

Deponie Hintere Dollert

Überprüfung der Stimmigkeit der TAUPE-Messungen mit den Schichtabflüssen und Beleg der ausreichenden Leistungsfähigkeit nach DepV

Bericht

Karlsruhe, den 10. März 2013

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM)
c/o Campus-Nord, Bau 330
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	4
2	Aufbereitung der vorhandenen Unterlagen (Planungen, Daten).....	6
3	Kalibrierung TAUPE	7
3.1	Einleitung.....	7
3.2	Fehlerhafte Funktion von Sensoren/Multiplexern	7
3.3	Durchgeführte Schürfen und Probenahmen	8
3.4	Ergebnis	10
3.4.1	Probenahmen	10
3.4.2	Aufgrabungen von Multiplexern	11
3.4.3	Aufgrabungen zur Überprüfung von Kabelschäden	13
3.4.4	Auffällige Sensoren (Laufzeit zu kurz und Oszillationen)	14
3.4.5	Ergebnis der Mux-Prüfungen nach den Aufgrabungen	14
3.4.6	Aktuelles Prüfprotokoll nach Ersetzen der fehlerhaften Multiplexer	16
3.4.7	Nach dem Reparaturzeitraum aufgetretene Fehler.....	18
3.5	Zusammenfassung.....	19
4	Beleg für Verbesserung der Randzuflüsse	20
4.1	Lysimeter und rechter Feldrand (Sensoren 1, 5, 9, 13, 15)	21
4.2	Entlang des unteren Wirtschaftsweges (Sensoren 1, 33, 75, 94 und 98)	22
4.3	Auf der Kuppe (Sensoren 13, 15, 31, 57 und 110)	23
4.4	Linker Feldrand (Sensoren 94, 98, 102, 106 und 110)	24
4.5	Horizontalschnitt Testfeldmitte (Sensoren 9, 25, 26, 27, 28, 70, 72, 83 und 85)	25
4.6	Vertikalschnitt Testfeldmitte (Sensoren 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87 und 89) ...	25
4.7	Zusammenfassung.....	26
5	Aufbereitung der TAUPE-Daten	28
5.1	Abgleich der Sensoren und Identifizierung von Auffälligkeiten (siehe OZ 3) .	28
5.2	Temperaturkompensation.....	28
5.3	Betrachtung von Einzelsensoren.....	30
5.4	Korrelation Wassergehalt zu hydraulischer Leitfähigkeit	34
5.4.1	Bestimmung des Wassergehaltes mittels TAUPE-Verfahren	34
5.4.2	Einfluss von Materialeigenschaften auf die Wasserbewegung im Boden	36
5.4.3	Verknüpfung des Bodenwassergehaltes mit der hydraulischen Leitfähigkeit.....	37
5.4.4	Zusammenfassung	39

5.5	Überschlägige Berechnung des Zuflusses zur Kapillarsperre (KS)	39
5.6	Abgleich der Abschätzung mit den Schichtabflüssen unter Berücksichtigung meteorologischer Ereignisse	41
6	Bilanzierung des Wasserhaushaltes	44
6.1	Durchflussbestimmung aus Taupe-Messungen oberhalb der Dichtung in der Kontrollschicht unter der Rekultivierungsschicht	44
6.2	Durchflussbestimmung aus Taupe-Messungen in der Kontrollschicht unterhalb des Dichtungssystems.....	44
6.3	Wasserhaushaltsbilanz.....	45
7	Abgleich mit den Vorgaben der Deponieverordnung	46
8	Zusammenfassung.....	48

1 Aufgabenstellung

Die Deponie Hintere Dollert auf der Gemarkung Gaggenau-Oberweier wurde auf einer Fläche von ca. 20.000 m² mit dem System Kapillarsperre mit optimiertem Wurzelboden abgedichtet (Testfeld). In dieses Abdichtungssystem ist ein flächendeckendes System zur Kontrolle von Wassergehaltsänderungen (TAUPE-System) zweilagig im unteren Bereich des Wurzelbodens (oberhalb der Kapillarsperre) und in einer Kontrollschicht (unterhalb der Kapillarsperre) angeordnet. Damit wird die Wasserdichtigkeit des Abdichtungssystems kontrolliert.

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit dieses Kontrollsystems ist in das Testfeld ein Lysimeterfeld integriert. In diesem Lysimeterfeld ist das TAUPE-System dreilagig installiert, mit einer weiter Lage in der Kapillarschicht. Zusätzlich sind im Lysimeter 4 LUMBRICUS-Sonden eingerichtet, mit denen in einem Profil senkrecht über das Abdichtungssystem die Wassergehalte gemessen werden. Weitere 4 LUMBRICUS-Sonden sind entlang dem unteren Bermenweg über das Testfeld verteilt. Mit deren Hilfe ist eine Nachkalibrierung des TAUPE-Systems möglich.

