

Über Grundlagen und Praxis des Bodenwaschens*)

Sur les principes de base et la pratique du lavage des sols

Sobre los fundamentos y la praxis del lavado de suelos

Fundamentals and Practice of Soil Washing

Dr.-Ing. F.U. Schneider, Aachen

Zusammenfassung Nach einer kurzen Einführung in die Problematik und in technische Möglichkeiten der Bodensanierung werden Grundlagen des Bodenwaschens erörtert. Zunächst wird das Arbeitsprinzip dargestellt und auf die Bedeutung des stofflichen und granulometrischen Aufbaus der Böden eingegangen. Es folgen eine Charakterisierung der Kontaminationen und eine Beschreibung der Waschmechanismen. Dabei wird zwischen „passivem“ und „aktivem“ Waschen unterschieden. Der nächste Teil befaßt sich mit der Wäsche ölbelasteter Böden. Es kann gezeigt werden, daß sich im Reaktionssystem Feststoff-Wasser-Öl Adsorptionsgleichgewichte einstellen, die sich durch Verteilungskoeffizienten beschreiben lassen. Anhand eines hydromechanischen Reaktionsmodells lassen sich kritische Korngrößen ermitteln, die eine obere Stabilitätsgrenze für die Öl-Korn-Aggregate darstellen. Auf Möglichkeiten, den Waschprozeß durch chemische Hilfsmittel zu fördern, wird kurz eingegangen. Abschließend wird an zwei ausgewählten, typischen Beispielen die Praxis des Bodenwaschens dargestellt und diskutiert.

Résumé Après une brève introduction aux problèmes et aux possibilités techniques d'assainissement des sols, l'auteur du présent article discute les principes de base du lavage des sols. Il nous présente, tout d'abord, le principe de travail, tout en attirant l'attention sur l'importance de la constitution matérielle et granulométrique des sols. Ensuite, il décrit la contamination ainsi que les mécanismes de lavage. A ce sujet, il distingue entre le lavage „passif“ et le lavage „actif“. La partie suivante traite du lavage des sols contaminés par l'huile. Il est possible de démontrer que dans le système de réaction solide-eau-huile, il s'établissent des équilibres d'adsorption qui peuvent être décrits à l'aide de coefficients de distribution. Moyennant un modèle de réaction hydromécanique on peut déterminer les granulométries critiques, qui représentent une limite supérieure de stabilité pour les agrégats huile-grain. L'auteur parle aussi, brièvement, des possibilités de faciliter le processus de lavage à l'aide de coadjuvants chimiques. Ensuite, il décrit et il discute la pratique du lavage des sols, tout en citant deux exemples typiques.

Summary After a short introduction into the problem areas and technical facilities for soil decontamination, the fundamentals of soil washing are elucidated. The operation principle is first described and the importance of soil structure related to composition and granulometry are discussed. This is followed by a characterization of contaminations and a description of washing mechanisms. Here is distinguished between "passive" and "active" washing. The following section is concerned with washing soil contaminated with oil. It can be demonstrated that adsorption equilibria are obtained within the reaction system of solid/water/oil. These can be described by means of distribution coefficients. Based on a hydromechanical reaction model, the critical particle sizes which represent an upper stability limit for oil-particle aggregates can be represented. Options for promoting the washing process using chemical reagents are briefly gone into. Subsequently, the practice of soil washing is illustrated and discussed using two selected typical examples.

Resumen Tras una breve introducción en la problemática y las posibilidades técnicas de saneamiento de los suelos, se discuten los fundamentos del lavado de suelos. Primero, se presenta el principio de trabajo y se llama la atención sobre la importancia de la constitución material y granulométrica de los suelos. Sigue luego una caracterización de las contaminaciones y una descripción de los mecanismos de lavado, distinguiéndose entre el lavado „pasivo“ y el lavado „activo“. La parte siguiente trata del lavado de suelos contaminados por el aceite. Queda demostrado que en el sistema de reacción sólido-agua-aceite, se establecen unos equilibrios de adsorción que pueden ser descritos con ayuda de coeficientes de distribución. Mediante un modelo de reacción hidromecánica se pueden determinar las granulometrías críticas, que representan un límite máx. de estabilidad para los agregados aceite-grano. Se habla también, en forma resumida, de las posibilidades de facilitar el proceso de lavado por medio de coadyuvantes químicos. A continuación, se describe y se discute la praxis del lavado de suelos, citando dos ejemplos típicos.



Allgemeine Bemerkungen zur Bodensanierung

Die Sanierung kontaminierter Böden stellt heute eine wichtige und schwierige Aufgabe dar, der sich unsere Industriegesellschaft stellen muß und zu deren Bewältigung Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gefordert sind. Da man sich erst reichlich spät dieser wie auch anderer ökologischer Herausforderungen gestellt hat, steckt die Bodensanierung noch in den Anfängen. Es mangelt einerseits teilweise noch an sicheren Grundlagen und zuverlässigen Methoden zur Charakterisierung und Bewertung der Böden im Hinblick auf deren Gefährdungspotential und Sanierungsfähigkeit und



General comments on decontamination of soil

The decontamination of polluted soil currently represents an important and difficult task which must be faced by our industrialized society and for which politics, economy and science must assume responsibility. Since a response to this and other ecological challenges came much too late, the decontamination of soil is still in its infancy. On the one hand, there is a lack of reliable fundamentals and methods for characterization and evaluation of soils with respect to their hazard potential and ability to be decontaminated. On the other hand, there is frequently still a lack of suitable

*) Überarbeitete Fassung eines Vortrages auf dem VII. Aachener Kolloquium über Aufbereitung und Veredlung am 11. und 12. Juni 1992

**) Institut für Aufbereitung der RWTH Aachen

**) Institute for mineral processing of the Technical University Aachen

Tabelle 1: Verfahren zur Bodensanierung [1]

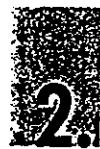
1. Einkapselung
 - 1.1 Oberflächenabdeckung
 - 1.2 Seitliche Abschottung durch Dichtwände
 - 1.3 Sohlabdichtung
2. Bodenaustausch mit Verlagerung und kontrollierter Deponierung
3. Hydraulische Maßnahmen mit Dekontamination des geförderten Wassers
4. On-Site-Behandlung mit Herausnahme des Bodens
 - 4.1 Fixieren durch Zugabe von Bindemitteln
 - 4.2 Waschverfahren mit Wasser und ggf. Tensiden
 - 4.3 Extraktion mit Lösungsmitteln
 - 4.4 Biologische Behandlung mit schichtweisem Aufbau von Mieten und Zugabe von Baumrinde
 - 4.5 Thermische Behandlung, Drehrohrofen mit direkter und indirekter Beheizung
5. In-Site-Behandlung
 - 5.1 Absaugen von leichtflüchtigen Stoffen durch Unterdruck
 - 5.2 Extraktion (Bodenwäsche)
 - 5.3 Immobilisierung, Reduzierung der Löslichkeit
 - 5.4 Biologischer Abbau bzw. Oxidation
 - 5.5 Biologische Elimination von CKWs mittlerer und geringer Konzentration durch bereits vorhandene adaptierte Bakterien mit mineralischer Düngung
- 5.6 Einsatz speziell gezüchteter Bakterien

Table 1: Processes for decontamination of soil [1]

1. Capsuling
 - 1.1 Surface sealing
 - 1.2 Side sealing using sealing walls
 - 1.3 Trench sealing
2. Soil replacement with relocation and controlled storage on disposal sites
3. Hydraulic measures with decontamination of water arising from this
4. On-site treatment with soil removal and redepositing
 - 4.1 Fixation by addition of binding agents
 - 4.2 Washing processes with water and possibly surfactants
 - 4.3 Extraction with solvents
 - 4.4 Biological treatment with formation of stacked heaps in layers and addition of tree bark
 - 4.5 Thermal treatment, rotary kiln with direct and indirect heating
5. In-site treatment
 - 5.1 Vacuum removal of highly volatile substances
 - 5.2 Extraction (soil washing)
 - 5.3 Immobilization, reduction of solubility
 - 5.4 Biological decomposition resp. oxidation
 - 5.5 Biological elimination of chlorinated hydrocarbons of medium and low concentration by bacteria specially adapted and with mineral fertilizer
- 5.6 Application of bacteria cultures especially developed for this purpose

andererseits auch häufig noch an geeigneten Strategien und technischen Verfahren, mit denen die vorgegebenen Sanierungsziele möglichst effektiv zu erreichen sind [1–3]. Tabelle 1 gibt einen Überblick über vorgeschlagene Sanierungsverfahren, die z. T. bereits praktisch erprobt und auch eingesetzt werden.

Angesichts der Vielfalt der Schadstoffe und ihres Auftretens sowie der sehr unterschiedlichen Bodenbeschaffenheit kann es keine Patentrezepte geben; in jedem Fall muß anhand sorgfältiger Untersuchungen das jeweils geeignete Verfahren gefunden und den speziellen Gegebenheiten angepaßt werden.



2. Die Bodenwäsche – ein geeignetes Verfahren zur Bodenreinigung

Ein wichtiges Verfahren zur Bodenreinigung ist die Bodenwäsche. Sie bietet gegenüber manchen anderen Verfahren prinzipiell verschiedene Vorteile:

- Es können bewährte Technologien zur Rohstoff- und Wasseraufbereitung sowie umfangreiche Erfahrungen und Erkenntnisse auf diesen Gebieten genutzt werden.
- Nach Durchführung notwendiger Testversuche kann die Sanierung nach einem festen Zeitplan und mit kalkulierbaren Kosten durchgeführt werden.
- Die Waschergebnisse lassen sich direkt ermitteln und kontrollieren.
- Der Prozeß kann sehr flexibel gestaltet und den jeweiligen Gegebenheiten angepaßt werden.
- Die Anlagen können im Baukastensystem in verschiedenen Größen und Varianten zusammengestellt und auch mobil ausgeführt werden, so daß sich damit ein breites Spektrum von Sanierungsaufgaben lösen läßt.

Von Nachteil mag sein, daß ein Bodenaushub notwendig ist; dies kann das Entweichen von flüchtigen Schadstoffen zur Folge haben, so daß ggf. besondere Maßnahmen zur Luftreinhaltung getroffen werden müssen. Bedenklich kann ferner sein, daß dabei in Einzelfällen die Zerstörung ökologischer Strukturen in Kauf genommen werden muß.

strategies and technical processes with which the specified objectives can be achieved effectively [1–3]. Table 1 provides an overview of proposed decontamination processes which have been partially tested in the practice and have also found implementation.

In view of the great variety of contaminants and their occurrence and also the extremely different soil textures, there cannot be any magic formula; for each case the suitable process must be ascertained and adapted to the special conditions.



2. Soil washing – a suitable process for decontamination of soil

Soil washing is an important process for the decontamination of soil. In principle, it offers various advantages in comparison to other processes:

- Reliable technology is available for treatment of raw materials and water and extensive experience and know-how in these fields can be utilized.
- After conducting the required tests, decontamination can be carried out according to a fixed schedule and calculable costs.
- Washing results can be determined and controlled direct.
- The process can be varied extremely flexible and adapted to the prevailing conditions.
- The plants can be configured as a modular system for various sizes and variants and also as mobile versions thus enabling a wide range of decontamination tasks.

