

## **Aufbau, Funktion und Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperre am Beispiel der Deponie Penig**

Dr. Rüdiger Wolff

### 1. Einführung

Im Freistaat Sachsen wurde 1997 vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie ein Forschungsprojekt initiiert, um eine Kapillarsperre (KS) als ein Element eines zweilagigen Dichtungssystems zu planen und zu bauen. Die Wahl fiel auf den Neubereich der Hausmülldeponie Penig (Deponiekategorie II), zumal die Verfügbarkeit der benötigten Baumaterialien für die Kapillarsperre am Standort gegeben war.

Die Deponie Penig liegt am nördlichen Ortsrand der gleichnamigen Stadt, im Landkreis Mittweida, im Freistaat Sachsen, ca. 20 km nordwestlich von Chemnitz. Diese Hausmülldeponie besitzt keine Basisabdichtung und wurde vom Abfallwirtschaftsverband Chemnitz bis Ende 1997 betrieben. Im Neubereich der Deponie wurde vorwiegend Hausmüll abgelagert.

Die Planungsarbeiten zur Abdichtung und Rekultivierung des Neubereiches der Deponie begannen im Jahr 1998 und der tatsächliche Baubeginn im Jahr 2000. Das abgelagerte Deponat in diesem Teilbereich der Deponie umfasst ein Volumen von ca. 250.000 t, auf einer Fläche von ca. 2,2 ha mit einer Mächtigkeit von 15 m über Geländeoberkante.

Die Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre erfolgte auf dem Neukörper im Hangbereich mit Neigungen von 1:6,25 bis 1:3,5 auf einer Fläche von ca. 2 ha. Zur Ermittlung der Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht, der Kapillarschicht und dem Kapillarblock wurde im flachen Böschungsbereich (1:6,25) ein baugleiches Testfeld von 20 m Breite und 35 m Länge errichtet.

Die Erfassung der Abflussdaten erfolgt in der am Böschungsfuß aufgestellten Messstation, erstmalig über das Berichtsjahr 2002. Zudem werden die meteorologischen Daten in einer betriebseigenen Station erfasst.

Die behördlicherseits notwendige fachliche Prüfung und Bestätigung des gesamten Modellvorhabens, von der Planung über den Bau bis zur fachlichen Bestätigung der Auszahlungsanträge und Verwendungsnachweise, einschließlich der Auswertung der Ergebnisse des Testfeldes im Abdichtungssystem, erfolgte durch das damalige Staatliche Umweltfachamt Chemnitz /1/, heute Umweltfachbereich des Regierungspräsidiums Chemnitz.

Im Zusammenhang mit der ungewöhnlich hohen Niederschlagsintensität vom August bis Jahresende 2002 gilt es im Rahmen dieser Ausführungen die Frage zu beantworten, ob unter den gegebenen Standortbedingungen mit einer 2 m mächtige Rekultivierungsschicht die Funktionsfähigkeit der Kapillarsperre bei derartig extremen Witterungsverhältnissen gegeben war.

Im Rahmen der nachfolgenden Darstellungen werden der Aufbau, die Funktion, die prognostizierte und tatsächliche Leistungsfähigkeit des Abdecksystems in Bezug auf das Starkniederschlagsereignis im Jahr 2002 bewertet.

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Zum Aufbau der Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre

Im Rahmen einer Gesamtplanung /2/ erfolgte auch die Erarbeitung einer umfassenden Studie /4/, in der der Verwendbarkeitsnachweis für eine erweiterte Kapillarsperre mit darunter liegender Kunststoffdichtungsbahn (KDB) geführt wurde. Im Ergebnis der Planungen /2/ u. /3/ wurde eine Oberflächenabdichtung mit folgendem Aufbau verwirklicht:

Im Hangbereich wurde auf dem Müllkörper eine Ausgleichsschicht aufgetragen, gefolgt von einem Feinplanum als Auflager der KDB, über der die Kapillarsperre gebaut wurde. Abschließend wurde die Rekultivierungsschicht aufgetragen.