Gemäß der Genehmigung des Regierungspräsidiums Karlsruhe ist in einer mindestens dreijährigen Intensivüberwachungsphase das Testfeld mit dem integrierten Lysimeterfeld so zu überwachen, dass u. a. folgende Verhaltensweisen des Abdichtungssystems dargestellt werden können:

- Funktionsqualität des Abdichtungssystems hinsichtlich Wasserdurchlässigkeit/Wasserhaushalt
- Veränderung in den Eigenschaften des Abdichtungssystems
- Nachweissicherheit des TAUPE-Systems (Kontrolle über Lysimeterfeld)

Der Landkreis Rastatt beabsichtigt, die Stimmigkeit der TAUPE-Messungen mit den Schichtabflussmessungen nachzuweisen (Forschungsvorhaben) und in einem zweiten Schritt die ausreichende Leistungsfähigkeit der Abdichtung nach DepV zu belegen. Dazu hat das Regierungspräsidium Karlsruhe mit Mail vom 05. September 2011 Stellung genommen und weitere Nachweise gefordert. Beim Landkreis Rastatt wurde in einer Besprechung am 26. September 2011 unter Beteiligung des Ingenieurbüros Roth & Partner (IR&P), des Ingenieurbüros Rabl-Lasar (IRL) und dem KIT, Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM) ein Konzept erarbeitet. Mit Datum vom 17. November 2011 wurde das Konzept dem Abfallwirtschaftsbetrieb zugesendet.

Mit Besprechung am 06. Juni 2012 auf der Hausmülldeponie "Hintere Dollert", Gaggenau-Oberweier wurde das Untersuchungsprogramm mit der Aufsichtsbehörde besprochen und gemäß Protokoll das weitere Vorgehen wie vom KIT angeboten beschlossen.

Die Besprechung fand auf Initiative des Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 54.2, Hr. Fabian in Abstimmung mit dem Umweltministerium, Referat 46, Hr. Nagel statt, um gemeinsam zu erörtern, ob die im Antrag des Abfallwirtschaftsbetriebes vom 03.04.2012 auf Erhöhung der zuwendungsfähigen Kosten enthaltenen Maßnahmen

zur Beurteilung der Funktions- und Leistungsfähigkeit des o.g. Oberflächenabdichtungssystems in diesem Umfang erforderlich sind.

Es wurde mehrheitlich die Meinung vertreten, dass mit dem unter Beteiligung des Ingenieurbüros Roth & Partner (IR&P), des Ingenieurbüros Rabl-Lasar (IRL) und dem KIT, Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM) erarbeiteten Konzept der Nachweis der Funktions- und Leistungsfähigkeit dieses alternativen Oberflächenabdichtungssystems zu erbringen sein dürfte.

Das Konzept, mit dem auch das RPK über die weitere Vorgehensweise informiert wurde, sieht vor, dass zur Vervollständigung der Parameter zur Durchführung einer Wasserhaushaltsbilanzierung vor Ort zusätzliche Maßnahmen in Form von Einzelbereichsmessungen aus den Leitungen der Abfangdränagen durchgeführt werden. Hierfür ist wegen der Aussagekraft der Messergebnisse ein Messzeitraum von 8 Monaten vorgesehen.

Des Weiteren sollen die nach dem Bau der Zwischenabdeckung des Kuppenbereichs festgestellten Messergebnisse der im Testfeld eingebauten Sensoren im Rekultivierungsschicht-Unterboden und in der Kontrollschicht ausgewertet werden. Mit Hilfe dieser Messwerte ist eine Bilanz darüber zu erstellen, wie viel Wasser durch das Testfeld tatsächlich noch in die Deponie eindringt.

Hierfür sollen die TAUPE-Sensoren im Rekultivierungsschicht-Unterboden durch Aufgrabungen und Entnahme von Bodenproben nochmals kalibriert werden. Dabei sind von einem unabhängigen Gutachter auch die Materialien der Kapillarsperre zu prüfen und deren Leistungsfähigkeit zu beurteilen.

Das KIT hat den Auftrag zur Umsetzung des Projekts vom Abfallwirtschaftsbetrieb bereits erteilt bekommen. **Die Besprechungsteilnehmer waren sich darin einig, dass der erteilte Auftrag vollumfänglich umgesetzt werden sollte, damit der Abschlussbericht dem Regierungspräsidium Karlsruhe bis spätestens Ende diesen Jahres (2012) vorgelegt und das Projekt endgültig zum Abschluss gebracht werden kann.**

Mit dem Nachweis der Funktionalität des TAUPE-Systems und der Leistungsfähigkeit der alternativen mineralischen Oberflächenabdichtung verfolgt der Abfallwirtschaftsbetrieb auch das Ziel, dass das mit Bescheid vom 10. November 2003 abfallrechtlich genehmigte Testfeld als integrierter Bestandteil einer entsprechenden endgültigen Oberflächenabdichtung verbleiben kann. Ein weiteres Ziel ist auch, diese Art der Oberflächenabdichtung gegebenenfalls auf der restlichen, noch abzudichtenden Deponiefläche genehmigt zu bekommen.