It may be of disadvantage that an excavation of soil is required; this could result in escape of volatile contaminants so that it may be necessary to take special measures for keep air clean. Also critical can be that in some cases the destruction of ecological structures may have to be accepted.

Soil washing thus appears particularly suitable for decontamination of former industrial sites, particularly for mining, smelting and coking operations.



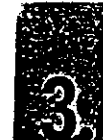
Über Grundlagen des Bodenwaschens

3.1 Das Arbeitsprinzip

Das Arbeitsprinzip kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden: Durch Eintrag mechanischer Energie, evt. unterstützt durch Zugabe chemischer Hilfsmittel sowie auch durch Zufuhr von Wärme, sollen die Bodenmatrix in Wasser aufgeschlossen und die Schadstoffe vom Korn abgelöst und umverteilt werden. Nach der Klassierung und Sortierung soll der größte Teil des Bodens „gewaschen“ vorliegen, so daß er wieder eingebaut werden kann. Schadstoffkonzentrate fallen in Form von Feinstschlamm, leichten Sortierprodukten (z. B. Kohle, Koks, Holz, porösen Baustoffen etc.), Schaumprodukten der Flotation sowie als Rückstand der Washwasserklärung und ggf. der Abluftreinigung an. Sie sind als Sonderabfall zu behandeln und können möglicherweise auch noch weiter aufbereitet werden. Dieses Grundkonzept ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Es zeigt sich, daß eine enge Verwandtschaft zu Verfahren der Rohstoffaufbereitung besteht; dies gilt nicht nur für wichtige Grundoperationen, sondern trifft auch für einen Großteil der eingesetzten Trenntechnik zu. Dies macht aber auch deutlich, daß mit dem Begriff „Bodenwaschen“ der im allgemeinen recht komplexe Trennprozeß nur unzureichend umschrieben ist; es handelt sich vielfach um eine naß-mechanische Aufbereitung im klassischen Sinne.

Die Besonderheit und eigentliche Problematik des Bodenwaschens verbinden sich im wesentlichen mit der Umverteilung der Schadstoffe innerhalb des Reaktionssystems. Dieser recht komplexe Prozeß, der von zahlreichen Einflußgrößen stofflicher, granulometrischer und energetischer Art abhängt, bedarf einer eingehenderen Erforschung durch systematische Grundlagenuntersuchungen. Dies erscheint notwendig, um die Möglichkeiten und Grenzen des Bodenwaschens besser einschätzen und um effiziente Waschverfahren entwickeln und den jeweiligen Gegebenheiten entsprechend gezielt einsetzen zu können.



Fundamentals of soil washing

3.1 Principle of operation

Simplified, the principle of operation can be described as follows: by means of an input of mechanical energy, possible aided by additions of chemical reagents and also heat input, the soil matrix is to be liberated in water and the contaminants dissolved from particles and redistributed. After classifying and sorting, the major part of the soil should be present as "washed" ready to be returned. Contaminant concentrates arise in form of superfine sludge, light products from sorting (e. g. coal, coke, wood, porous building materials etc.), froth products from flotation and residue from wash water clarification and, if required, air purification. These are to be treated as special waste and can possibly be subjected to further treatment. This basic concept is illustrated schematically in Fig. 1.

It is seen that there is a close relationship to processes of raw material processing; this not only applies to important basic operations, but also to a large proportion of the separating techniques used. This also makes clear that the term "soil washing" inadequately describes the generally rather complex separation process; it is very often concerned with a wet processing technique in a classical sense.

The peculiarity and actual problem area of soil washing is essentially related to the re-distribution of contaminants within the reaction systems. This rather complex process which is affected by numerous factors related to composition, granulometry and energy, requires an extensive research through systematic fundamental experimentation. This appears necessary for a better assessment of the possibilities and limits of soil washing and to develop efficient washing processes and to apply these specifically for the respective conditions.

3.2 The occurrence of contaminants in soil and consequences for the washing process

The success of soil washing is decisively dependent on which contaminants occur in the soil matrix and where they occur, and how they can be redistributed by the washing process. For instance, extremely high concentrations may be present in the fines which have a strong adsorption capacity owing to their high specific surface. Moreover, clay minerals and zeolite-type silicates, which are predominantly to be found in particle size ranges below about 20 μm , have the ability to bind heavy metals through ion exchange and, depending on lattice structure and swell characteristics, also to absorb organic substances. However, a concentration of contaminants in the fines is not always the case since a penetration into consolidated clayey layers and agglomerates can be impeded. In addition, organic soil components in form of humus material, peat and wood remnants possess a considerable capacity for adsorption and ion exchange owing to their chemical and physical structure. In an extended sense, these substances, as also applies for clay minerals can be classified as belonging to the gel group; their adsorption capacity is decisively related to their capillary structure and swell behaviour.

Particularly coal and coal products are strong adsorptive substances; while their adsorption capacity for hydrocarbons is related to their carbon, the adsorption of electrolytes must be largely related to inorganic contaminations.

Also porous building materials such as pumice stone, tiles etc, which are frequently encountered in soils as building rubble, reflect a high adsorption capacity for contaminants. Eventually heavy metal compounds of various kinds can occur both free and intergrown in various particle size ranges; these are primarily concerned with fly ash dust, slags, ore particles and precipitation products.

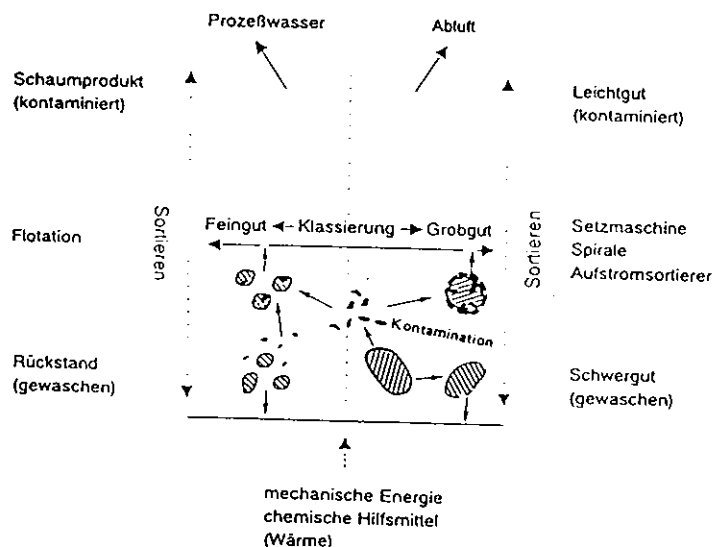


Bild 1: Arbeitsprinzip des Bodenwaschens

Fig. 1: Principle of operation of soil washing

3.2 Über das Auftreten von Schadstoffen in Böden und Konsequenzen für den Waschprozeß

Der Erfolg des Bodenwaschens hängt maßgeblich davon ab, welche Schadstoffe wie und wo in der Bodenmatrix auftreten und wie sie sich beim Waschprozeß umverteilen lassen. So können beispielsweise bereits sehr hohe Konzentrationen von Schadstoffen im Feinstkorn vorhanden sein, das auf Grund seiner großen spezifischen Oberfläche ein starkes Adsorptionsvermögen zeigt. Tonminerale und zeolithartige Silikate, die überwiegend im Korngrößenbereich unter etwa 20 µm zu finden sind, vermögen darüber hinaus Schwermetalle durch Ionenaustausch zu binden und je nach Gitterstruktur und Quelleigenschaften auch organische Stoffe zu absorbieren. Anreicherungen von Schadstoffen im Feinstkorn sind jedoch nicht in jedem Fall anzutreffen, denn ihr Eindringen in verdichtete tonige Schichten und Aggregate kann stark behindert sein. Desweiteren besitzen organische Bodenbestandteile in Form von Humusstoffen, Torf und Holzresten auf Grund ihrer chemischen und physikalischen Struktur ein beträchtliches Adsorptions- und Ionenaustauschvermögen. Im erweiterten Sinne lassen sich diese Stoffe, wie übrigens auch die Tonminerale, den Gelen zuordnen; ihr Adsorptionsvermögen gegenüber Molekülen und Mizellen wird maßgeblich vom Kapillarbau und Quellverhalten bestimmt.

Zu den starken Adsorbentien sind insbesondere auch Kohle und Kohleprodukte zu zählen; während ihr Adsorptionsvermögen gegenüber neutralen Kohlenwasserstoffen dem Kohlenstoff zuzuschreiben ist, dürfte die Aufnahme von Elektrolyten vor allem an anorganische Verunreinigungen geknüpft sein.

Auch poröse Baustoffe, wie z. B. Bims, Ziegel u. ä., die als Bauschutt häufig in Böden angetroffen werden, weisen eine hohe Aufnahme-fähigkeit gegenüber Schadstoffen auf. Schließlich können Schwermetallverbindungen verschiedenster Art frei und verwachsen in unterschiedlichen Korngrößen auftreten; dabei handelt es sich vornehmlich um Flugstäube, Schlacken, Erzpartikel und Fällungsprodukte.

Ist die Schadstoffbelastung in starkem Maße vorwiegend an bestimmte Bodenkomponenten mit geringen Massenanteilen gebunden, so läßt sich durch Abtrennen dieser Bestandteile mittels Klassieren und Sortieren ein deutlicher Wascheffekt erzielen. Dieser Reinigungsprozeß könnte als „passives Waschen“ bezeichnet werden. Dabei lassen sich umfangreiche Erfahrungen aus der Rohstoffaufbereitung nutzen. Besonders die Feinstkornsor-tierung durch Flotation erfordert jedoch noch intensive Forschungsarbeit, um bezüglich der Reagenzwahl und der Prozeßgestaltung optimale Lösungen zu finden.

Das „aktive Waschen“ ist demgegenüber mit einem Austausch oder Übergang von Schadstoffen zwischen fester und flüssiger Phase sowie zwischen verschiedenen Bodenbestandteilen verbunden. Dies geschieht teilweise nach Gesetzen der Thermodynamik, teilweise durch die Wirkung mechanischer Energie. Einbegriffen ist der Kornabrieb, wodurch belastete Feinstschlämme entstehen. Das „aktive Waschen“ kann durch chemische Hilfsstoffe und feste Aktivstoffe sowie durch Wärmezufuhr unterstützt werden. Diese recht komplexen Vorgänge müssen ebenfalls noch eingehender untersucht werden.

Das Institut für Aufbereitung, Kokerei und Brikettierung der RWTH Aachen ist dabei, wichtige Grundlagen des Bodenwaschens zu erarbeiten; dabei werden zunächst organische Schadstoffe im Mittelpunkt stehen, aber auch die anorganischen Belastungen einbezogen.

3.3 Zur Methodik von Grundlagenuntersuchungen

Organische Bodenbelastungen können aus einer Fülle verschiedenartiger Stoffe bestehen. Wegen der Komplexität und Nichtreproduzierbarkeit natürlicher Bodenkontaminationen ist es not-

Should the contamination, to a large extent, be bound primarily to certain soil components of low mass proportions, a distinct wash effect can be achieved by separation of these components by means of classifying and sorting. This process can be described as "passive washing". The vast experience from raw material processing can be utilized for this. Particularly the sorting of very fine particles by means of flotation still requires intensive research in order to obtain optimum solutions for reagent selection and process performance.