Lage/Schicht	Mächtigkeit (m)	Körnung (mm) / Bodengruppen	Einbau / sonstiges
Rekultivierungsschicht	Insgesamt : 2,00	nach DIN 18 915	Verdichtungsgrad jeweils ; $\leq 92\% D_{Pr}$
-Oberboden	0,30	Bodengr. 2 bis 5,	
-Unterboden als Speicherschicht	1,20	Bodengr. 6	
-Unterboden als Filterschicht	0,50	Bodengr. 4 bis 5	
Kapillarschicht	0,40	Sand 0/ 2 a	Einbau mit Motorraupe; $\leq 92\% D_{Pr}$
Kapillarblock	0,25	Kies 2/ 5 (gewaschen)	Einbau mit Motorraupe; $\leq 92\% D_{Pr}$
Kunststoffdichtungsbahn aus PE-HD	0,025 (profiliert; raue Oberfl.)	---	BAM – Zulassung
Feinplanum	0,10	0/8 ; Rundkorn	Gewährleistung der Filterstabilität
Ausgleichsschicht	0,50	0/32; Feinkornanteil < 0,06 mm $\leq 5$ Ma.-%	$D_{Pr} \geq 95 \%$ $K_f = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

Tab. 1: Einzelne Kennwerte der Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre /3/

Die Rekultivierungsschicht wurde als „Wasserhaushaltsschicht“ geplant und aufgebaut, da davon ausgegangen wurde, dass die Kapillarsperre nicht eine gleichwertige Dichtung eines Elementes eines zweilagigen Deponieoberflächenabdichtungssystems nach TA Siedlungsabfall darstellt.

Bei einer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 2 m und einer Bodenartenzusammensetzung von mehr oder weniger sandigem Lehm des Oberbodens (0,30 m) bzw. sandig-tonigem Lehm des Unterbodens (1,20 m) ist im Wurzelraum bei einer mittleren Lagerungsdichte von einer hohen bzw. sehr hohen „nutzbaren Feldkapazität im Wurzelraum“ auszugehen (140 mm bis 200 mm bzw. > 200mm nFKWe). Hinzu kommt, dass der Unterboden als Filterschicht mit einer Mächtigkeit von 0,50 m als schluffiger Sand bzw.

sandiger Schluff mit einer zusätzlichen nFK von ca. 100 mm anzusetzen ist und aus diesem Bereich ein kapillarer Aufstieg von Sickerwasser in den Wurzelraum erfolgt /8/.

Somit wurde oberhalb der Kapillarsperre ein leistungsfähiges System „Boden/Pflanze“ zur Dämpfung hoher Niederschlagsintensität (Menge/Zeit) geplant und ausgeführt.

## 2.2 Zur Funktion der Kapillarsperre

Die Funktion der Kapillarsperre besteht in der Aufnahme und lateralen hangparallelen Abführung von zusickerndem Wasser. Die Kapillarsperre besteht aus der Kapillarschicht und dem Kapillarblock.