2 Aufbereitung der vorhandenen Unterlagen (Planungen, Daten)

Es wurden folgende Unterlagen seitens des Ingenieurbüros Roth & Partner zur Verfügung gestellt:

- a. Kurzbeschreibung der Planung des Testfeldes und der Darstellung der eingebauten Materialien (7 Seiten)
- b. Anlage 1: Auszug aus dem Leistungsverzeichnis (LV), Seiten 26 – 27, 30 - 35 (8 Seiten) und der QS-Plan (Stand 14.06.2004 des Ing.-Büro Rabl-Lasar) mit insgesamt 28 Seiten
- c. Anlage 2: Stüttschicht – Materialparameter (Ing.-Büro Rabl-Lasar, Fa. Grötz) mit insgesamt 7 Seiten
- d. Anlage 3: Kapillarsperrenmaterial (Sand, Kies) – Materialparameter. Bericht der LMU, Prof. Wohnlich mit insgesamt 38 Seiten zzgl.1 Seite Anschreiben
- e. Anlage 4: Geotextil. Schreiben der Fa. Grötz mit den entsprechenden Prüfberichten mit insgesamt 6 Seiten
- f. Anlage 5: Eigenüberwachung. Anschreiben der OHU (1 Seite), Gutachten Arcadis für Kapillarschicht (insgesamt 35 Seiten für 3 Bauabschnitte), Gutachten Arcadis für Kapillarbruchschicht (insgesamt 31 Seiten für 3 Bauabschnitt)
- g. Anlage 6: Fremdüberwachung. Berichte Smoltczyk & Partner (insgesamt 90 Seiten)

3 Kalibrierung TAUPE

3.1 Einleitung

Das Dichtungskontrollsystem TAUPE wurde auf der Deponie „Hintere Dollert“ 2004 eingebaut und ist somit seit über acht Jahren in Betrieb. Es sind insgesamt 230 Sensoren installiert, die über 30 Feld-Multiplexer (Mux) von zwei Zentraleinheiten (ZE1, ZE2) angesteuert werden. Im Laufe der Zeit kam es zu diversen Ausfällen von Sensoren, die i.d.R. nur einzelne Sensoren betroffen haben. In 2011 sind aber auch komplette Multiplexer ausgefallen, d.h., dass damit bis zu acht Sensoren gleichzeitig davon betroffen waren. Ausgehend von den geforderten Aufgrabungen erfolgte eine intensive Untersuchung der Daten aus dem bisherigen Betrieb des TAUPE-Dichtungskontrollsystems.

3.2 Fehlerhafte Funktion von Sensoren/Multiplexern

Aus den Auswertungen der Messergebnissen ergaben sich folgende Sensoren und Multiplexer (Mux) nach Tab. 3.1, die davon betroffen waren:

Tab. 3.1: ermittelte fehlerhafte Zustände auf der Deponie. Mux 13 und Mux 18 wurden ausgeschlossen; da der Bagger in dem steilen Bereich am Fuß der Deponie nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand eingesetzt werden konnte.

ZE1			
Mux Nr	Pilotton vorhanden	Sensoren ok	defekt
3	Ok	Alle	-
4	Ok, schaltet nicht korrekt	Alle	zeitweise Ausfälle
6	Nein	-	
13	Ok	1, 4 – 8	2,3 nur koax
18	Ok	2,3,6,7,8	1 seltsame Kurvenform 4 nur koax
ZE2			
Mux Nr	Pilotton vorhanden	Sensoren ok	defekt
14	Ok	Alle	zeitweise Ausfälle
15	Ok	Alle	zeitweise Ausfälle
16	Ok	1 – 3, 5 – 8	4 nur koax
17	Ok, schaltet nicht korrekt	2,4,5	1, nur koax 3,6,7,8
21	7,8	7,8	1 – 6, nur koax
26	Ok	1-8	-
27	5,6,7,8		1 – 4, nur koax
29	6,7	7,8	1 – 6, nur koax

Zusätzliche Messungen an den signalführenden Koaxialkabeln zwischen den ZE und den Mux zur Überprüfung deren korrekter Funktion und der Auswirkung von Kabelverletzungen durch Zug oder Beschädigung des Isoliermantels zeigten bei den Koaxial-

kabeln zu Mux 14 und Mux 25 eine leichte Beeinflussung der Signalantwort. Ein kleiner Sprung im Signalverlauf ließ auf eindringendes Wasser in die Abschirmung, d.h., auf einen Defekt der Isolation der Koaxialkabel schließen. Die Position der Störung, gerechnet von der ZE2 aus, wurde aus dem Gesamtsignal der Koaxialleitungen in Richtung Mux 14 zu ca. 25 m geschätzt und in Richtung Mux 25 zu 85 m.