In comparison, "active washing" is related to an exchange or transition of contaminants between solid and liquid phase as well as between various soil components. This takes place partially according to laws of thermodynamics, partially by the action of mechanical energy. Included is particle abrasion which results in superfine contaminated slurries. "Active washing" can also be enhanced by chemical reagents and active solid substances as well as heat input. These rather complex process will also have to be investigated in more detail.

The Institute of Mineral Processing, Coking and Briquetting of the RWTH Aachen is currently developing important fundamentals for soil washing; this will first be focussed on organic contaminants but will also include inorganic contaminations.

3.3 Methods for fundamental investigations

Organic contamination of soil can consist of a host of very different substances. Owing to the complexity and non-reproducibility of natural soil contamination it is necessary for fundamental investigations to develop model-type systems of materials which are then conditioned and washed according to suitable reproducible processes. Only in this manner can be mechanisms of soil washing and important connections be clearly recognized. A simple and reliable analysis is warranted when the contaminant is marked radioactively. This requires a radioisotope laboratory; the institute disposes of such a facility.

Among others, this concept was used in a completed research project for reaction behaviour of reagents for hard coal flotation. As a rather unintentional result from these investigations, which are also to answer important questions of environmental burdens, some valuable information can be gained, on washing of oil-contaminated soil [4]. A report is made on this in the following.

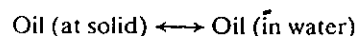
3.4 Washing mechanisms for oil-contaminated soil

Apart from molecular-adsorbed hydrocarbons whose proportion is extremely low for low water solubility of oils, the oily contaminations considered here are partially in form of paste-solid dirt particles, partially as liquid phase in form of droplets or fleece. These particles can be adsorbed to the solid by surface tension and also by mechanical binding. For the liquid phase, the adhesion energy can be described by the surface tensions as well as the contact angle, as shown in Fig. 2:

$$E_{Ad.} = \sigma_{w/o} + \sigma_{F/w} - \sigma_{F/o} = \sigma_{w/o} (1 + \cos \Theta)^* \quad (1)$$

Here the contact angle is measured in oil. For the desorption of oil, the adhesion energy must be overcome; if this is higher than the cohesion energy, oil residues will remain adhered to the solid.

It can be assumed that for washing, distribution equilibria will be strive for dependent upon the hydrodynamic conditions [5]:



*) Symbols are explained at the end of this contribution.

wendig, für Grundlagenuntersuchungen modellartige Stoffsysteme heranzuziehen, die nach geeigneten, reproduzierbaren Verfahren konditioniert und gewaschen werden. Nur so lassen sich die Mechanismen des Bodenwaschens und wichtige Zusammenhänge eindeutig erkennen. Eine einfache und sichere Analytik ist gewährleistet, wenn die Schadstoffe radioaktiv markiert sind. Dazu ist ein Isotopenlaboratorium erforderlich, über das das Institut verfügt.

Dieses Konzept wurde u. a. in einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben zum Reaktionsverhalten von Reagenzien für die Steinkohleflotation angewendet. Aus diesen Untersuchungen, die auch wichtige Fragen zur Umweltbelastung beantworten sollen, lassen sich als eher unbeabsichtigtes Nebenergebnis bereits einige wertvolle Informationen zum Waschen ölbelasteter Böden gewinnen [4]. Darüber soll im folgenden berichtet werden.

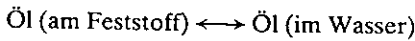
3.4 Über Waschmechanismen bei ölbelasteten Böden

Abgesehen von molekular adsorbierten Kohlenwasserstoffen, deren Anteil bei sehr geringer Wasserlöslichkeit der Öle extrem niedrig ist, können die hier betrachteten öligen Kontaminationen teils in Form pastös-fester Schmutzteilechen, teils als flüssige Phase in Gestalt von Tröpfchen oder Häutchen vorliegen. Diese Partikel können durch Grenzflächenkräfte am Feststoff adsorbiert und auch mechanisch eingebunden sein. Für die flüssige Phase läßt sich, wie Bild 2 zeigt, die Adhäsionsenergie durch die Grenzflächenspannungen sowie mit Hilfe des Randwinkels beschreiben:

$$E_{Ad.} = \sigma_{w/o} + \sigma_{F/w} - \sigma_{F/o} = \sigma_{w/o} (1 + \cos \Theta)^* \quad (1)$$

Der Randwinkel ist hier im Öl gemessen. Bei der Desorption des Öls muß diese Haftenergie überwunden werden; ist sie größer als die Kohäsionsenergie, werden Ölreste am Feststoff haften bleiben.

Es ist davon auszugehen, daß beim Waschen in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Bedingungen Verteilungsgleichgewichte angestrebt werden [5]:



Das Gleichgewicht sollte von beiden Richtungen her zu erreichen sein. Bei makroskopischen Partikeln spielt die Agitation der Trübe eine ähnliche Rolle wie die Temperatur bei molekularen Teilchengrößen. Etwas über diese Gleichgewichte und wichtige Einflußgrößen zu erfahren, ist das Ziel erster Untersuchungen, die sich auf Versuchsergebnisse aus der oben erwähnten Forschungsarbeit stützen.

*) Die Formelzeichen sind in einer Tabelle am Ende des Aufsatzes erklärt.

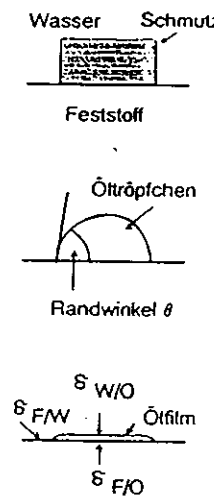


Bild 2: Adsorption von Öl an Feststoffen

Fig. 2: Adsorption of oil to solids

This equilibrium should be able to be attained from both directions. For macroscopic particles, the agitation of the suspension plays a similar role as the temperature for molecular particle sizes. To learn these equilibria and important parameters is the objective of these investigations; these are based on the test results from the research work mentioned above.

Tetradecane, marked with C-14, first served as an insoluble, non-polar hydrocarbon. Quartz and clayey shale of various particle size were used as representing hydrophilic mineral substances. Glas coal was used as representing hydrophobic material. Important characteristic values are listed in Table 2. The coal surface concerns calculated values which characterize the outer particle surface.

Paraffin oil was emulsified very finely by adding an emulsifier (carbonic acid glycerine ester) and subsequently brought into contact with the solids in an agitator cell. The solid concentration was 100 g/l, oil addition was varied between 50 and 1000 mg per kilogram solid. Agitator speed was 500 RPM. Approximate adsorption equilibria occurred after 10 minutes at the latest. Subsequently oil concentrations in water and solid were measured radiometrically. The equilibria can be characterized by means of distribution coefficients (= ratio of oil concentrations at solid in mg/kg and in water in mg/ml). As shown in Table 3, they are strongly dependent on type of material and particle size.

As expected, coal possesses an extremely high adsorption capacity for non-polar oil; but also the hydrophilic substances reveal a high binding capacity. Thus under the prevailing conditions, oil concentrations of up to 100 mg/kg were measured even at the quartz coarse particles; this corresponds to a mean film thickness of about $2.2 \cdot 10^{-6}$ cm which is to play a role in later discussions. The concentration value of 100 mg/kg is limit value A for mineral oils acc. to the Holland list.

Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Stoffe
Table 2: Characteristic values of substances used

Stoff	Dichte	Körnung	mittlerer Durchmesser d ₅₀ /μm	spez. Oberfläche
Material	Density g/cm ³	Particle size μm	mean diameter	specific surface m ² /g
Quarz Quartz	2,65	315-400	357	≈ 6 x 10 ⁻³
		< 150	78	0,38
Tonschiefer Clay shale	2,67	315-400		≈ 6 x 10 ⁻³
Gaskohle Gas coal	1,36	315-400	357	≈ 1,2 x 10 ⁻²
		< 150	70	0,37

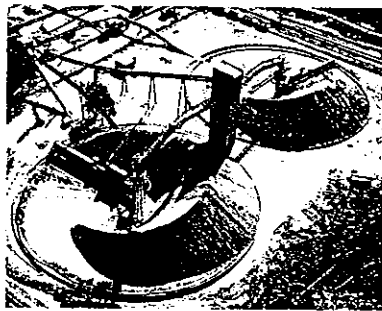
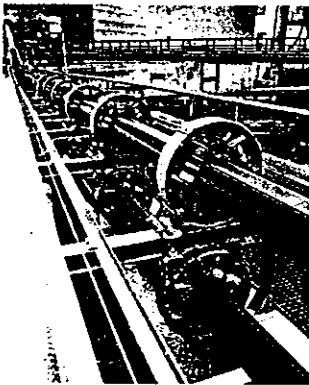
Lagern, Homogenisieren und Transportieren in der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie.

PWH hat umfassendes Know-how in allen Bereichen des Materials Handling.

Anlagen und Systeme von PWH haben weltweit einen hohen Standard. Sie sprechen für zukunftsweisendes Engineering und hohe Wirtschaftlichkeit. Das zeigen zum Beispiel die Mischbetтанlagen mit Brückenkratzern in Kreis- oder Längslagern, in überdachter oder offener Bauweise. Sie ermöglichen einen konstanten Fluß homogenen Materials. Die Abbaukratzer,

als Portal- oder Seitenkratzer, Bandanlagen, Rollgurtförderer und Materialseilbahnen. Die Schiffsentlader und Schiffsbelader.

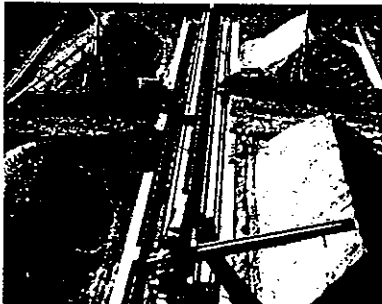
Rollgurtförderer zum umweltfreundlichen, geschlossenen Transport vorgetrockneter Kreide.



Materialseilbahn für den Transport von Magnesit.



Doppel-Mischbett Längslager mit Brückenkratzern für schwerrieselnden Kalkstein und Mergel.

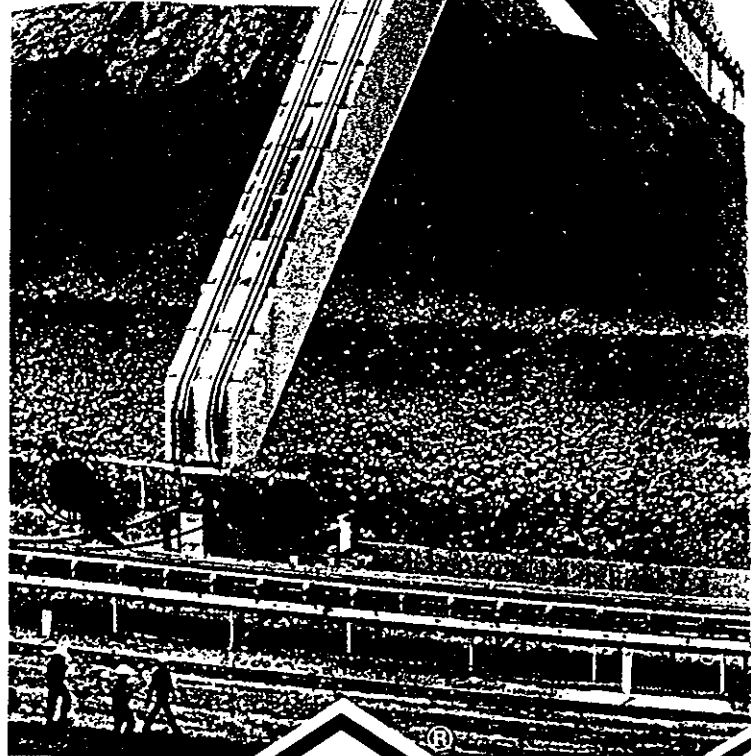


Mischbetтанlage mit Trommel-
aufnahmeggerät in einem
Kalkwerk.

