrotliegenden abgebaut. Mineralogisch besteht dieser Tonstein hauptsächlich aus 2-Schicht-Tonminerale der Kaolinit-Gruppe (Kaolinit, Halloysit, Dickit), untergeordnet Muskowit sowie Spuren des 3-Schicht-Tonminerals Illit. Die durchschnittliche chemische Analyse sowie einige bodenmechanische Parameter sind in **Tab. 4** zusammengestellt und im **Abb. 17** die Korngrößenverteilung wiedergegeben.

Gemenge-Nr.	Zusammensetzung (Gew. % OS)			k_f-Wert (m/s)
	Tonstein	Gichtschlamm	Bentonit	
A 0	70	30	--	$1{,}41 \cdot 10^{-9}$
A 1	69,25	29,25	1,5	$6{,}94 \cdot 10^{-10}$
A 2	68,50	18,50	3,0	$4{,}90 \cdot 10^{-10}$
A 3	67,00	27,00	6,0	$4{,}48 \cdot 10^{-10}$
B 0	50	50	--	$3{,}96 \cdot 10^{-9}$
B 1	49,25	49,25	1,5	$5{,}69 \cdot 10^{-9}$
B 2	48,50	48,50	3,0	$2{,}90 \cdot 10^{-9}$
B 3	47,00	47,00	6,0	$1{,}20 \cdot 10^{-9}$
C 0	30	70	--	$1{,}46 \cdot 10^{-8}$
C 1	29,25	69,25	1,5	$1{,}13 \cdot 10^{-8}$
C 2	28,50	68,50	3,0	$8{,}20 \cdot 10^{-9}$
C 3	27,00	67,00	6,0	$4{,}69 \cdot 10^{-9}$
D 0	10	90	--	$2{,}63 \cdot 10^{-8}$
D 1	9,25	89,25	1,5	$2{,}30 \cdot 10^{-8}$
D 2	8,50	88,50	3,0	$2{,}29 \cdot 10^{-8}$
D 3	7,00	87,00	6,0	$7{,}37 \cdot 10^{-8}$
Basis 1	74,00	20,00	6,0	$3{,}66 \cdot 10^{-10}$
Basis 2	79,00	18,00	3,0	$4{,}04 \cdot 10^{-10}$
Basis 3	84,00	13,00	3,0	$2{,}16 \cdot 10^{-10}$

* TST - Tonstein
* GS - Gichtschlamm

Tab. 5

gabe von Bentonit auf ihr Durchlässigkeitsverhalten untersucht. Die Versuche wurden gemäß DIN 18130-ZY-ES-ST mit fallender Wassersäule durchgeführt. Die Gemenge wurden in laborüblichen Ausstechzylindern eingebaut. Die Einbauweise erfolgte für die Versuchsreihen "A" und "Basis" in Anlehnung an den Proctorversuch. Die Versuchsreihen "B", "C" und "D" ließen sich lediglich von Hand verdichten und einbauen. Die ermittelten k_f-Werte sind in der **Tab. 5** zusammengefaßt. Wie die Ergebnisse zeigen, ist es grundsätzlich möglich, Mischungen für mineralische Abdichtungsmassen aus Tonstein und Gichtschlamm, welche den in der TASI I vorge-

Da zum damaligen Zeitpunkt keine Erfahrungen zum Einsatz von Hüttenreststoffen, insbesondere zum Einsatz von Gichtschlamm zur Herstellung mineralischer Abdichtungen vorlagen, wurden 19 verschiedene Gemenge aus Tonstein, Gichtschlamm und teilweise Zu-

- Schwermetallgehalte im Gichtschlamm und Tonstein

Parameter	Gichtschlamm		Tonstein	
	DEV S7 (mg/kg TS)	DEV S4 (mg/l)	DEV S7 (mg/kg TS)	DEV S4 (mg/l)
Arsen	--	< 0,001	–	–
Blei	6.317	0,014	23,2	< 0,005
Cadmium	18,3	0,023	< 0,5	< 0,001
Chrom	92,1	< 0,01	21,2	< 0,01
Kupfer	96,9	0,039	16,9	< 0,02
Nickel	44,1	0,024	33,8	0,05
Quecksilber	0,14	< 0,001	0,077	< 0,001
Zink	11.267	0,099	61,3	< 0,02