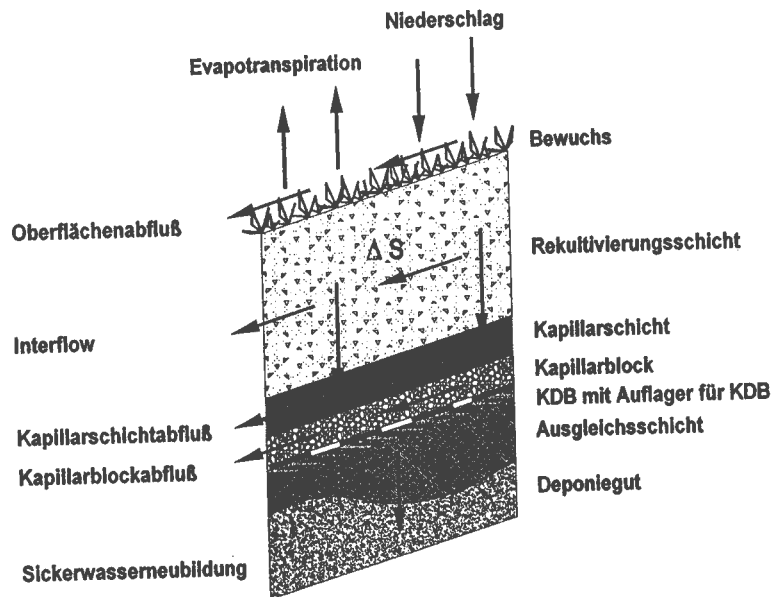
Dazu werden zwei Lagen übereinander liegend aufgebaut, die eine aus Sand (die Kapillarschicht), unter der eine aus Kies (der Kapillarblock) folgt, so dass in dieser Grenzfläche beider Lagen zueinander ein Porensprung entsteht. An der Grenzfläche und an diesem Porensprung bildet das in die Kapillarschicht eindringende Sickerwasser (Dränspende) hängende Menisken zum Kapillarblock aus, so dass in der hangabwärts geneigten Kapillarschicht ein ungesättigter Wasserfluss oberhalb des Kapillarblocks entstehen kann.

Zu einem Durchbruch des hangparallel abfließenden Sickerwassers der Kapillarschicht in den Kapillarblock kommt es erst dann, wenn das der Kapillarschicht zusetzende Sickerwasser (Dränspende) die laterale Dränkapazität der Kapillarschicht überschreitet. Dieses ist i.d.R. dann der Fall, wenn der Wasseraufstau in der Kapillarschicht ca. 2/3 der z.B. 40 cm mächtigen Kapillarschicht erreicht. In diesem Fall erfolgt ein vertikaler Wasserfluss aus der annähernd gesättigten Kapillarschicht in den größeren Porenraum des Kapillarblocks, was einem „teilweisen Versagen“ des Dichtsystems gleichzusetzen ist.

Um diesen Zustand auszuschließen, ist die maximale Dränspende zu ermitteln, um entsprechend die Kapillarsperre zu dimensionieren, bei Beachtung der zulässigen Hangneigung und Hanglänge.

## 2.3 Zur Leistungsfähigkeit der Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre

Um das Gesamtsystem der Oberflächendichtung in seiner Leistungsfähigkeit abschätzen zu können, sind sowohl Aussagen zum Wasserrückhaltevermögen der Rekultivierungsschicht, als auch Ermittlungen zur Dimensionierung und zur Körnung der Kapillarschicht und des Kapillarblocks notwendig.



**Abb.1:** Komponenten des Wasserhaushaltes der Oberflächendichtung auf der Deponie Penig /4/

Als örtliche Randbedingung des Standortes der Deponie Penig ist das Klima (die Niederschlagsmenge und deren Verteilung, die Temperatur und Luftfeuchte usw.), die Kontur bzw. die Hanggeometrie (Abschlagslänge, Gefälle aus Profilierung) zu bewerten, weitergehend die Rekultivierungsschicht (Material, Ansaat, natürliche Sukzession) und dessen Schichtaufbau (i.d.F. dreilagig) und Schichtmächtigkeit.

In einem Gutachten /4/ wurde der Wasserhaushalt unter den gegebenen Standortbedingungen simuliert. Hierzu wurde das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model (HELP) /9/ verwendet, um Aussagen zur Dränspende zu erhalten.

Außerdem wurden Kipprinnenversuche der TU Darmstadt ausgewertet, um die Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen Materialkombinationen der Kapillarschicht und des Kapillarblocks bei unterschiedlicher Neigung zu untersuchen. Es wurden zusätzlich Kipprinnenversuche der Universität Hamburg in die Auswertung einbezogen, außerdem wurden diverse Versuchsfelder von Deponieabdichtungen mit Kapillarsperren ausgewertet (/4/).