PWH

Großes Doppel-Rundlager mit Brückenkratzern zur Homogenisierung von Kalkstein.

Vollportalkratzer mit Doppelkratzerkette in einem Zementwerk.



O&K

Engelragenes
Warenzeichen

PWH Anlagen + Systeme GmbH, Postfach 2 60, D-6670 St. Ingbert-Rohrbach, Germany, Tel. (0 68 94) 5 99-0
In Großbritannien: PWH Materials Handling Ltd., Watford Village, Northampton NN6 7XN, Tel. (3 27) 70 56 21
In Frankreich: Constructions Mécaniques O&K HAZEMAG S.A., B.P. 5 37, F-57205 Sarreguemines Cédex, Tel. (87) 98 73 73
In den U.S.A.: Robins Engineers & Constructors Inc., 7730 East Belleview Ave., Englewood, CO 80111, Tel. (3 03) 7 70-08 08
In Australien: O&K Plant & Systems Pty. Ltd., P.O.B. 414, Bentley, W.A. 6102, Tel. (9) 3 16 30 11

PWH: Ein Unternehmen der O&K-Gruppe.

Als Vertreter unlöslicher, unpolare Kohlenwasserstoffe dient zunächst Tetradecan, das mit C-14 markiert war. Als Feststoffe wurden Quarz und Tonschiefer als Vertreter hydrophiler mineralischer Stoffe sowie Kohle als Vertreter hydrophober Stoffe in verschiedenen Körnungen verwendet. Wichtige Kennwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt. Bei der Kohlenoberfläche handelt es sich um berechnete Werte, die die äußere Kornoberfläche kennzeichnen.

Das Paraffinöl wurde unter Zusatz eines Emulgators (Carbonsäureglycerinester) feinst emulgiert und anschließend in einer Rührzelle mit den Feststoffen in Kontakt gebracht. Die Feststoffkonzentration betrug 100 g/l, und die Ölzugabe wurde zwischen 50 und 1000 mg je Kilogramm Feststoff variiert. Die Rührerdrehzahl betrug 500/min. Spätestens nach etwa 10 Minuten stellten sich annähernd Adsorptionsgleichgewichte ein. Danach wurden die Ölkonzentrationen im Wasser und am Feststoff radiometrisch gemessen. Die Gleichgewichte lassen sich mit Hilfe von Verteilungskoeffizienten (= Verhältnis der Ölkonzentrationen am Feststoff in mg/kg und im Wasser in mg/l) kennzeichnen. Sie hängen, wie Tabelle 3 zeigt, in starkem Maße von Stoffart und Körnung ab.

Wie erwartet, besitzt Kohle ein sehr großes Adsorptionsvermögen gegenüber dem unpolaren Öl; aber auch die hydrophilen Stoffe weisen noch eine hohe Bindungsfähigkeit auf. So konnten unter den gegebenen Bedingungen selbst an der groben Quarzkörnung Ölkonzentrationen bis 100 mg/kg gemessen werden; dies entspricht einer mittleren Filmdicke von rund $2,2 \cdot 10^{-6}$ cm, die in den späteren Erörterungen noch eine Rolle spielen wird. Dieser Konzentrationswert von 100 mg/kg ist der Grenzwert A für Mineralöle nach der Holland-Liste.

Mit zunehmender Kornfeinheit steigen die Verteilungskoeffizienten drastisch an und zwar wesentlich stärker, als es dem Oberflächenzuwachs entspricht. Dabei werden gleichzeitig die Unterschiede zwischen Kohle und Quarz geringer. Bei direktem Wettbewerb tritt die Selektivität jedoch wieder deutlich hervor. Wie Bild 3 zeigt, wird bei der Kohleflotation das Öl nahezu quantitativ an Kohle gebunden.

Tonschiefer weist auf Grund seiner hohen Wasseraffinität eigentlich eine geringere Adsorptionsfähigkeit gegenüber dem Öl auf als Quarz; da sich aber die Tonminerale im Verlauf der Konditionierung in sehr feine Teilchen auflösen beginnen, steigt der Verteilungskoeffizient ständig an und wird erst nach längerer Zeit einen Grenzwert erreichen. Es wird deutlich, daß Feinstkorn als starker Ölsammler im Waschprozeß wirkt.

Tabelle 3: Verteilungskoeffizienten für emulgiertes Tetradecan in Feststoffsuspensionen bei Agitation mit einem Dreiblattpropeller-rührer (500 U/min); Feststoffgehalt 100 g/l; Ölzugabe: 250–1000 mg/kg; Emulgatorzusatz (Carbonsäureglycerinester): 3 Gew.-%

Table 3: Distribution coefficients for emulsified tetradecane in solids suspensions with agitation using a triple-blade propeller agitator (500 RPM); solids constant 100 g/l; oil addition: 250–1000 mg/kg, emulsifier addition (carbonic acid glycerine ester): 3% by wt.

Feststoff Solid	Verteilungskoeffizient Distribution coefficient		
Quarz/Quartz 315–400 μm	1,5		
Quarz/Quartz < 150 μm	1×10^4		
Kohle/Coal 315–400 μm	$1,2 \times 10^2$		
Kohle/Coal < 150 μm	2×10^4		
Tonschiefer/Clay-shale < 315–400 μm	2 min 0,6	15 min 3,2	30 min 7,0

Alkangehalt i. Rückst. [mg/kg]

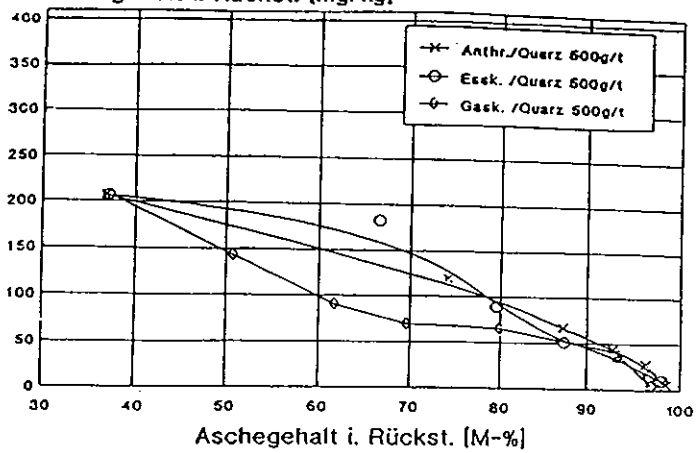


Bild 3: Flotation von Kohle-Quarz-Gemischen; Paraffingehalt im Flotationsrückstand in Abhängigkeit vom Aschegehalt [3]

Fig. 3: Flotation of coal-quartz mixtures; paraffin content in flotation residue as a function of ash content [3]

The distribution coefficients increase drastically with increasing particle fineness, i. e. considerably more than corresponding to the surface increase. Simultaneously, the difference between coal and quartz becomes less. However, in direct competition the selectivity come to the foreground. Fig. 3 shows that for coal flotation, oil is bound to coal almost quantitatively.

Owing to its high affinity to water, clayey shale actually reveals a lower adsorption capacity of oil than quartz; since the clay minerals commence a solution into very fine particles in the course of conditioning, the distribution coefficient continues to rise constantly and a limiting value is first attained after a longer time. It becomes evident that very fine particles act as a strong oil collector in the washing process.

How can these experimental observations be described in terms of a model? For the given reaction system, the impact number of solid particles and oil droplets per volume and time unit can be calculated according to the following formula [6]:

$$Z_{Fo} = \left[\frac{8\pi}{15} \right]^{1/2} n_F \cdot n_{ow} d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} \quad (2)$$

With this, the adsorption kinetics can be formulated as follows

$$-\frac{dn_{ow}}{dt} = W_{Ad} n_{ow} n_F d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} - k_{Des} n_{oF} \quad (3)$$

For equilibrium, the following is obtained

$$W_{Ad} n_{ow} n_F d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} = k_{Des} n_{oF} \quad (4)$$

$$\text{With } d_{Fo} = \frac{d_F + d_o}{2} \approx d_F (d_F \gg d_o) \quad (4)$$

$$n \sim m/V \text{ and}$$

$$n_F \sim \frac{m_F}{V d_F^3}$$

from this the following distribution coefficient is obtained

$$K = \frac{m_{oF}}{m_F} : \frac{m_{ow}}{V} = \frac{W_{Ad}}{k_{Des}} (\epsilon/v)^{1/2} \quad (5)$$

Wie lassen sich die experimentellen Beobachtungen modellartig beschreiben? Für das gegebene Reaktionssystem kann die Stoßzahl der Feststoffteilchen und Öltröpfchen je Volumen- und Zeiteinheit nach folgender Formel berechnet werden [6]:

$$Z_{Fo} = \left[\frac{8\pi}{15} \right]^{1/2} n_F \cdot n_{ow} d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} \quad (2)$$

Damit läßt sich die Adsorptionskinetik folgendermaßen formulieren:

$$-\frac{dn_{ow}}{dt} = W_{Ad} n_{ow} n_F d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} - k_{Des} n_{oF} \quad (3)$$

Für das Gleichgewicht ergibt sich dann die Beziehung:

$$W_{Ad} n_{ow} n_F d_{Fo}^3 (\epsilon/v)^{1/2} = k_{Des} n_{oF} \quad (4)$$

$$\text{Mit } d_{Fo} = \frac{d_F + d_o}{2} \approx d_F (d_F \gg d_o) \quad (4)$$

$$n \sim m/V \text{ und}$$

$$n_F \sim \frac{m_F}{V d_F^3}$$

erhält man daraus den Verteilungskoeffizienten:

$$K = \frac{m_{oF}}{m_F} : \frac{m_{ow}}{V} = \frac{W_{Ad}}{k_{Des}} (\epsilon/v)^{1/2} \quad (5)$$

Die Adsorptionswahrscheinlichkeit W_{Ad} wird mit der Haftenergie zunehmen; sie wird sich andererseits verringern, wenn sich die Energiebarriere bei der Annäherung der Öltröpfchen an den Feststoff erhöht. Diese kann durch entsprechende Agitation der Trübe überwunden werden. Bei zu starker örtlicher Energiedichte wird dagegen die Entstehung stabiler Kontakte wiederum verhindert. In Abhängigkeit von den Grenzflächeneigenschaften wird daher ein günstiger Bereich der Energiedissipation existieren, in dem die Haftwahrscheinlichkeit besonders groß ist. Maßgebend für das Ablösen des Öls von den Feststoffoberflächen sind die an den gegenüberliegenden Kornoberflächen angreifenden Schubspannungen. Für den hier betrachteten Turbulenzbereich kann die Schubspannung durch folgende Formel ausgedrückt werden [6]:

$$\tau = \rho_{Fl} \bar{v}^2 \approx 1,9 (\epsilon d)^{2/3} \rho_{Fl} \quad (6)$$

Da die Desorption des Öls nur erfolgen kann, wenn die Schubarbeit größer wird als die Adhäsionsenergie, erhält man als Kriterium eine der Weberzahl analoge Beziehung:

$$\frac{1,9 \epsilon^{2/3} d^{5/3} \rho_{Fl}}{E_{Ad}} = \text{const.} \quad (7)$$

Sie besagt, daß eine kritische Korngröße existiert, unter der bei den gegebenen hydrodynamischen Beanspruchungsbedingungen die Öl-Korn-Aggregate weitgehend stabil bleiben:

$$d_{krit.} \approx \text{const.}^{3/5} \frac{E_{Ad}^{3/5}}{\rho_{Fl}} \epsilon^{-2/5} \quad (8)$$

Als Stabilitätskriterium für Kornaggregate wird eine ähnliche Beziehung in der Literatur angegeben [7]:

$$d_{krit.} \approx \rho_{Fl} \frac{(d\epsilon)^{2/3}}{F_A/d^2} = \text{const.} \quad (9)$$

Darin bedeutet F_A die Haftkraft zwischen den Einzelpartikeln. Diese Formel ist für die Dispergierung feiner Kornaggregate von Bedeutung. Für turbulente Strömungen wurde für die Konstante (= kritische Weberzahl) ein Wert von 0,15 ermittelt.