- Schwermetallgehalte in zwei TST/GS-Gemengen

Parameter	Gemenge TST/GS 90:10		Gemenge TST/GS 70:30	
	DEV S7 (mg/kg TS)	DEV S4 (mg/l)	DEV S7 (mg/kg TS)	DEV S4 (mg/l)
Arsen	4,87	< 0,001	4,39	< 0,001
Blei	331	< 0,005	1.009	< 0,005
Cadmium	1,50	< 0,001	3,53	< 0,001
Chrom	30,2	< 0,01	30,1	< 0,01
Kupfer	55,4	< 0,02	39,5	< 0,02
Nickel	31,8	< 0,01	28,1	< 0,01
Quecksilber	0,89	< 0,001	0,62	< 0,001
Zink	553	< 0,02	1.280	< 0,02

* TST - Tonstein
* GS - Gichtschlamm

Tab. 6

schriebenen k_f-Wert $\leq 5*10^{-9}$ m/s unterschreiten, herzustellen.

Die potentiellen und mobilisierbaren Schwermetallgehalte vom Gichtschlamm (GS) und vom Tonstein (TST) sowie deren Gemenge lassen sich anhand ihrer Ergebnisse gemäß des DEV S7 (Elution mit Königswasser) und DEV S4 (Elution mit dest. Wasser) charakterisieren. Die Untersuchungsergebnisse sind in **Tab. 6** wiedergeben. Die Ergebnisse zeigen, daß im Gichtschlamm ein merkliches Potential an Zink und Blei enthalten ist (s. DEV S7-Werte), von dem jedoch nur ein Bruchteil mobilisierbar ist (s. DEV S4-Werte). Die untersuchten Gemenge 90:10 und 70:30 weisen ein ähnliches Verhalten auf.

An zwei ausgewählten Gemengen (Basis 2, A 1) sowie zu Vergleichszwecken in einem dritten Gemenge (TST/GS 50:50) wurden bodenmechanische Grundversuche ausgeführt. Neben der Bestimmung der natürlichen Wassergehalte erfolgte die Ermittlung der Fließ- und Ausrollgrenzen sowie der Plastizitäts- und Konsistenzzahlen (siehe **Tab. 7**).

- Konsistenzbestimmungen an drei Gemengen

Parameter	Einheit	Basis 3 (TST/GS/B 84:13:3)	A 1 (TST/GS/B 69,25:29,25: 1,5)	TST/GS 50:50
nat. Wassergehalt w_n	%	14,38	28,18	30,54
Fließgrenze w_f	%	28,39	39,94	45,40
Ausrollgrenze w_a	%	21,19	29,51	34,86
Plastizitätszahl I_p	%	7,2	10,43	10,54
Konsistenzzahl I_c	%	1,95	1,13	1,41

- Scherparameter (Kohäsion c' und Winkel innerer Reibung φ') der Ausgangskomponenten und der Gemenge

Probe	c' (kN/m²)	φ' (°)
Tonstein ()	30,4	30
Gichtschlamm (GS)	12	25
TST/GS (70:30)	12	38
TST/GS (90:10)	17	31,5

- Verschiedene Fallbetrachtungen zur Standsicherheit von TST/GS-Gemengen

Parameter	Einheit	TST/GS-Gemenge (70:30)		TST/GS-Gemenge (90:10)		
		1. Fall	2. Fall	3. Fall	4. Fall	5. Fall
Winkel innerer Reibung φ'	°	30	30	30	30	30
Kohäsion c'	kN/m²	0	3,5	5	5	0
Feuchtdichte Y	kN/m³	17,8	17,8	19	19	19
Böschungsneigung n	--	1:2,5	1:2	1:2,5	1:1,75	1:1,75
Standsicherheitsbeiwert	--	1,49	1,51	1,9	1,41	1
Anforderung DIN 4084 $\eta \geq 1{,}4$ erfüllt?	--	ja	ja	ja	ja	nein

* TST - Tonstein
* GS - Gichtschlamm

Tab. 7

Darüber hinaus wurden an allen drei Gemengen Proctorversuche (DIN 18127) ausgeführt. Die max. erreichbaren Trockendichten lagen bei allen drei Gemengen bei ca. 1,88 – 1,89 (t/m³). Die dazugehörigen Wassergehalte betrugen zwischen 13,8 % (Basis 3) und 14,9 % (TST/GS 50:50).