Weitere Auffälligkeiten betreffen die Sensoren 230, 188 und 145. Die Signalantworten sind zu kurz und zeigen eine auffallende Welligkeit. Dies sind Anzeichen für einen beschädigten Sensor, was sich bei Sensor 230 durch einen Gasbrunnen erklären lässt, der genau die Verlegebahn des Sensors trifft und diesen nach ca. einem Drittel der Länge abschert. Weil bei den beiden anderen Sensoren ein vergleichbares Verhalten erst im Laufe der Betriebszeit aufgetreten ist, kann möglicherweise eine Scherbewegung im Aufbau der Deponie den Sensor an den betroffenen Stellen zu stark gedehnt haben und zum Abriss der Kupferleiter geführt haben.

3.3 Durchgeführte Schürfen und Probenahmen

In den Zeitabschnitten vom 30. Juni bis 02. August 2012 und vom 21. bis 22. August 2012 führte die Firma KMG die Aufgrabungen durch. Im ersten Abschnitt erfolgten die in Bild 3.1 in grün eingezeichneten Schürfen nach dem von Ingenieurbüro Roth & Partner erstellten Plan. Er gibt allerdings die Positionen der Mux und den Verlauf der Kabeltrassen nicht korrekt wieder.

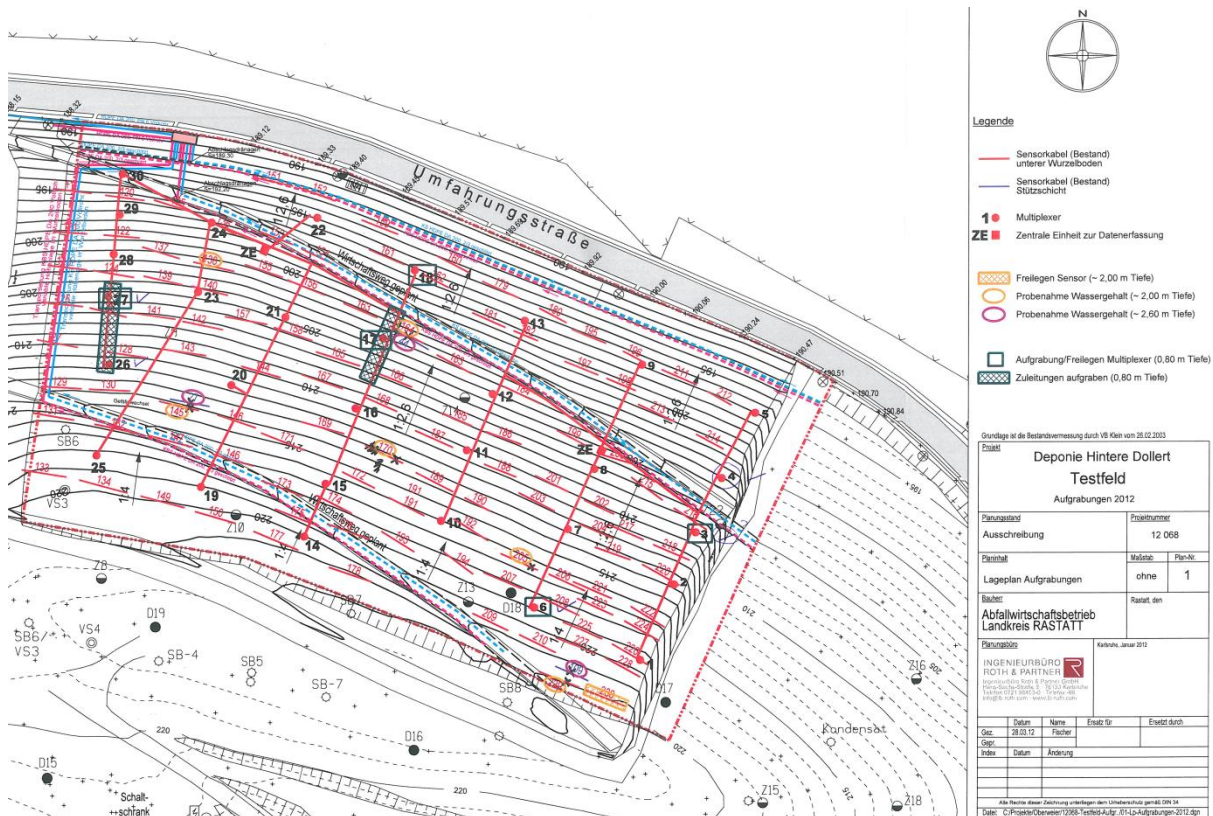


Bild 3.1: Plan der Schürfen und Aufgrabungen von Sensoren, Muxen und Kabelstrecken zur Überprüfung von Defekten an Koaxialkabeln

Die Arbeiten betreffen die Grabungen aufgeteilt in Sensoren und Strecken nach Tab. 3.2. Sie umfassen zum einen die Probenahme am Ort von sechs Sensoren in der Kontrollschicht der Rekuschiht und von drei Sensoren in der Kontrollschicht unter der Abdichtung. Zum zweiten sollten die Kabeltrassen an den angegebenen Strecken geöffnet werden.