The adsorption probability W_{Ad} will increase with increasing adhesion energy; on the other hand it will be decreased when the energy barrier increases for the approach of the oil droplet to the solid. This can be overcome by the respective agitation of the suspension. However, for an unduly high local energy density, a formation of stable contacts is prevented. In relation to the interfacial properties, a favourable range of energy dissipation will thus exist where the adhesion probability will be particularly high. Decisive for the dissociation of oil from the solid surfaces is the shear stress acting at the opposite particle surfaces. For the turbulence range observed here, the shear stress can be expressed by the following formula [6]:

$$\tau = \rho_{Fl} \bar{v}^2 \approx 1,9 (\epsilon d)^{2/3} \rho_{Fl} \quad (6)$$

Since the desorption of oil can only take place when the shear work exceeds the adhesion energy, a relation analog to the Weber number is obtained as criterion:

$$\frac{1,9 \epsilon^{2/3} d^{5/3} \rho_{Fl}}{E_{Ad}} = \text{const.} \quad (7)$$

It means that a critical particle size exists at which, under the prevailing hydrodynamic stress conditions, the oil-particle aggregates remain largely stable:

$$d_{krit.} \approx \text{const.}^{3/5} \frac{E_{Ad}^{3/5}}{\rho_{Fl}} \epsilon^{-2/5} \quad (8)$$

A similar relation is provided in the literature [7] a stability criterion for particle aggregates:

$$d_{krit.} \approx \rho_{Fl} \frac{(d\epsilon)^{2/3}}{F_A/d^2} = \text{const.} \quad (9)$$

Where F_A represents the force of adhesion between the individual particles. This formula is of significance for the dispersing of fine particle aggregates. For turbulent flow, a value of 0.15 was determined for the constant (= critical Weber number).

In agitator cells as used for flotation, the mean energy dissipation $\bar{\epsilon}$ amounts to several W/kg, where the local values of ϵ can be up to 30 times higher. Using formula (1) for adhesion energy, at a local energy dissipation of 100 W/kg and an interfacial tension of 45 dyn/cm between paraffin oil and water, the relation between the critical particle size and contact angle θ is obtained as shown in Fig. 4. Here a value of 1 was substituted for the constant in formula (8).

Depending on test conditions, a contact angle between 90° and 180° was observed for quartz; for coal, values amounted to 35° to 135°. The contact angle increases with increasing hydration strength and rising emulsifier concentration in water. The results of

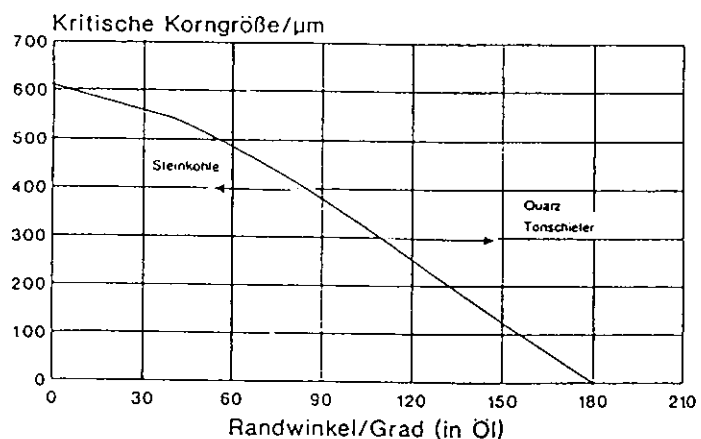


Bild 4: Kritische Korngröße in Abhängigkeit vom Randwinkel

Fig. 4: Critical particle size as a function of contact angle

In Rührwerkszellen, wie sie in der Flotation verwendet werden, beträgt die mittlere Energiedissipation $\bar{\epsilon}$ einige W/kg, wobei die örtlichen Werte ϵ bis zum Dreißigfachen höher liegen. Mit Formel (1) für die Haftenergie ergibt sich bei einer örtlichen Energiedissipation von 100 W/kg und einer Grenzflächenspannung zwischen Paraffinöl und Wasser von 45 dyn/cm der im Bild 4 dargestellte Zusammenhang zwischen der kritischen Korngröße und dem Randwinkel θ . Dabei wurde für die Konstante in Formel (8) der Wert 1 eingesetzt.

An Quarz wurden je nach Versuchsbedingungen Randwinkel zwischen 90° und 180° beobachtet; bei Kohle betragen die Werte 35° bis 135°. Die Randwinkel werden mit zunehmender Hydratationsstärke und steigender Emulgatorkonzentration im Wasser größer. Die Ergebnisse der Adsorptionsuntersuchungen bestätigen recht gut die theoretischen Aussagen zur kritischen Korngröße, denn es zeigte sich, daß an Quarz Desorptionsprozesse in größerem Ausmaß erst bei Korngrößen über etwa 100 μm zu erwarten sind. Daß in der Tat eine Desorption und Umverteilung des Öls bei größerem Quarzkorn (315–400 μm) erfolgt, konnte u. a. dadurch nachgewiesen werden, daß nach der Kontamination mit Öl der Quarz zusammen mit frischer Kohle gleicher Körnung in einer Rührzelle konditioniert wurde; dabei stellte sich ein neues Verteilungsgewicht ein, das in etwa den Adsorptionsaffinitäten beider Stoffe entspricht. Bei Kohle liegt die kritische Korngröße auf Grund der stärkeren Haftkräfte wesentlich höher; sie dürfte nach den bisherigen Untersuchungen mehr als 500 μm betragen.

Es muß bei diesen Betrachtungen stets bedacht werden, daß, abgesehen vom Energieeintrag und von der Haftenergie, die Korngrößenverteilung sowie auch das Ausmaß der Ölbelastung von Bedeutung sind. Zur genauen Klärung der komplexen Zusammenhänge sind weitere Untersuchungen erforderlich.

3.5 Schwierige Ölfilme

Bisher wurde stillschweigend davon ausgegangen, daß bei der Desorption des Öls eine weitgehend ölfreie Feststoffoberfläche zurückbleibt. Dies ist jedoch im allgemeinen nicht zutreffend. Aus dem Schrifttum ist bekannt, daß je nach Benetzungstärke eine vollständige Ablösung des Öls kaum möglich ist. So konnten an ölbetetzten Glasoberflächen auch nach sehr starker hydrodynamischer Scherbeanspruchung noch Restfilmdicken in der Größenordnung von 10^{-6} cm gemessen werden [8]. Dies entspricht etwa der Reichweite der *van der Waals*-Kräfte.

Zur quantitativen Entfernung des Öls sollen relativ große Tensidmengen nötig sein. Falls das Bodenkorn stark von Öl benetzt ist, dürfte dieser sehr fest haftende Restfilm das Waschergebn maßgeblich mitbestimmen, wie später noch anhand eines praktischen Beispiels gezeigt werden kann.

Legt man diese Restfilmdicke von 10^{-6} cm zugrunde, so ergibt sich für Tetradecan eine Massenbelegung von 7,6 mg/m². Im Bild 5 ist dementsprechend die verbleibende Ölbelastung des Feststoffs in Abhängigkeit von dessen spezifischer Oberfläche bzw. Sauter-Durchmesser des Kornes dargestellt. Um z. B. den Grenzwert von 100 mg/kg zu unterschreiten, müßte das gewaschene Produkt eine spezifische Oberfläche von weniger als etwa 0,015 m²/g aufweisen. Die Feststoffdichte beträgt dabei 2,65 g/cm³.

Dies könnte ein erster Richtwert für die Trennkorngröße bei der Wäsche stark ölverschmutzter Böden sein. An dieser Restbelastung ließe sich in bestimmten Fällen auch der Wascherfolg messen.

3.6 Zum Einsatz chemischer Hilfsmittel beim Bodenwaschen

Chemische Hilfsmittel, vor allem Detergentien, werden teilweise bereits beim Bodenwaschen eingesetzt. Genauere Angaben über Art, Dosierung und Wirkung dieser Hilfsmittel liegen jedoch meistens nicht vor; systematische Untersuchungen sind bisher offensichtlich kaum durchgeführt worden.

adsorption measurement confirm quite well the theoretical statements on critical particle size since it was observed that, for quartz, desorption remarkable is to be anticipated for particle sizes exceeding approx. 100 μm . That in fact a desorption and redistribution of oil takes place for coarser quartz (315–400 μm) was able to be proved, among others, by conditioning. After contaminating the quartz with oil, it was conditioned together with fresh coal of equal particle size in an agitator cell; a new distribution ratio was obtained which corresponded approximately to the adsorption affinities of both substances. Owing to the stronger forces of adhesion at coal, its critical particle size is considerably larger, based on current investigations it should amount to more than 500 μm .

It must always be considered for these views that, apart from energy input and adhesion energy, both particle size distribution and the extent of oil contamination are of significance. Further investigations will be required for an exact elucidation of the complex connections.

3.5 Difficult oil films

Previously it had been tacitly assumed that, for desorption of oil, a largely oil-free solid surface remains. However, this will generally not apply. From literature is known that, depending on wetting force, a complete detaching of the oil will hardly be possible. Thus for oil-wetted glass surfaces after extremely strong hydrodynamic shear action, residual film thicknesses of the magnitude of 10^{-6} cm were still measured [8]. This corresponds approximately to the range of *van der Waals*' forces.

Relatively large quantities of surfactants should be required for the quantitative removal of this oil. Should the soil particles be strongly wetted by oil, this very strongly adhering residual film should have a decisive effect on the washing result, as is later demonstrated using a practical example.