Die Standsicherheit der TST/GS-Gemenge wurde durch Bestimmung der Scherparameter (Kohäsion, Winkel innerer Reibung) ermittelt. Die Bestimmung erfolgte in Rahmenscherversuchen nach DIN 18137. Es wurden die TST/GS-Gemenge (70:30) und TST/GS-Gemenge (90:10) sowie die Ausgangsstoffe Tonstein und Gichtschlamm untersucht. Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfungen sind ebenfalls in Tab. 6 aufgeführt. Weiterhin wurden die ermittelten Scherparameter im Rahmen einer Standsicherheitsberechnung eingesetzt. Die Standsicherheitsberechnung sollte den Nachweis erbringen, daß bei einem Einsatz der o. g. Gemenge im geneigten Gelände kein Böschungsbruch auftritt. Hierzu wurden vier verschiedene Fälle mit jeweils veränderten Rahmenbedingungen betrachtet, welche zusätzlich auch in Tab. 6 zusammengefaßt sind. Die Berechnung erfolgte nach dem Lamellenverfahren (JANBU) entlang der kritischen Schichtgrenze Deponiematerial/Abdichtungsschicht. Hierbei gilt die Standsicherheit als erreicht, wenn gemäß DIN 4084 für den Lastfall 1 (ständige Lasten) ein Standsicherheitsfaktor von 1,4 nachgewiesen wird. Die Standsicherheitsbetrachtungen mit den in Ansatz gebrachten Scherparametern zeigen, daß die Anforderungen der DIN 4084 bereits auch ohne Berücksichtigung der Kohäsions-

Konverterschlacke (LD-Schlacke)							
Gehalt in Ma-%							
	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	Mn	Fe	P2O5
Mittelwert	*50,45*	*11,62*	*1,02*	*2,11*	*4,05*	*18,88*	*1,52*
Standardabweichung	*4,10*	*1,95*	*0,568*	*1,264*	*0,576*	*3,08*	*0,23*
Anzahl	*4646*						

Konverterschlacke (LD-Schlacke)							
Gehalt in Ma-%							
	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	Mn	Fe	P2O5
Mittelwert	*50,45*	*11,62*	*1,02*	*2,11*	*4,05*	*18,88*	*1,52*
Standardabweichung	*4,10*	*1,95*	*0,568*	*1,264*	*0,576*	*3,08*	*0,23*
Anzahl	*4646*						

Tab. 8

kräfte erfüllt werden, wenn die Böschungsneigungen 1: 2,5 (ca. 22°) nicht überschreiten. Es lassen sich steilere Böschungen bis 1: 2 (ca. 26°) dann realisieren, wenn zusätzlich Kohäsionskräfte mitgerechnet werden.

3.2.2 Untersuchungen an Stahlwerksschlacken-Gichtschlamm-Mischungen

Nach Vorliegen der zuvor erläuterten positiven Versuchsergebnissen zu den ermittelten Eigenschaften von Ton-Gichtschlamm-Mischungen lag der Schluß nahe, Kombinationen mit hüttenstämmigen Reststoffen zu testen, zumal auf der Halde DH in Bereichen des verdichteten Einbaus der unterschiedlichen Hüttenreststoffe Erscheinungen zur "Selbstabdichtung" beobachtet werden konnten. Konsequent der Gedanke weiterverfolgt, nicht nur die hüttenstämmigen Entfallstoffe, welche auf der Halde DH abgelagert werden mit einem anderen technischen Oberflächenabdichtungssystem "passiv" zu schützen, sondern vielmehr die chemisch-physikalischen Eigenschaften dieser Reststoffe selbst "aktiv" als Abdichtung zu nutzen.