Unterschiedliche Kipprinnenversuche der TU Darmstadt /10/ und Hamburg /11/, bei denen Feinsand bzw. Mittelsand über Feinkies verwendet wurde, wiesen bei bestimmten Neigungen folgende Dränkapazität auf:

250 l/(m*d)	bei 1: 3,7
115 l/(m*d)	bei 1: 5
75 l/(m*d)	bei 1: 10
50 l/(m*d)	bei 1: 25

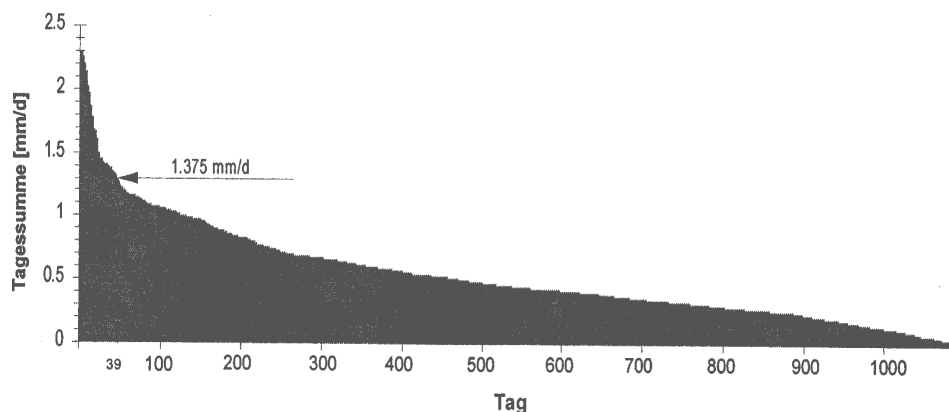
Bei Feldversuchen / Testfelder /4/ wurden bei unterschiedlichen Kapillarsperren an verschiedenen Standorten bei Neigungen von 1:3,3 bzw. 1:5,7 eine Dränkapazität von 65 l/(m\*d) festgestellt (Deponie „Am Stempel“, Marburg). Bei einer Hangneigung von jeweils 1:5 (Deponie „Monte Schernelino“, Frankfurt; Deponie Hamburg-Georgswerder) wurden 68 l/(m\*d) bzw. 65 l/(m\*d) ermittelt.

Bei der Deponie „Penig“ wurden durch Auswertung der o.g. Labor- und Feldversuche bei Hangneigungen von 1:6,3 bis 1: 3,5 Dränkapazität von 55 l/(m\*d) bis 70 l/(m\*d) prognostiziert.

Im ungünstigsten Fall würde auf der Deponie Penig bei einer Hangneigung von 1:6,25 (16%; 9.1°) und einer Hanglänge von 40 m von einer lateralen Dränkapazität von 55 l/(m\*d) (Südwestböschung, Südostb., fl. Haltung) auszugehen sein, so dass sich i.d.F. eine maximal zulässige Beaufschlagung aus der Rekultivierungsschicht von 1,375 mm/d ergeben würde.

Jeder Zufluss aus der Rekultivierungsschicht, der 1,375 mm/d überschreitet, könnte bei den festgelegten Standortfaktoren (Niederschlagsintensität, Hangneigung, Aufbau der Rekultivierungsschicht) von der Kapillarschicht theoretisch nicht abgeführt werden und flösse somit dem Kapillarblock zu. (siehe Abb. 2)

Es wurde errechnet /4/, dass in diesem ungünstigen Fall in der Summe für die drei Betrachtungszeiträume (1995 bis 1997) die minimal eindringende Wassermenge 0,7% (13.96 mm) des Niederschlages betragen würde und die maximal eindringende Wassermenge würde in Summe 3,6 % (67,58 mm) betragen.