Assuming this residual film thickness to be 10^{-6} cm, this results in a mass allocation of 7.6 mg/m² for Tetradecane. Accordingly, the remaining oil on the solid is represented in Fig. 5 as a function of specific surface resp. Sauter diameter of the particles. For instance, to fall below the limiting value of 100 mg/kg, the washed product would have to possess a specific surface of less than 0.015 m²/g. The solid density for this would be 2.65 g/cm³.

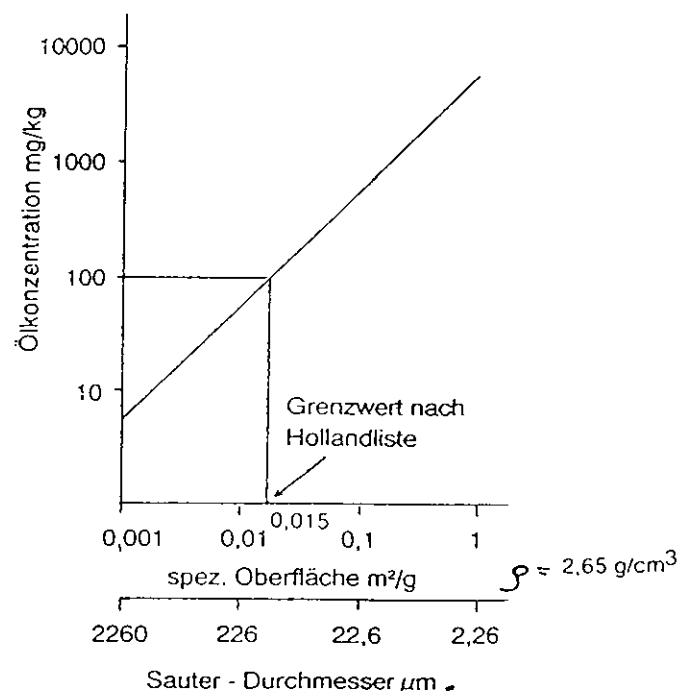


Bild 5: Restfilmbeladung in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche

Fig. 5: Residual film as a function of specific surface



Bild 6: Detergenzwirkung bei der Ölferrnung von Fasern [9]

Fig. 6: Detergent effect for oil removal from fibres [9]

Daher können hier auch nur einige allgemeine Betrachtungen angestellt werden. Bei Detergentien lassen sich vier Wirkmechanismen unterscheiden:

- Solubilisierung, indem die Detergentien in wäßriger Lösung Mizellen bilden, in denen Öl gelöst wird.
- Spontanes Emulgieren durch starke Herabsetzung der Grenzflächenspannung Öl/Wasser als Folge der Adsorption von Detergentien an der Öloberfläche.
- Aufrollen von Ölfilmen und anschließendes Ablösen der gebildeten Öltröpfchen, das spontan und unterstützt durch mechanische Beanspruchung erfolgt.
- Stabilisierung der suspendierten Öl- und Schmutzteilchen, um sie an der Readsorption zu hindern.

Das Aufrollen von Ölfilmen wird in Bild 6 veranschaulicht. Eine spontane Desorption des Öls sollte eintreten, wenn die Haftenergie $E_{Ad} \leq 1$ wird; daraus ergibt sich die Bedingung:

$$\sigma_{F/o} \geq \sigma_{W/o} + \sigma_{FW} \quad (10)$$

Spontanes Emulgieren setzt voraus, daß die Grenzflächenspannung Öl/Wasser extrem klein wird. So läßt sich z. B. Paraffinöl spontan emulgieren, wenn es mit einer wäßrigen Lösung von Kalium-m-dioxyphenylsulfonat in Kontakt gebracht wird. Die Grenzflächenspannung beträgt dabei weniger als 0,1 dyn/cm [9, 10].

In Testversuchen wurde die Wirkung des hier verwendeten Emulgators (Carbonsäureglycerinester) auf die Öladsorption an verschiedenen feinkörnigen Stoffen bei hoher Dosierung untersucht.

Anhand der in Tabelle 4 aufgeführten Verteilungskoeffizienten ist zu erkennen, daß die Wirkung des Emulgators mit zunehmender Kornfeinheit deutlich abnimmt. Das Ergebnis unterstreicht erneut die besondere Bedeutung der Korngröße bei der Bodenwäsche. Es zeigt aber auch, daß der Emulgator für diesen Zweck nicht geeignet ist.

4. Beispiele von Waschverfahren

Es sind inzwischen zahlreiche Waschverfahren bekannt, die teils in Pilotversuchen getestet, teils auch in Großversuchen eingesetzt werden [11, 12]. Sie weisen z. T. viele Gemeinsamkeiten auf; es sind aber auch große Unterschiede in der verwendeten Technik feststellbar. Stellvertretend soll an zwei typischen Beispielen die derzeitige Praxis des Bodenwaschens vorgestellt und erörtert werden.

This could be an initial reference value for the separation size for washing of highly oil-polluted soils. In certain cases, the residual oil film could also be used for evaluating wash success.

3.6 Application of chemical reagents for soil washing

Chemical aids, particularly detergents, are already being used to some extent for soil washing. However, precise details on type, addition and action of these aids are mostly not available, and systematic investigations have obviously hardly been conducted.

Thus it is only possible here to go into some general considerations. For detergents, four action mechanisms are distinguished between:

- Solubilizing, where detergents form micelles in which the oil is dissolved.
- Spontaneous emulsifying by a strong reduction of oil-water interfacial tension as result of adsorption of detergents at the oil surface.
- Rolling up of oil films and subsequent detaching of oil droplets formed, which takes place spontaneously and is aided by mechanical action.
- Stabilization of the suspended oil and contaminant particles to prevent a readsorption.

The rolling up of oil films is illustrated in Fig. 6. A spontaneous desorption of oil should occur when the adhesion energy $E_{Ad} \leq 1$; this results in the condition

$$\sigma_{F/o} \geq \sigma_{W/o} + \sigma_{FW} \quad (10)$$

Spontaneous emulsifying requires that the oil-water interfacial tension becomes extremely low. For instance, paraffin oil can be emulsified spontaneously when it comes into contact with an aqueous solution of potassium-m-dioxyphenyl sulphonate. Here the interfacial tension amounts to less than 0.1 dyn/cm [9, 10].

The action of the emulsifier used here (carbonic acid glycerine ester) on oil adsorption was investigated in tests at high additions using various fine materials.

From the distribution coefficients listed in Table 4 can be recognized that the action of the emulsifier decreases distinctly with increasing particle fineness. The result again underlines the special significance of particle size for soil washing. It also shows that the emulsifier is not suited for this purpose.

Tabelle 4: Verteilungskoeffizienten für emulgiertes Tetradekan in Feststoffsuspensionen bei geringer und hoher Emulgatorzugabe (Carbonsäureglycerinester)

Table 4: Distribution coefficients for emulsified tetradecane in solids suspensions at low and high emulsifier additions (carbonic acid glycerine ester)

Feststoff Solid	Verteilungskoeffizient l/kg Distribution coefficient	
	Tetradekan: 970 mg/kg Tetradekan Emulgator: 30 mg/kg Emulsifier	Tetradekan: 1000 mg/kg Tetradekan Emulgator: 1000 mg/kg Emulsifier
Quarz/Quartz < 100 µm	≈ 10 ⁴	12
Bentonit/Bentonite < 50 µm	> 10 ⁴	≈ 10 ²
Kaolin < 20 µm	> 10 ⁴	≈ 10 ³



Dieses Verfahren wurde u.a. an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Sonderforschungsbereich 188 „Reinigung kontaminierter Böden“ entwickelt und untersucht; es soll sich in erster Linie zur Reinigung ölbelasteter Sandböden eignen, wie sie z.B. im norddeutschen Raum angetroffen werden. Der Stammbaum ist im Bild 7 dargestellt [13].

Ähnliche Verfahren werden von verschiedenen Firmen angewendet. Nach der Suspendierung des Bodenkorns und der Behandlung im Hochdruckstrahlrohr wird durch Klassierung bei geeigneter Trennkorngröße ein „gewaschenes“ Grob- und ein stark kontaminiertes Feingut erzeugt. Letzteres soll durch Extraktions-, Flotations- und biologische Abbauverfahren weiterbehandelt werden.

Nähere Untersuchungsergebnisse liegen zu einem Waschversuch an einem durch Dieselkraftstoff belasteten Sandboden eines Tankstellengeländes in Neumünster vor. Der Kohlenwasserstoffgehalt betrug etwa 1 Gew.-%.

Nach dem Waschen konnten durch Klassierung bei etwa $45 \mu\text{m}$ ein Grobprodukt mit einem Masseanteil von 94 Gew.-% und einem Kohlenwasserstoffgehalt von 250 mg/kg sowie ein Feinprodukt mit einem KW-Gehalt von rd. 17000 mg/kg erzeugt werden. Aus der Massenbilanz des Öls vor und nach der Wäsche ergibt sich, daß das Öl fast vollständig im Boden verblieben ist und lediglich eine Umverteilung vom Grob- zum Feinkorn stattgefunden hat. Die mittlere Dicke des Ölfilms am Grobkorn, die ursprünglich je nach Korngrößenklasse zwischen etwa 0.2 und $1 \mu\text{m}$ lag, betrug nach dem Waschen rd. $0,1 \mu\text{m}$. Trotz des angegebenen hohen Reinigungsgrades von 97%, der sich aus dem Verhältnis der KW-Gehalte im gewaschenen und rohen Sand ergibt, kann die Höhe der Restbelastung angesichts der hohen Energiedissipation im Strahlrohr nicht befriedigen. Der spezifische Energiebedarf dürfte in der Größenordnung von 10 kWh/t und damit, wie im zweiten Beispiel gezeigt wird, noch im Rahmen der bei konventioneller Aufschlußtechnik benötigten Energie liegen. Extrem hoch ist dagegen die örtliche Energiedissipation beim Auftreffen des Strahles auf die Prallelemente; sie dürfte zwischen 10^3 und 10^4 W/kg betragen und liegt damit um 1 bis 2 Zehnerpotenzen über den in Rührzellen anzutreffenden Werten. Offenbar ist für das Ablösen des Öls aber nicht nur die Höhe der Energiedissipation sondern auch die Beanspruchungsdauer von großer Bedeutung. In vielen technischen Prozessen spielt das Wirkungsprinzip eine entscheidende Rolle. Auch dürfte die Art der Beanspruchung von Bedeutung sein; so ist aus der Zerkleinerungstechnik bekannt, daß insbesondere die Prallzerkleinerung in einem Trägermedium im Feinstkornbereich zu erheblichen Energieverlusten führt.

Numerous washing processes are meanwhile known which have been partially tested in pilot units but also on plant-scale basis [11, 12]. To some extent, they reveal many common features, but there are also considerable differences in the technology used. Representatively, the current practice of soil washing is to be presented and discussed using two typical examples.

4.1 Soil washing in high-pressure jet pipe

Among others, this process was developed and investigated at the Technical University of Hamburg at department 188 for special research "Treatment of contaminated soils"; it is supposed to be suitable for decontamination of oil-contaminated sand soil as is found in northern areas of Germany. The flow sheet is shown in Fig. 7 [13].