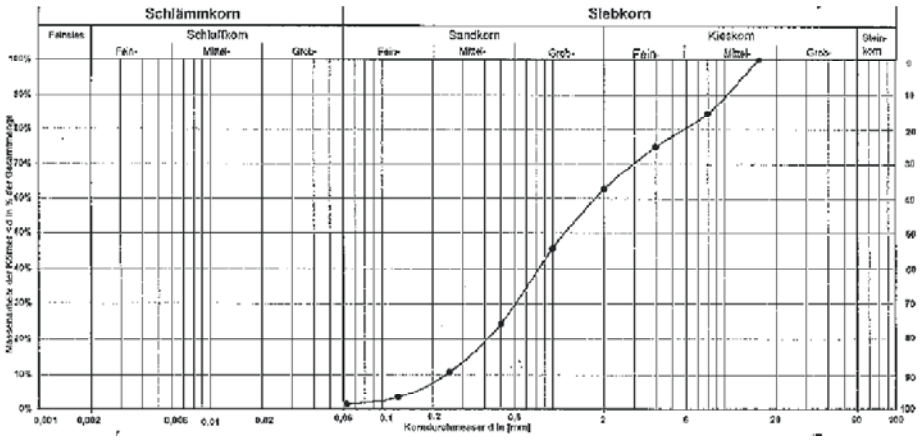

Abb. 18

So werden seit etwa 1996 bei DH Untersuchungen zum Einsatz von Stahlwerksschlacken in Kombination mit Gichtschlamm und anderen feinkörnigen Materialien wie Stäube aus der Sinteranlage/ Stahlwerk vorgenommen.

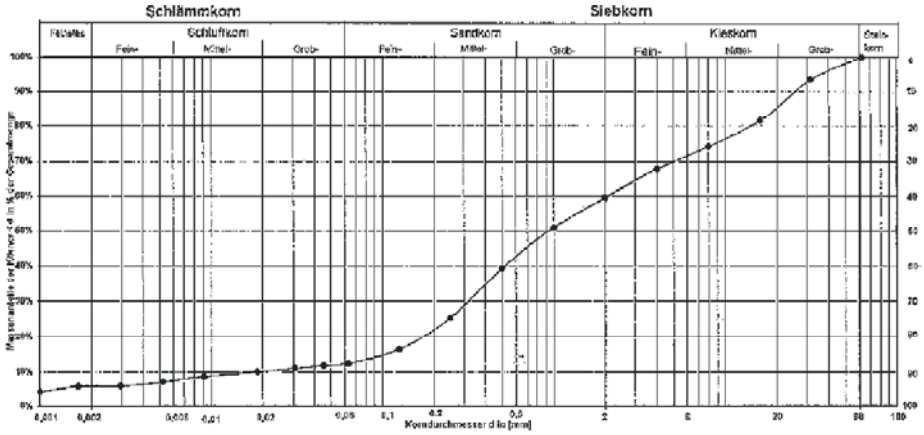

Abb. 19

Dabei wurde aufgrund der entsprechend zur Verfügung stehenden Mengen der Schwerpunkt des Einsatzes von Gichtschlamm mit aufbereiteter Konverter- bzw. Pfannenschlacken gelegt. Die letztgenannte Stahlwerksschlacke ist aufgrund der Abkühlbedingungen im Stahlwerk DH eine sogenannte selbstzerfallende Stahlwerksschlacke mit feinkörnigem Aufbau. In **Tab.8** ist die durchschnittliche chemische Analyse unterschiedlicher Stahlwerksschlacken zusammengefaßt und im **Abb. 18 und 19** sind die Korngrößenverteilung der Pfannenschlacke (Trocken/Naßabsiebung) wiedergegeben. Die merkliche Verschiebung der Korngrößenverteilung der Pfannenschlacke bei der Naßabsiebung gegenüber der Trockenabsiebung ist mit dem Vorhandensein von reaktionsfähigem Freikalk erklärbar.