Tab. 3.2: geplante Schürfen nach Ingenieurbüro Roth + Partner GmbH

Sensor	Grund	Bemerkung
230	Nicht ausgeführt	Gasbrunnen auf Sensor
229	Bodenprobe	Reku-Schicht
205	Dito	Dito
170	Dito	Dito
164	Dito	Dito
145	Dito	Dito
138	Dito	Dito
109	Bodenprobe	Kontroll-Schicht
44	Dito	Dito
27	Dito	Dito
Strecke	Grund	Bemerkung
Mux 17 – 16	Evtl. Mantelverletzung an Koax-Kabel	Koaxkabel von Mux 14
Mux 27 – 26	Dito	Koaxkabel von Mux 25

Weiter war im Plan vorgesehen, die Multiplexer 3, 6, 17, 18, 27 freizulegen.

Aufgrund ungenauer Einmessungen der beiden Verbindungsstrecken zwischen Mux 17 und Mux 16 bzw. Mux 27 und Mux 26 ergab sich zusätzlicher Aufwand zum Auffinden der tatsächlichen Position. Außerdem waren Lage und Einbautiefe des Spannungsversorgungskabels für die Zentraleinheiten nicht bekannt, so dass bei den Arbeiten das zusammen mit den Koaxialkabeln und Steuerkabeln nur etwa 10 cm unter der Oberfläche liegende Stromkabel am Mantel leicht verletzt wurde. Bei der zweiten Grabungsperiode waren davon zwei Koaxialkabel und ein Steuerkabel betroffen und abgerissen. Alle Schäden wurden repariert und wenn erforderlich mit Kabelmuffen eingegossen.

Im zweiten Abschnitt erfolgte noch die Freilegung dreier zusätzlich festgelegter Mux (14, 15, 21), bei denen sich bei der erweiterten Untersuchung aller Sensoren ein Untersuchungsbedarf ergeben hat.

Bei den Schürfen wurde beobachtet, dass im linken Bereich der Deponieabdeckung (Wirkungsbereich der ZE1) die Kabelgräben und Muxen besandet und mit Trassenband zur besseren Erkennbarkeit des Verlaufes ausgestattet sind. Im mittleren und rechten Teil (ZE2) dagegen fehlt das Trassenband und der Sand ist durch Löss ersetzt. Dieser hat eine deutlich höhere Speicherkapazität für anstehendes Wasser und verschärft die Situation von eindringendem Wasser an den Mux. Das ist auch eine mögliche Erklärung für die Häufung von wassergefüllten Muxen im Bereich der ZE2.

3.4 Ergebnis

3.4.1 Probenahmen

Aus den bei den Schürfen gewonnenen Bodenproben wurden die Wassergehalte nach Tab. 3.3 bestimmt. Diese stimmen im Rahmen der punktuell vorgenommenen Probenahme und der Inhomogenität der Dichte entlang der TAUPE-Sensoren recht gut mit den durch das Sensorsystem gemessenen Daten überein. Die volumetrischen Wassergehalte wurden aus den gravimetrischen Wassergehalten der Proben unter Zuhilfenahme einer mittleren Dichte von $1,365 \text{ g/cm}^3$ berechnet.

Tab. 3.3: Bestimmung der Wassergehalte der Bodenproben und Vergleich mit TAUPE-Messungen

Sensor Nr.	Wassergehalt gravimetrisch in % (Probe)	Wassergehalt volumetrisch in Vol % (Probe)	Wassergehalt gravimetrisch in % (TAUPE)	Wassergehalt volumetrisch in Vol % (TAUPE)	Bemerkung
230	-	-	-	-	Gasbrunnen auf Sensor
229	10,95	15,0	11,6	15,8	Reku-Schicht
205	12,10	16,5	11,2	15,3	Dito
170	14,67	20,0	13,1	17,9	Dito
164	11,03	15,1	12,1	16,5	Dito
145	10,87	14,8	10,3	14,0	Dito
138	12,66	17,3	11,6	15,6	Dito
109	9,81	13,4	12,7	17,3	Kontroll-Schicht
44	13,15	18,0	13,4	18,3	Dito
27	10,99	15,0	10,6	14,5	Dito

Eine größere Abweichung tritt in der Kontrollschicht an Sensor 109 auf. Der gravimetrisch ermittelte Wassergehalt der Probe beträgt dort $9,81 \text{ g/cm}^3$, während der sensorisch ermittelte Wert $12,7 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Das liegt aber eher an der Menge an Steinen in der Probe, als an einem tatsächlich geringeren Wassergehalt. Die Probe an Sensor 170 enthält im Gegensatz zu allen anderen Proben (definierte Kontrollschicht) wesentlich mehr lehmige Anteile, deren höhere Gesamtoberfläche eine höhere Wassermenge speichern kann. Dies muss aber nicht entlang des gesamten Sensors gelten.