**Abb. 2:** Theoretische Absickerung aus der Rekultivierungsschicht für die Jahre 1995 bis 1997, nach Größe sortiert (/4/)

Bei einer Gesamtgewichtung der unterschiedlichen Flächenanteile (Hangneigung und Hanglänge) des Deponieneukörpers der Deponie Penig, auf dem die Kapillarsperre zu errichten war, ergab sich für die betrachteten (rel. trockenen) Jahre 1995 bis 1997 eine Prognose der Durchsickerung der Kapillarsperre in den Kapillarblock von durchschnittlich 16 mm, das entspricht 0,85 % des Gesamtniederschlags. Dieser Wert entspricht grundsätzlich den Erkenntnissen aus Feldversuchen auf anderen Deponien („AmStempel“, Marburg; „Monte Scherbelino“, Frankfurt; Hamburg-Georgswerder), bei denen der durchschnittliche Abfluss in den Kapillarblock unter 1% des Jahresniederschlags lag bzw. liegt /4/.

#### 2.4 Ergebnisse zur Leistungsfähigkeit des Abdichtungssystems bei den extremen Niederschlagsereignissen in der 2. Jahreshälfte 2002

Die ersten Messergebnisse der Feldversuche sind in den Jahresberichten für die Berichtszeiträume 2002 und 2003 vom Zweckverband dokumentiert /6/ u. /7/. Sowohl im ersten als auch im zweiten Berichtsjahr existieren einzelne Messlücken, die eine taggenaue Auswertung in einzelnen Wochen nicht ermöglichten, jedoch bezogen auf die Monatsmittel eine eindeutige Aussage zur Wirksamkeit der Kapillarsperre gestatten.

Die Zahlen der Tabelle 2 und 3 zeigen, dass der mächtige Bodenspeicher hochwirksam das infiltrierende Niederschlagswasser speichert und in der Vegetationszeit über Evapotranspiration an die Atmosphäre zurückgibt.

Monat	Niederschlag [mm]	% von Niederschlag		
		Kapillarschicht	Kapillarblock	Rekultivierungsschicht
Januar	19,8	145,6	5,6	0
Februar	45,9	29,2	1,4	0
März	31,9	43,9	2,5	0
April	28,1	30,2	2,1	0
Mai	64,1	9,4	0,8	0
Juni	64,5	6,9	0,7	0
Juli	98,6	3,9	0,4	0
August	184,1	10,2 *	0,6 *	0,8
September	44,1	25,6 *	1,8 *	0
Oktober	71,6	4,2 *	0,5 *	0,004
November	96,1	25,0	0,7	0,7
Dezember	55,3	56,4	5,3	3,7
<b>2002</b>	<b>804,1</b>	<b>20,8</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>

(\* in den Monaten August; September u. Oktober existieren Messlücken)

**Tab. 2:** Prozentualer Anteil des Eintrages von Niederschlagswassers im Jahr 2002 in die Kapillarschicht, den Kapillarblock und aus der Rekultivierungsschicht

Monat	Niederschlag [mm]	% von Niederschlag		
		Kapillarschicht	Kapillarblock	Rekultivierungsschicht
Januar	47,3	75,2	8,2	0,2
Februar	4,7	461,6 *	19,1 *	0
März	25,2	31,7 *	1,6 *	0
April	24,6	25,7	1,5	0
Mai	35,6	11,4	0,8	0,02
Juni	55,5	5,5	0,5	0
Juli	43,6	5,4	0,7	0
August	13,0	12,1 *	2,1 *	0
September	58,2	2,1	0,3	0,02
Oktober	43,1	1,8	0,2	0
November	22,0	1,8	0,08	0
Dezember	18,5	2,8	0,01	0
<b>2003</b>	<b>391,3</b>	<b>21,9</b>	<b>1,8</b>	<b>0,03</b>

(\* in den Monaten Feb., März, August u. September existieren Messlücken)

**Tab. 3:** Prozentualer Anteil des Eintrages von Niederschlagswassers im Jahr 2003 in die Kapillarschicht, den Kapillarblock und aus der Rekultivierungsschicht