In umfangreichen Laborversuchsreihen wurden verschiedene Mischungen von Pfannenschlacke und Gichtschlamm hinsichtlich ihrer Dichtwirkung untersucht. Dabei wurden die mit Proctordichte verdichteten Proben entsprechend in eine Durchlässigkeitsmeßzelle eingebaut. Die Durchströmung erfolgte von unten nach oben, Randläufigkeit

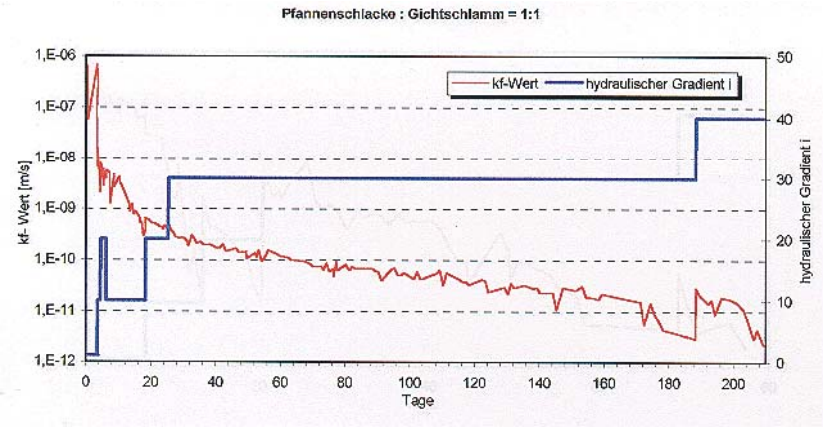

Abb. 20

wurde durch einen Außendruck von 1 bar auf den Probenkörper ausgeschlossen. Bestimmt wurde jeweils die Kurvenverläufe der Veränderung der k_f-Werte in Abhängigkeit von der Zeit und unterschiedlichen hydraulischen Gradienten. Beispielhaft für die Laborergebnisse ist im **Abb. 20** die Durchlässigkeitsänderung für ein Mischungsverhältnis von Pfannenschlacke zu Gichtschlamm von 1:1 in Abhängigkeit von der Zeit und unterschiedlichen hydraulischen Gradienten grafisch dargestellt. Aus den Labor-Meßreihen können folgende allgemeine Aussagen getroffen werden:

- Mit zunehmenden Gichtschlammanteil in den Mischungen tritt die Dichtwirkung schneller ein.

- Niedrigste Werte werden bei Mischungsverhältnissen von Pfannenschlacke zu Gichtschlamm von 1:1 (k_f-Wert etwa $2{,}15 * 10^{-12}$ m/s) bzw. von 1:2 (k_f-Wert etwa $2{,}12 * 10^{-12}$ m/s) erreicht.

- Der pH-Wert der Eluate liegt im Abhängigkeit des Masseanteils der Pfannenschlacke etwa zwischen 10,4 und 12,7.

- Der Vergleich mit einer Mischung aus Pfannenschlacke und Lößlehm zeigt, daß die niedrigen k_f-Werte der Pfannenschlacken/Gichtschlamm-Mischungen nicht erreicht werden (Pfannenschlacke zu Lößlehm wie 2:1; k_f-Wert etwa $6{,}23 * 10^{-10}$ m/s nach 188 Tagen). Das weist darauf hin, daß neben der Funktion des Gichtschlamms als Füllmaterial zu dienen auch chemische Reaktionen zur Absenkung der k_f-Werte verantwortlich sind (Hydratationsreaktionen, Carbonatisierung usw.).

In einem etwa einjährigen Großlysimeterversuch (Grundfläche 1.000m^2) zur Simulation des auf der Haldenteilfläche B praktizierten lagenweisen, verdichteten und konditionierten Einbaus von Gichtschlamm und Mischungen aus der Stahlwerksschlackenaufbereitung (Mischungen aus Konverter- und Pfannenschlacke) wurden "vor Ort" Durchlässigkeitsbeiwerte im Grenzbereich zwischen Schlackenmischung und Gichtschlamm von etwa 7 bis $9{,}5 * 10^{-8}$ m/s ermittelt.