Die mit dem TAUPE-System integral über die jeweilige Sensorlänge von 10 m ermittelten volumetrischen Feuchtwerte repräsentieren somit sehr gut die Wassergehalte der punktförmig genommenen Proben in den Schichten unter- und oberhalb der Abdichtung in der Deponie.

Die Bilder in Bild 3.2 zeigen exemplarisch drei Schurfe zu fünf Sensoren, zwei in der Kontrollschicht der Rekuschiht (145, 229) und Kontrollschicht unterhalb der Abdichtung (27, 109) und einen nur in der Kontrollschicht der Rekuschiht (205). Der Ablauf bei den übrigen Sensoren war gleich. Bei Sensor 205 ist die andere Färbung des Materials in der Kontrollschicht gut zu erkennen (s.o.). Der Aufschluss durch den Dichtaufbau belegte den ordnungsgemäßen Zustand des Abdichtungssystems.



Bild 3.2: Sensoren Nr. 145 und Nr. 27

Sensoren Nr. 229 und Nr. 109

Sensor Nr. 205

3.4.2 Aufgrabungen von Multiplexern

Zur Prüfung des Zustandes der beanstandeten Multiplexer wurden diese nach dem Aufgraben vorsichtig freigelegt und geöffnet. Die umgebenden Kunststoffgehäuse standen beim Öffnen unter Unterdruck; der anliegende Erddruck hat das Gehäuse zusammen gepresst. Das zeigt aber, dass die Dichtungen im Gehäuse, sowohl am Deckel als auch an den PG-Verschraubungen, funktionieren. Das Wasser muss über einen längeren Zeitraum in ausreichender Menge anstehen, um vermutlich über die PG-Verschraubungen entlang der Koaxialkabel ins Innere der Gehäuse zu gelangen. Durch ständig auftretende Bewegungen im Deponiekörper scheinen über die Kabel Kräfte auf die Dichtungen zu wirken und den Wasserzutritt so zu befördern. Bild 3.3 demonstriert beispielhaft die Folgen im Kunststoffgehäuse und im Inneren des Metallgehäuses.



Bild 3.3: Mux 29 unter Wasser

Korrosion an Steckverbinder

Nach grober Reinigung, Mux-Inneres von Wassereintritt nur gering betroffen

Das Innere der metallischen Mux-Gehäuse ist von dem Wassereintritt i.d.R. nicht betroffen, außer, dass nach längerer Zeit das anstehende Wasser über die Anschlussbuchse des Steuerkabels in geringen Mengen durchdringen und an den Kontakten auf der Innenseite zu Korrosion führen kann. Die N-Steckverbindungen der Koaxialkabel sind dicht, aber auf der Oberfläche ebenfalls von Korrosion betroffen, aber ohne Auswirkung auf die Funktionsfähigkeit.

Insgesamt wurden 12 Multiplexer aufgedeckt und untersucht. Die Tabelle 3.4 gibt ihren Zustand wieder und zeigt an, ob Signale zu messen waren. Außerdem ist eine Empfehlung zum Reparaturumfang der Muxen angegeben.

Tab. 3.4: im Zeitraum zwischen 31.07. und 21.08.2012 aufgegebenen Muxe

Lfd Nr. Datum	Mux	Befund	Zusatz	Zustand	Bedarf
1 01.08.	3	Geringe Wassermenge in Gehäuse	Keine Korrosion	o.k.	kein
2 01.08.	4	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker korrodiert Überwurfmutter leicht korrodiert Buchse innen korrodiert N-Verbindungen schwarz angelaufen Mux trocken	k.S.	Mux prüfen/ersetzen
3 01.08.	6	trocken	Keine Korrosion Kabelmuffe (Reparatur) optisch o.k.	o.k.	Mux/Steuerkabel prüfen/ersetzen
4 31.07.	16	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker korrodiert, Überwurfmutter leicht korrodiert Mux trocken	o.k.	Mux prüfen/ersetzen
5 31.07.	17	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker komplett korrodiert Überwurfmutter aufgelöst Buchse innen korrodiert Mux trocken Lag sehr oberflächennah, in der Nähe Stromkabel! Etwas tiefer gelegt.	2S o.k. 4S k.S.	Mux prüfen/ersetzen
6 31.07.	26	Gehäuse halb wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker korrodiert Überwurfmutter leicht korrodiert Mux trocken	k.S.	Mux prüfen/ersetzen
7 31.07.	27	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker komplett korrodiert Überwurfmutter aufgelöst Buchse innen korrodiert Mux trocken	k.S.	Mux prüfen/ersetzen
8 31.07.	29	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker komplett korrodiert Überwurfmutter aufgelöst Buchse innen korrodiert Mux trocken	k.S.	Mux prüfen/ersetzen
9 31.07.	30	trocken		o.k.	kein
10 21.08.	14	trocken Deckel defekt	Mux trocken ab und zu k.S.	o.k.	Mux prüfen/ersetzen
11 21.08.	15	¼ Wasser im Gehäuse	Mux trocken ab und zu k.S.	o.k.	Mux prüfen/ersetzen
12 21.08.	21	Gehäuse wassergefüllt	Steuerkabel-Stecker leicht korrodiert PG-Verschraubungen undicht Löss-Verschüttung -> mech. Spannung; sehr feuchte Umgebung	k.S.	Mux prüfen/ersetzen