Die extrem hohe Niederschlagsintensität in der zweiten Hälfte des Jahres 2002 führt vorerst zu einer Aufsättigung des Bodenspeichers, in dessen Folge im Monatsmittel bis zu 3,7 % des Niederschlages durch laterale Wasserverlagerung in der Rekultivierungsschicht abgeführt werden (siehe Tab. 2; Dez. 2002). In diesem Zeitraum ist auch das Grobporensystem  $\varnothing > 60 \mu\text{m}$  nahezu wassergesättigt, so dass sich vorwiegend im Grobporensystem eine Sickerwasserfront durch die Rekultivierungsschicht auf die Kapillarsperre zubewegt.

Ab Dez. 2002 (Tab. 1) ist die laterale Dränkapazität der Kapillarschicht deutlich überschritten, so dass nun zunehmend bis zum Feb. 2003 die Wassermenge, die hangparallel in der Kapillarschicht nicht abgeführt werden kann, in den Kapillarblock eindringt. Die Auswertung von konkreten Tagesergebnissen zeigt, dass bei einer Dränspende von ca. 2,4 mm/d von einer lateralen Dränkapazität von ca. 84 l/(m\*d) auszugehen ist. (Anm.: Die Einheit l/(m\*d) bezieht sich auf den Fuß eines 35 m langen Hanges im Versuchsfeld mit einem Ausschnitt von 1 m Breite.)

Diese konkreten Ergebnisse zeigen, dass die prognostizierte maximale Dränleistung tatsächlich am Standort der Messung deutlich überschritten wurde und sogar in den flachen Hangbereichen des Versuchsfeldes die laterale Dränkapazität mindestens 84 l/(m\*d) beträgt. Erst wenn die standortspezifische laterale Dränkapazität (Hanglänge, Hangneigung) überschritten wird, erfolgt ein Durchbruch in den Kapillarblock.

Der Ganglinienverlauf (im Vortrag dargestellt) zeigt, dass dieses Durchbruchereignisse in den Kapillarblock zeitlich begrenzte Ereignisse sind, die auch in dem Zeitraum des Durchbruches die Leistungsfähigkeit der Kapillarschicht zwar kurzfristig überfordern, jedoch mit Abnehmen der Dränspende (zusickerndes Wasser aus der Rekultivierungsschicht in die Kapillarschicht) die Funktionalität der Kapillarschicht vollumfänglich erneut gegeben ist.

Die Niederschlagsereignisse des „Nassjahres“ 2002 wirken in der Folge über den Abfluss in der Kapillarschicht und den Kapillarblock über die Jahreswende bis in das 1. Quartal des „Trockenjahres“ 2003, so dass in der Zusammenfassung für diese zwei Jahre festgestellt werden kann, dass ca. 21 % des Niederschlages über die Kapillarschicht abgeführt wurden und ca. 1,5 % des Niederschlages in den Kapillarblock flossen und über die Kunststoffdichtungsbahn –als zweites Dichtsystem- abgeführt wurden (siehe Abb. 1). Bis zu 0,5 % des Jahresniederschlags wurde lateral über die Rekultivierungsschicht abgeführt (Interflow), so dass in der Bilanz ca. 77 % des Niederschlages über Entwässerungsgräben an der Oberfläche abfließen bzw. in der Rekultivierungsschicht verblieben oder über Evapotranspiration in die Atmosphäre verdunstete.

### 3. Schlussbetrachtung und Ausblick

Die ersten Ergebnisauswertungen des Versuchsfeldes auf dem Standort der Deponie „Penig“ zeigen, dass in den Jahren 2002 und 2003 die theoretischen Anforderungen an die Kapillarsperre tatsächlich „Vor Ort“ übertroffen wurden. Selbst in flachen Hangbereichen von 1:6,25 wurde bei extremer Niederschlagsintensität die Dränkapazität keinesfalls unzulässig überschritten, was u.a. auch wesentlich der mächtigen Rekultivierungsschicht geschuldet ist.