Zur Beurteilung der bodenmechanischen Stabilität der unterschiedlichen Pfannenschlacke/Gichtschlamm-Mischungen wurde nach DIN 18137 mit einem Direktschergerät durchgeführt. Der für das Mischungsverhältnis Pfannenschlacke/Gichtschlamm von 1:2 ermittelte Reibungswinkel beträgt $37{,}6^0$ und die Kohäsion 15,97 KN/m^2; für das Mischungsverhältnis Pfannenschlacke/Gichtschlamm von 1:1 beträgt der Reibungswinkel $24{,}27^0$ und die Kohäsion 97,11 KN/m^2. Aufgrund der ermittelten Scherfestigkeitswerte können damit insgesamt die o. g. Mischungen als standsicher und gut befahrbar eingestuft werden.

Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen wurden auch typische hüttenstämmige Reststoffe nach pH_{stat}-Verfahren analysiert. Aus Mischungsproben aus je 100 kg des „reinen“ Hüttenreststoffs wurden repräsentative korngebrochene Proben mit Standardkornverteilungen von 3,15 bis 6 mm hergestellt. Hieraus wurden Eluate mit Lösungsmittel-Feststoffverhältnissen von 10:1 der pH-Stufen 4; 8; 9; 10; 11; 11,5; 12; 12,4; 12,8; 13,2 und 13,5 im pH_{stat}-Versuch erzeugt. Die pH-Stufen wurden innerhalb von 30 Minuten erreicht und über 24 Stunden gehalten. Die Eluate wurden nach Druckfiltration durch ein Cellulose-Membranfilter (Porenweite 0,45 μm) mittels ICP-AES auf Schwermetalle hin untersucht.