Similar processes are applied by various companies. After suspension of soil particles and treatment in the high-pressure jet pipe, a "washed" coarse product and a strongly contaminated fine product is obtained by classifying at a suitable separation size. The latter is to be subjected to further treatment using extraction, flotation and biological decomposition processes.

More detailed test results are available for a washing test of a sand soil contaminated by diesel fuel at a service station in Neumünster. The hydrocarbon content was approx. 1% by wt.

After washing a coarse product with a mass proportion of 94% by wt. and a hydrocarbon content of 250 mg/kg and a fine product with a hydrocarbon content of about 17000 mg/kg were obtained by classifying at about $45 \mu\text{m}$. From the mass balance of oil before and after washing, it is seen that the oil is almost completely in the soil and only a redistribution from coarse to fine particles has occurred. The mean thickness of the oil film at the coarse particles, which had originally been between approx. 0.2 and $1 \mu\text{m}$, depending on particle size, was about $0.1 \mu\text{m}$ after washing. In spite of the high degree of decontamination of 97% obtained from the ratio of hydrocarbon contents in washed and raw sand, the extent of residual contamination cannot satisfy in view of the high energy dissipation in the jet pipe. The specific energy consumption may be about 10 kW/t and thus, as shown in the second example, within the scope or energy required for conventional liberating techniques. On the other hand, the local energy dissipation for impact of the jet on the impact elements; should be between 10^3 and 10^4 W/kg and is thus 1 to 2 decimal powers higher than values encountered in agitator cells. Obviously, for the removal of oil, is not only the amount of energy dissipation of significance, but also the duration of action. The principle of action plays a decisive part in many technical processes. The type of mechanical action should also be of importance; it is known from comminution that particularly the impact crushing in a supporting medium leads to considerable energy losses in the very fine size range.

Of disadvantage for the jet pipe treatment is the high rate of wear. However, it may be of advantage that volatile contaminants can be transferred very rapidly to the gas phase. These references may serve as incentive to investigate the mechanical processes of soil washing more intensively.

4.2 Integrated wet soil treatment

As already mentioned previously, classifying, i.e. separation of fines, will in many cases not be sufficient for achieving a satisfactory washing result. This means that sorting process must be incorporated to separate certain highly contaminated soil components. An integrated, flexible process for treatment of extremely heterogeneous soils such as is encountered at sites of coking plants,

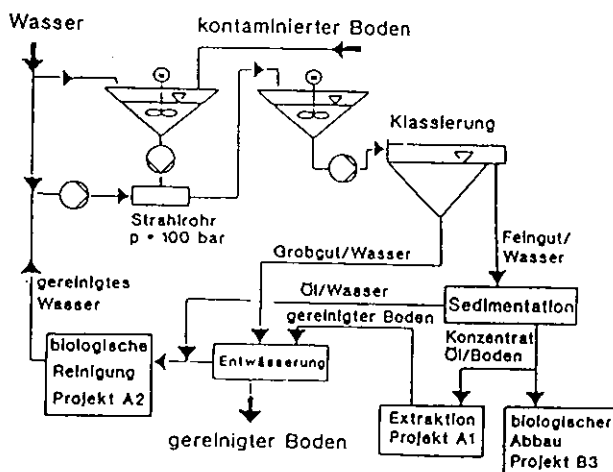


Bild 7: Verfahrensstammbaum der Waschanlage [13]

Fig. 7: Process flow sheet of the washing plant [13]

Nachteilig bei der Strahlrohrbehandlung ist auch der hohe Verschleiß. Von Vorteil mag dagegen sein, daß flüchtige Schadstoffe sehr rasch in die Gasphase gelangen können. Diese Hinweise mögen zum Anlaß dienen, sich noch intensiver mit den mechanischen Trennprozessen beim Bodenwaschen zu beschäftigen.

4.2 Integrierte naßmechanische Bodenaufbereitung

Wie bereits zuvor erwähnt, reicht in vielen Fällen eine Klassierung, d.h. die Abtrennung von Feinstkorn, nicht aus, um ein befriedigendes Waschergebnis zu erzielen. Dies bedeutet, daß Sortierprozesse eingeschaltet werden müssen, um bestimmte hochbelastete Bodenkomponenten abzutrennen. Ein integriertes, flexibles Verfahren zur Aufbereitung von sehr heterogenen und komplex aufgebauten Böden, wie sie z.B. an Standorten von Kokereien, Gaswerken, Hütten und Zechen angetroffen werden, ist u. a. von der Firma Lurgi entwickelt worden. Der Stammbaum des Standardverfahrens ist im Bild 8 dargestellt [14, 15].

Es besteht im wesentlichen aus zwei Attritionsstufen, einer Klassierung bei etwa 1 mm sowie einer Dichtesortierung für das Grobgut und einer Flotation für das Feingut. Eine Wasseraufbereitung ist ebenfalls integriert, so daß im Regelfall kein Abwasser entsteht. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Attritionsprozeß geschenkt. Bei möglichst geringem Energieeintrag und schonender Kornbehandlung in den Attritionstrommeln sollen eine weitgehende Desagglomeration und Suspenderung der Bodenteilchen sowie ein Abrieb der kontaminierten Oberflächen und eine Umlagerung der Schadstoffe auf besonders adsorptionsaktive Komponenten erreicht werden. Der Energieeintrag liegt zwischen etwa 3,4 und 10 kWh/t; er bestimmt weitgehend die Verteilung der Schadstoffe im Korngrößenspektrum und ist je nach Bodenart und Reinigungsziel zu variieren. Durch Setzarbeit wird das Grobgut > 1 mm in leichte und schwere Bestandteile getrennt. Erstere stellen ein kontaminiertes Produkt dar, das einer Reststoffbehandlung unterzogen werden muß.

In der Flotation wird das kontaminierte Feinkorn als Schaumprodukt ausgetragen; die Flotationsberge stellen den gereinigten Feinboden dar. Über das Flotationsverfahren sind bisher wenig Einzelheiten bekannt.

gasworks, iron and steel works and mines has been developed by the Lurgi company. The flow sheet of the standard process is shown in Fig. 8 [14, 15].

This basically consists of two attrition stages, a classifying stage at about 1 mm and a density separation of coarse product and flotation of the fine product. A water treatment unit has also been integrated so that generally no waste water is formed. Particular attention is focused on the attrition process. The lowest possible energy input and gentle particle treatment in the attrition drums are aimed at largely achieving a desagglomeration and suspension of soil particles as well as abrading the contaminated surfaces and a transfer of contaminants to particularly adsorption-active components. The energy input lies between 3.4 and 10 kWh/t; it largely determines the distribution of contaminants within the particle size spectrum and is to be varied according to soil type and aim of treatment. The coarse product > 1 mm is separated into light and heavy components by means of jigging. The former represents a contaminated product which must be subjected to a residual material treatment.

In flotation, contaminated fines are discharged as froth product; the flotation tailings represent the treated fine soil. Only few details are known about flotation processes.

As a rule, the contaminated residual soil contains more than 96% of the contaminants originally distributed in the raw soil. For instance, the hydrocarbon contents of coking plant site soils were able to be reduced with this process from 400–4000 mg/kg down to below 50 mg/kg, whereby the residual content of polycyclic aromatics was less than 20 mg/kg. Simultaneously, the heavy metal contents are also reduced.



5. Concluding remarks

In spite of considerable progress and success which have already been achieved in soil washing, the necessity of systematic fundamental research should be emphasized once more. Particularly the microprocesses of mobilization and redistribution of contaminants related to the type and occurrence of contamination, soil texture as well as type and intensity of energy input have to be investigated

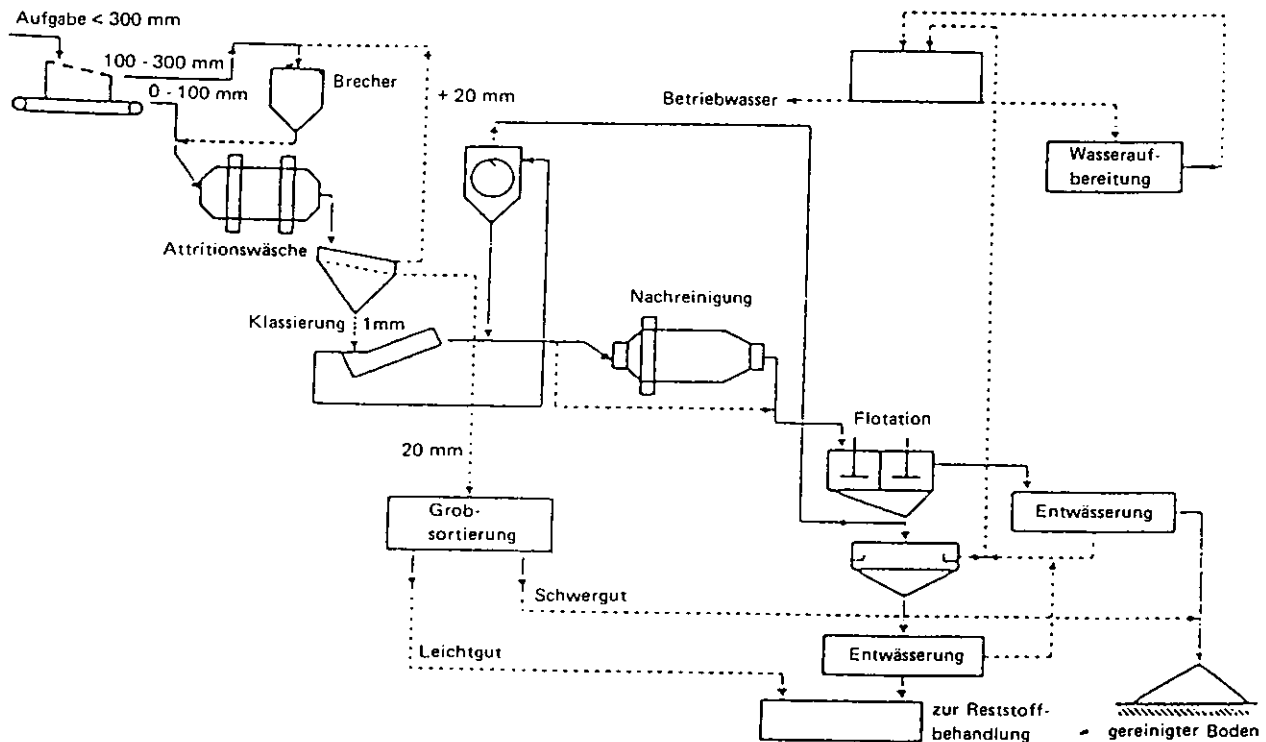


Bild 8: Stammbaum des Deconterra-Verfahrens der Firma Lurgi [15]

Fig. 8: Flow sheet for the Deconterra process of Lurgi

Der kontaminierte Restboden enthält in der Regel mehr als 95% der ursprünglich im Rohboden verteilten Schadstoffe. Mit diesem Verfahren konnten z. B. die KW-Gehalte von Kokereiböden von 400–4000 mg/kg auf unter 50 mg/kg abgesenkt werden, wobei der Restgehalt an polycyclischen Aromaten weniger als 20 mg/kg betrug. Gleichzeitig wird eine Verringerung der Schwermetallgehalte erzielt.