Legende: Test mittels Messung vor Ort: „o.k.“: messtechnisch in Ordnung, „k.S.“: kein Signal verfügbar

3.4.3 Aufgrabungen zur Überprüfung von Kabelschäden

Die Strecken zwischen den Mux 16 und 17 zur Prüfung des Koaxialkabels nach Mux 14 und zwischen Mux 26 und 27 zu Mux 25 waren nach Abschätzung der Position des Fehlerortes festgelegt worden (Tab. 3.5). Leider war nicht mehr bekannt, welche Längen an Koaxialkabel im Bereich der ZE2 in Schleifen zum Längenausgleich verlegt waren. Deshalb erwies sich die angegebene Position als zu ungenau für die exakte Ortung der Fehler.

Zumindest für das Koaxialkabel zu Mux 14 zeigte sich, dass die Position nur knapp verfehlt wurde. Bei den Aufgrabungen zu Mux 21 wurde unter anderem das Koaxialkabel zu Mux 14 ca. 8 m vor dem Anfang des Kabelgrabens (Mux 16 - 17) beschädigt. Im Zuge der Reparatur zeigte sich, dass das Abschirmgeflecht sehr stark korrodiert war. Das ist ein deutlicher Hinweis auf das Eindringen von Wasser in das Kabel zwischen den beiden Orten. Vermutlich liegt die Störung am Kabel zu Mux 25 ebenfalls vor dem Beginn des Grabens Mux 26 – 27 und konnte deshalb nicht erkannt werden.

Tab. 3.5: Schürfen für Untersuchung von Schäden an Koaxialkabeln

Strecke zwischen Muxen	Zu beobachtende Koaxleitung zu Mux Nr.	Befund
16-17	14	Keine Kabelfehler in dem Bereich erkennbar Bei späterem Kabelfehler (Bagger) vor Beginn der Ausgrabungsstelle (ca. 8 m) ist Abschirmgeflecht sehr stark oxidiert.
27-26	25	Boden sehr feucht Keine Kabelfehler in dem Bereich erkennbar

Die ungenau eingemessenen Positionen mit Abweichungen bis zu 3 m für die Aufgrabungen zur Erkennung von Schäden am Isoliermantel der Koaxialkabel zu den Mux 14 und 25 führten dazu, dass wegen der Unkenntnis des genauen Verlaufes bei den Aufgrabungsarbeiten Kabel verletzt wurden. Die Positionen der Mux waren ausreichend genau angegeben.

Bei den Abschätzungen zur Position der Aufgrabungen aus den TDR-Signalen und der Übertragung auf die geometrische Lage der Störungen war nicht klar, in welcher Weise Koaxial- und Steuerkabel in Schleifen verlegt waren. Offensichtlich lag die gesuchte Position vor den gewählten Abschnitten, wie bei der Behebung der Kabelschäden zu Mux 14 erkennbar war (s.o.).

Leichte Beschädigungen an Kabeln bei diesen Grabungsarbeiten betrafen den Außenmantel eines Koaxialkabels (Mux 14 oder Mux 15) und des 230 V-Kabels. Zur Sicherheit wurden diese Verletzungen mit selbstverklebendem Isolierband repariert und zusätzlich mit Gewebepapier gesichert (Bild 3.4).

Bei den Aufgrabungen an Mux 21 wurden zwei Koaxialkabel (Mux 14 und Mux 17) und ein Steuerkabel (Mux 14) stark beschädigt. Die Defekte wurden repariert, mit Muffen versehen und anschließend mit Zweikomponentenmaterial vergossen.



Bild 3.4: Defekte an Spannungsversorgungskabel (links) und Reparatur der gekappten Kabel (Mitte/rechts). Diese Kabel verlaufen an der Stelle etwa 10 bis 20 cm unter der Erdoberfläche.