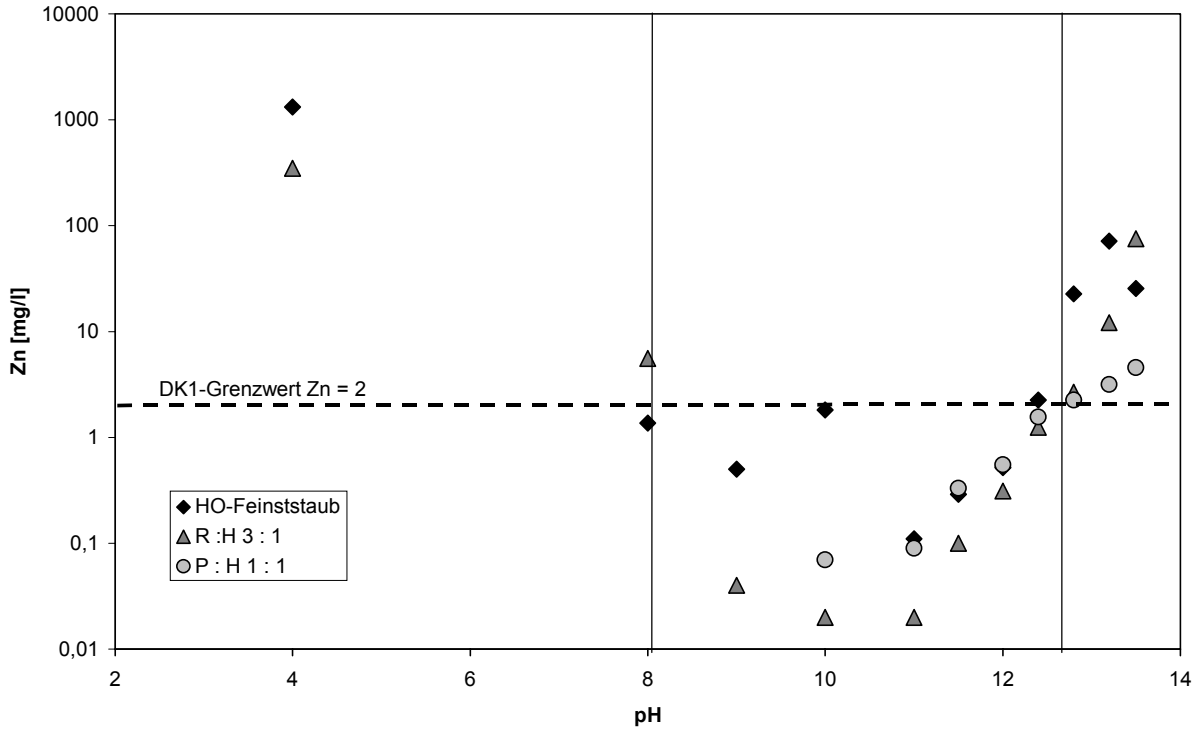

Abb. 21

Im **Abb. 21** ist die Löslichkeit [mg/l] von Zn aus Materialproben von reinem Hochofen-Feinststaub (Gichtschlamm/entwässert), einer Mischung aus Stahlwerksschlacken mit Hochofen-Feinststaub (R:H) sowie einer Mischung von Pfannenschlacke und Hochofen-Feinststaub (P:H) unter verschiedenen pH-Milieubedingungen dargestellt. In reinem Hochofen-Feinststaub wird Zink unter sauren Elutionsbedingungen (pH 4) stark gelöst. Das Minimum der Löslichkeit lag im pH-Bereich 11 bis 11,5 bei 0,1 [mg/l]. Im Bereich zwischen pH 8 und 12 werden bei reinem Hochofen-Feinststaub keine Grenzwertüberschreitungen gemäß DepV DK1 (TA-Si) beobachtet. Der untersuchte Dichtungsbaustoffmischung P:H 1:1 zeigt im Vergleich mit reinem Hochofen-Feinststaub im Bereich zwischen pH 8 und 10 eine erkennbar geringere Löslichkeit von Zink. Die gefundenen Konzentrationen lagen dabei bis pH 12,8 deutlich (Minimum bei pH 10 mit < 0,1 mg/l) unter dem gesetzlichen Grenzwert.