In den Hangbereichen wurde diese Deponie damit nachweislich mit einer hochwirksamen Oberflächenabdichtung gesichert, was gegenüber anderen zweilagigen Dichtsystemen als gleichwertig zu beschreiben ist.

Die laterale Dränkapazität begrenzt die Leistung der Kapillarsperre. Deshalb ist ein wesentliches Ziel eines funktionierenden Gesamtsystems darin zu sehen, eine quantitative und qualitative hochwertige Rekultivierungsschicht herzustellen; denn nur diese vergleichmäßig bzw. puffert hohe Niederschlagsspitzen. Das wiederum ist eine wesentliche Voraussetzung, um zeitlich und räumlich begrenzte Austragsspitzen in die Kapillarschicht zu minimieren.

Der Bau eines derartiger Abdichtungssystems ist nur dann wirtschaftlich, wenn die Baustoffe zur Herstellung der Kapillarsperre „vor Ort“ oder im direkten Umfeld zur Verfügung stehen. In diesem Fall war das beschriebene Abdichtungssystem mit ca. 65,0 € / m<sup>2</sup> realisierbar (einschließlich Gutachter, Ingenieure, Qualitätssicherung).

Unabhängig von der Wahl und Kombination der Dichtsysteme ist eine Deponiesicherung als technisches Bauwerk zu bezeichnen und auch als solches zu bewerten. Jedes technische Bauwerk hat eine begrenzte Lebensdauer, so dass alleine dieser Sachverhalt mittel- und langfristig Reparaturen am Dichtsystem begründen, die einer Entlassung von Deponien (z.B. der KII) aus der Nachsorge in absehbaren Zeiträumen entgegenstehen. Bei dem o. g. Beispiel der Abdeckung der Deponie Penig mit einem im Prinzip dreilagigen Dichtsystem (2 m mächtige Rekultivierungsschicht mit untergelagerter Kapillarsperre, mit untergelagerter KDB) ist von einem langzeitstabilen Bauwerk auszugehen, alleine schon aufgrund der mächtigen Rekultivierungsschicht.

#### Literatur:

/1/ Regierungspräsidium Chemnitz: Abfallrechtliche Anordnung gemäß § 36 Abs.2 KrW-/AbfG –Deponie Penig- vom 18.04.97 und 09.10.1998

/2/ AEW Plan GmbH: Vorplanung Dez. 1997, Entwurfs- und Genehmigungsplanung Febr. 1998, Materialrecherche März/April 1998

/3/ AEW Plan GmbH: Qualitätssicherungsplan Feb. 2000; Oberflächenabdichtung der Neudeponie Penig (Baulose 3b u. 4)

/4/ N.v.d.Hude: Verwendbarkeitsnachweis für eine erweiterte Kapillarsperre als Endabdichtung der Deponie Penig, April 1998

/5/ NWS Umwelttechnik GmbH & Co. KG: Bautechnische Umsetzung, veröffentlicht in „Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis“ Heft 119, Karlsruhe, 8./9. Nov. 2000

/6/ Abfallwirtschaftsverband Chemnitz: Jahresübersicht und Erklärung zum Deponieverhalten 2002, Chemnitz, März 2003

/7/ Abfallwirtschaftsverband Chemnitz: Jahresübersicht und Erklärung zum Deponieverhalten 2003, Chemnitz, März 2004

/8/ Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover 1982

/9/ Schroeder, P.R.u.a.: The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, EPA/600/R-94/168a, US Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC. Sept. 1994

/10/ von der Hude, N., Kämpf, M., Montenwgro, H.: Kapillarsperren Stand der Forschung / Umsetzung in die Praxis, Schriftenreihe Angewandte Geologie, Heft 37, Harlsruhe 1995, S. 6-1-6-29

/11/ Melchior, S., Steinert, B., Burger, K., Miehlich, G.: Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten; BMBF-Verbundforschungsvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen, Teilvorhaben 29; Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten. 32, 1997.