Schlußbemerkung

Trotz beachtlicher Fortschritte und Erfolge, die auf dem Gebiet des Bodenwaschens bereits erreicht worden sind, soll noch einmal die Notwendigkeit systematischer Grundlagenforschung hervorgehoben werden. Insbesondere müssen die Mikroprozesse der Mobilisierung und Umverteilung der Schadstoffe in Abhängigkeit von Art und Auftreten der Kontaminationen, von der Beschaffenheit der Böden sowie von Art und Intensität des Energieeintrags eingehender untersucht werden. Das gleiche gilt für den Einsatz chemischer Hilfsmittel als Detergentien und Flotationsreagenzien. Auch die Anwendung von Aktivstoffen als Schadstoffsammler könnte in vielen Fällen erfolgreich sein.

Die Bodensanierung ist sehr teuer und wird in Zukunft erhebliche Mittel verschlingen. Sie muß daher möglichst effizient und zugleich umweltschonend durchgeführt werden. Da die Umwelttechnik rasch – vielleicht zu rasch – zu einem bedeutenden Wirtschaftssektor heranwächst, besteht die Gefahr, daß mangelhafte Arbeiten zu überhöhten Preisen abgeliefert werden. Mit der Entwicklung bestmöglicher Technologien sowie zuverlässiger Bewertungskriterien und sicherer Kontrollsysteme auf der Grundlage solider wissenschaftlicher Untersuchungen kann dieser Gefahr begegnet werden.

thoroughly. The same applies for the application of chemical aids such as detergents and flotation reagents. Also the application of active solids as contaminant collector could be successful in many cases.

Decontamination of soil is extremely expensive and will consume considerable funds in the future. Thus it must be accomplished as efficiently as possible and also without environmental harm. Since environmental engineering is growing rapidly – perhaps too rapidly – to an important economic sector, there is a danger that unsatisfactory work will be done at excessive prices. This danger can be countered best by developing optimum technologies as well as reliable evaluation criteria and safe control systems based on sound scientific investigations.

List of Symbols used in formulae

d	= particle diameter	m
d_o	= diameter of oil droplet	m
E_{Ad}	= adsorption energy	J/m ²
F_A	= force of adhesion	N/m ²
k_{Des}	= desorption constant	1/s
m	= mass	kg
n_F	= concentration of solid particles	1/m ³
n_{ow}	= concentration of oil droplets in water	1/m ³
n_{oF}	= concentration of adsorbed oil droplets	1/m ³
t	= time	s
V	= volume	m ³
Θ	= contact angle	degrees
ϵ	= energy dissipation	W/kg
ν	= kinematic viscosity	m/s
ρ_F	= fluid density	kg/m ³
σ	= interfacial tension	N/m
τ	= shear stress	kg/ms ²

Betriebsstätten

Lägerdorf
München



AB UMWELTECHNIK
GmbH

Sandweg 10
2219 Lägerdorf
Tel.: 0 48 28/7 61
Fax: 0 48 28/7 60

chemisch-physikalische Bodensanierung

Sanierung von:

ölverunreinigten Böden
sonstig verunreinigten Böden
Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen
Strahlmittel mit schädlichen Verunreinigungen
Sandfangrückstände

Ihre Ansprechpartner:

Herr Dr. Haekel
Frau Riemann
Herr Mallick

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

d	= Teilchendurchmesser	m
d ₀	= Durchmesser der Öltröpfchen	m
E _{Ad}	= Adsorptionsenergie	J/m ²
F _A	= Haftkraft	N/m ²
k _{Des}	= Desorptionskonstante	1/s
m	= Masse	kg
n _F	= Konzentration der Feststoffteilchen	1/m ³
n _{ow}	= Konzentration der Öltröpfchen im Wasser	1/m ³
n _{oF}	= Konzentration der adsorbierten Öltröpfchen	1/m ³
t	= Zeit	s
V	= Volumen	m ³
ϑ	= Randwinkel	Grad
ε	= Energiedissipation	W/kg
ν	= kinematische Zähigkeit	m/s
ρ _F	= Fluiddichte	kg/m ³
σ	= Grenzflächenspannung	N/m
τ	= Schubspannung	kg/ms ²

Schrifttum/References

[1] *Wichert, H.-W.*: Sanierung von kontaminierten Standorten — Altlasten: alte Lasten — neue Aufgaben, VAB Vermittlungsstelle der Wirtschaft für Altlastensanierung — Beratung e. V., Köln

[2] *Walter, W., und Kovalick, Jr.*: Perspectives on Risks of Soil Pollution and Experience with Innovative Remediation Technologies, Fourth World Congress of Chemical Engineering; Strategies 2000, Karlsruhe 1991, Proceedings, S. 281/295

[3] *van der Ven, B., und Hiesefeld, M.*: Soil Decontamination — An Overview of the Present Situation — Environment, Policies and Available Solutions, Strategies 2000, Karlsruhe 1991, Proceedings, S. 296/318

[4] *Diegel, R.*: Dissertation RWTH Aachen, in Vorbereitung

[5] *Reich, I.*: Abstracts of Papers, 130th Meeting of the American Chemical Society, Atlantic City, Sept. 1956

[6] *Schubert, H.*: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1979, 2. Auflage, S. 355/361

[7] *Mühle, K., u. a.*: XVII International Mineral Processing Congress, Dresden 1991, Part III, p. 233

[8] *Bikermann, J.J.*: Surface Chemistry — Theorie and Applications, Academic Press Inc. Publishers, New York 1958, p. 336/337

[9] *Harkins, W. D., u. a.*: Journal American Chemical Society 48 (1926), S. 69

[10] *Stauff, J.*: Kolloidchemie, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960, S. 522/528

[11] *Sonnen, H.-D.*: Zum Stand der Technik bei Bodenwaschanlagen, Chemie-Ingenieur-Technik, MS 1957 (1991)

[12] *Neeße, Th., u. a.*: Waschen und Klassieren kontaminierter Böden, Aufbereitungs-Technik 32 (1991) Nr. 2, S. 72/77

[13] *Werther, J., u. a.*: Untersuchungen der physikalischen Mechanismen bei der Reinigung kontaminierter Böden durch Waschverfahren, 3. Internationaler Kongreß über Altlastensanierung, Karlsruhe 1990, S. 1011/1076

[14] *Rosenstock, F., und Hankel, D.*: Das Deconterra-Verfahren zur Bodenaufbereitung, Entsorgungspraxis 12 (1990), S. 719/723

[15] *Hankel, D., u. a.*: Die Wirkung der Attrition im Lurgi-Deconterra-Bodenaufbereitungsverfahren, Aufbereitungs-Technik 33 (1992) Nr. 5, S. 257/266

REFERATE / REPORTS

Aufbereitung von Baureststoffen auf der Zentraldeponie Hannover

Von S. Klingebiel
BR Baustoffrecycling + Deponietechnik 8 (1992) Nr. 4, S. 28/34

Seit Herbst 1991 wird auf dem Gelände der Zentraldeponie in Hannover Altwarmbüchen durch die Norddeutsche Mischwerke GmbH Ilsede eine Aufbereitungsanlage für Baureststoffe betrieben. Ausgangspunkt für die Errichtung der Anlage waren Aufkommen und Beschaffenheit der aufzubereitenden Stoffe, die bisher deponiert wurden. 1989 lag das Aufkommen bei etwa 300000 t/a an Baureststoffen, d.h. Bauschutt, Bodenaushub und Baustellenabfällen. Das Verfahren beinhaltet die Eingangserfassung, die sortengerechte Zuweisung zu Vorsortierhalten zur Zwischenlagerung und die Vorsortierung mittels Sortiergreifer. Zur eigentlichen Aufbereitungsanlage werden die Baureststoffe mittels Radlader transportiert.

Die wesentlichen Aufbereitungsschritte sind Vorabsiebung mittels Diskscheider, manuelle Sortierung in einer Lesestation, Zerkleinerung (Prallmühle), Magnetscheidung (Überbandmagnetscheider), Klassierung (Siebmaschine) und Sortierung (Sichter zum Abtrennen der Leichtstoffe). Der Durchsatz der Anlage liegt je nach Aufgabematerial zwischen 50 und 300 t/h. Die erzeugten mineralischen Fraktionen werden ausnahmslos als Baustoffe im Deponiebau verwendet: Abdeckboden 0–45 mm (Rekulti-

vierung), Wegebaumaterial 0–63 mm (Fahrbahnen), Unterbaumaterial 0–150 mm (wasserdurchlässiger Unterbau der Deponiesohleabdichtung, Straßen, Betriebsflächen). Die Qualitätskontrolle erfolgt in Form der Eigenüberwachung durch den Betreiber und als Fremdüberwachung durch einen von der Kommune beauftragten Baustoffprüfer. Hf

Die Stellung und Rolle eigenständiger Flotationszellen bei der Schwimmaufbereitung armer Pb-Zn-Erze

Von N. Čalić, J. Pavlica, D. Drašković
Erzmetall 45 (1992) Nr. 2, S. 107/112

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der selbständigen Flotationszellenanwendung beim kontinuierlichen, selektiven Flotationsprozeß von Pb-Zn-Erzen mit erhöhtem Edelmetallgehalt (Ag) dargestellt. Das Hauptproblem bei der Erzanreicherung liegt in der Gestaltung der Zerkleinerungs- und Klassieraggregate, die folgenden Gesichtspunkten Rechnung tragen müssen: den unterschiedlichen Verwachsungsverhältnissen, der differenzierten Mahlbarkeit und der unterschiedlichen Dichte der Mineralien. Aufgrund von Ergebnissen in Großversuchen in der Schwimmaufbereitungsanlage „Veliki Majdan“ kann jetzt eine Verfahrenskombination vorgestellt werden, die ein besseres Metallausbringen an Pb und Ag erreicht. Dazu wurde die Flotation zweistufig gestaltet, wobei die erste (selb-

ständige) Stufe nach zwei unterschiedlichen Flowsheets wie folgt geschaltet wurde: Naßmahlung, Klassierung, Flotation, Klassierung, Naßmahlung. Der Haupteffekt liegt dabei in der Verringerung der Zerkleinerung der silberhaltigen Pb-Fraktion. Bn.

Ermittlung der Scherfestigkeit von abzulagerndem Klärschlamm mit der Flügelsonde

Von G. von Bloh und W. Blümel
Müll und Abfall 24 (1992) H. 4, S. 225/233

Bei der Planung und beim Bau von Monodeponien für Klärschlamm sowie für sonstige Schlämme mit großen Anteilen organischer Substanzen müssen zusätzlich mögliche Einflüsse aus Stoffumsetzungsprozessen berücksichtigt werden. Derartige Prozesse laufen im allgemeinen in langen Zeiträumen ab. Sie können erhebliche Auswirkungen auf die Scherfestigkeit haben. Diese Effekte werden aber bisher bei keinem Verfahren zur Deponiefähigkeit von Klärschlamm berücksichtigt. Zur Messung der undrängten Scherfestigkeit von Schlamm vor und nach dem Einbau in eine Deponie wurden Flügelsondierungstechniken entwickelt, die eine Vibration der Flügeldrehgeschwindigkeit in weiten Bereichen gestatten. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus derartigen Flügelsondierungen in Probekörpern und in Schichten aus eingebautem Klärschlamm wird ein Verfahren zur Beurteilung der Scherfestigkeit festgestellt. Hf