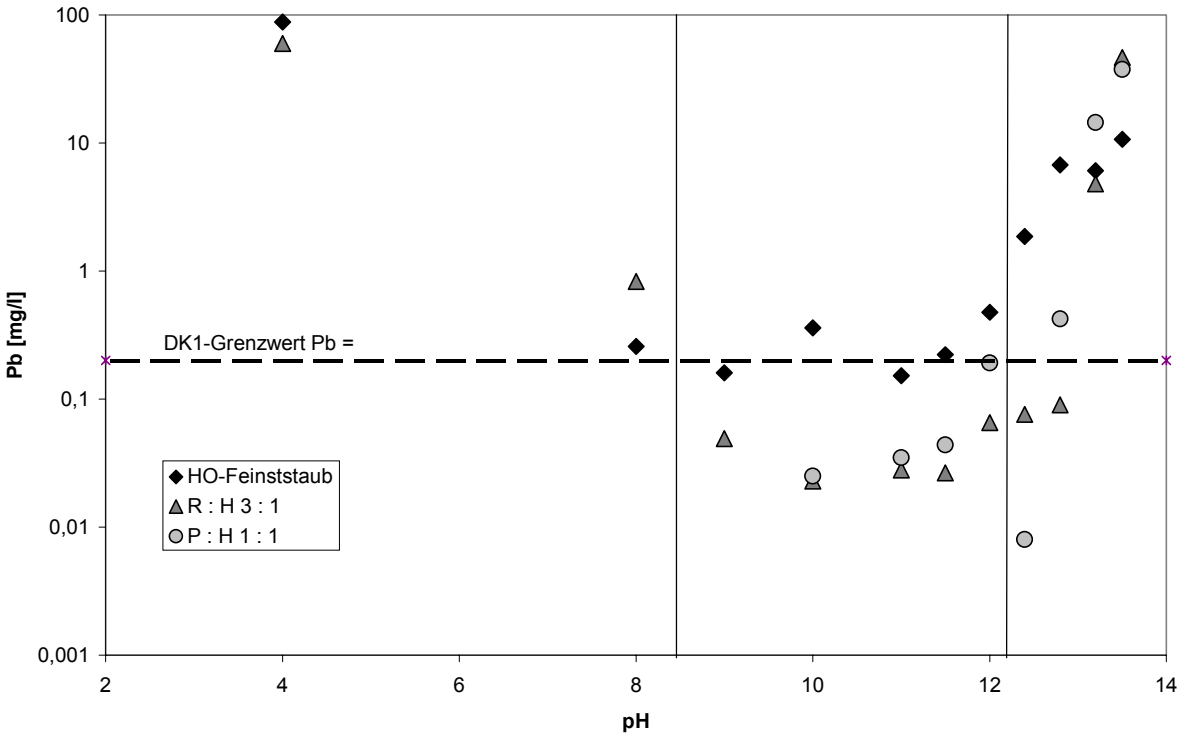

Abb. 22

Ähnliche Beobachtungen ließen sich auch bei der Elution von Blei machen (**Abb. 22**). In der Dichtungskomponente Hochofen-Feinststaub wurden im Bereich pH 8 bis 12,5 ca. 0,2 mg/l gelöst. Im untersuchten Dichtungsbaustoff P:H 1:1 lag auch hier die Löslichkeit von Blei bis pH 13,5 deutlich unter der im reinen Hochofen-Feinststaub. Zwischen pH 8 bis hin zu pH 12,5 mit einem Minimum im Bereich pH 10 (< 0,05 mg/l) werden Pb-Konzentrationen unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes eluiert.

3.2.3 Thesen zur Charakterisierung von Monodeponien der Stahlindustrie

An dieser Stelle sollen aufgrund bisher gewonnener Erkenntnisse aus der Bearbeitung der wissenschaftlich-technischen Aufgabenstellung zur Charakterisierung der "Eisenhüttenmännische Halde DH" zusammenfassend Arbeitshypothesen aufgestellt werden, welche allgemein für Monodeponien der Stahlindustrie zutreffen:

- Oberstes Gebot bei der Ab- bzw. Zwischenlagerung von Hüttenreststoffen ist:

  Gewährleistung des Schutzes von Grundwassers!

- Halden aus spezifischen hüttenstämmigen Reststoffen existieren bereits über Jahrzehnte. Typische ab- bzw. zwischengelagerte mineralische Massenabfälle Deponien der Stahlindustrie sind z. B. verschiedene Kornfraktionen aus der Schlackenaufbereitung (basische Reststoffe), Stäube und Schlämme (u.a . entwässert) aus den Gasreinigungsanlagen sowie Feuerfestausbruch.

- Dem Minimierungsgebot hinsichtlich des Eintrages von Schadstoffen aus dem Haldenkörper in das Grundwasser kann durch konventionelle technische Maßnahmen wie z. B. das Aufbringen von Oberflächenabdichtungen, Versiegeln

neuer Untergrundflächen mit einer Basisabdichtung und/oder durch entsprechende Profilierung der Haldenböschungen und Aufbringen von Rekultivierungsmassen mit ausgewählter Bepflanzung Rechnung getragen werden (Minimierung des Eindringens von Regenwasser).

- Eine Halde aus eisenhüttenmännischen Reststoffen ist nicht vergleichbar mit einer herkömmlichen Hausmülldeponie (z. B. keine Gasbildungsprozesse aufgrund von Verrottungsvorgängen organischer Bestandteile)!

- Es erfolgt eine Vermeidung/Minimierung des Eintrages von Schwermetallen (z. B. aus den abgelagerten Stäuben und Schlämmen) aus dem Haldenkörper in das Grundwasser durch den „Mechanismus der chemische Immobilisierung". Da in der Halde basische Bedingungen herrschen, wird eine Auslaugung von Schwermetallen aufgrund der Abb.ung schwerlöslicher Hydroxidverbindungen entsprechend dem jeweiligen Löslichkeitsgleichgewicht in Abhängigkeit vom pH-Wert unterbunden!

- Aufgrund unterschiedlicher ablaufender chemischer Reaktionen (u. a. Verfestigungsreaktionen durch hydraulische Abbindungen, Carbonatisierung) oder anderen Retardierungseffekte wird auch der eigentliche Haldenkörper zunehmend wasserundurchlässiger.

Im Oktober 1998 wurde durch DH ein Europäisches Forschungsprojekt (EGKS: Pilot- und Demonstrationsprojekt) in Brüssel beantragt. Der offizielle Start dieses Forschungsprojekts war im Juli 1999 und wurde Ende 2003 beendet. Über Ziel und Ergebnisse wird im folgenden Fachbeitrag berichtet (Norbert Wolsfeld, Klaus-J. Arlt: „Feldversuche zu Oberflächenabdichtungssystemen auf Basis mineralischer Stoffe der Stahlindustrie").