3.4.4 Auffällige Sensoren (Laufzeit zu kurz und Oszillationen)

Die angedachten Aufgrabungen zu auffälligen Sensoren (143, 188 und 230), die in ihrem Signalverlauf von den übrigen abweichen, wurden nicht durchgeführt.

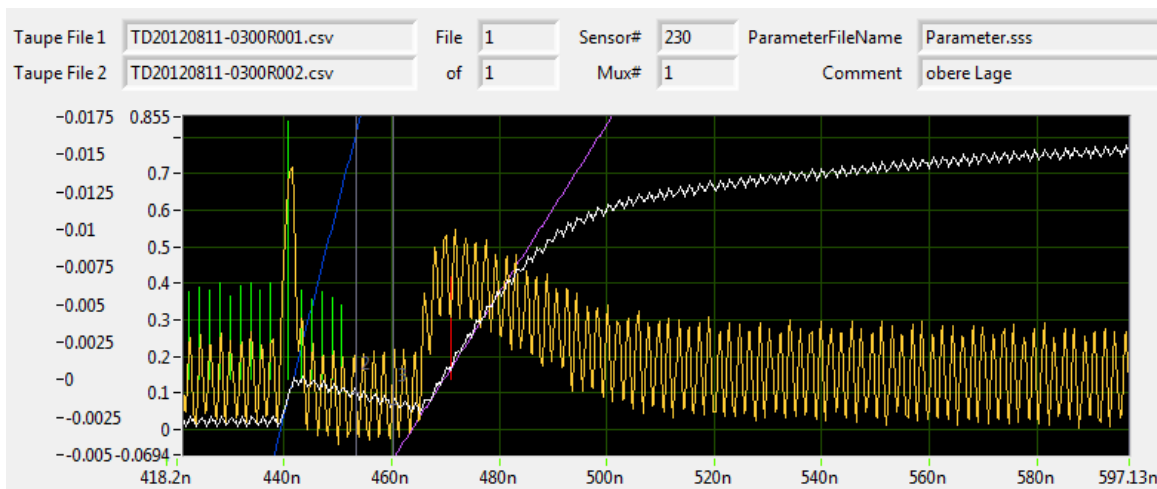


Bild 3.5: Signalverlauf von Sensor 230 (weiße Kurve; andere Kurvenverläufe dienen der Auswertung)

Aber bei Sensor 230 war nachträglich ein Gasbrunnen direkt über dem Sensor angelegt, wobei vermutlich der Sensor beschädigt worden war (Bild 3.5). Das äußert sich in einem Signal, dessen Laufzeit zu kurz ist und das von hochfrequenten Oszillationen überlagert wird. Alle drei Sensoren zeigen ein vergleichbares Bild, nur die Länge des Sensorteiles zwischen den beiden Geraden variiert.

3.4.5 Ergebnis der Mux-Prüfungen nach den Aufgrabungen

Nach den Aufgrabungen der vorgesehenen Mux und der Erkenntnis, dass viele der Störungen auf Wasserzutritt in die Kunststoffgehäuse zurück zu führen sind, wurden weitere Mux mit ähnlichen Symptomen aufgedeckt und untersucht. In Tab 3.6 sind die Gesamtergebnisse dargestellt, wobei auch die Untersuchungen an den in der zweiten Phase aufgedeckten Mux berücksichtigt sind.

In „fett“ markiert sind die vier Multiplexer angegeben, welche nach der elektronischen Prüfung durch neue Mux ersetzt wurden. Bei ihnen war eine Reparatur wegen der fortgeschrittenen Korrosion der Verbindungen und Defekten in der Elektronik nicht möglich. Die weiteren fehlerhaft arbeitenden Mux ließen sich reparieren (3 x Ersetzen von Relais, 5 x Beseitigung von Übergangswiderständen aufgrund von Korrosion innerhalb der Hochfrequenz-Relais).

Die Mux 3, 14 und 30 waren noch voll funktionsfähig, wurden aber präventiv behandelt und die Mux 13 sowie 18 wurden nicht aufgegraben, da sie sich in einem mit dem vorhandenen Baugerät nicht zugänglichen steilen Teil der Deponie befinden.

Tab. 3.6: Messergebnisse vom 07.08.2012, 21.08.2012 und Fehlerprotokoll.

Mux Nr	Pilotton vorhanden	Sensoren ok	defekt
ZE1			
3	Ok	alle	-
4	Ok, schaltet nicht korrekt	alle	-
6	Nein	-	kein Signal
13	Ok	1, 4 – 8	2,3 nur koax
18	Ok	2,3,6,7,8	1 seltsame Kurvenform, 4 nur koax
ZE2			
14	Ok	alle	Gehäusedeckel eingedrückt
15	Ok	alle	-
16	Ok, schaltet nicht korrekt	1 – 3, 5 – 8	4, nur koax
17	Ok, schaltet nicht korrekt	2,4,5	1, nur koax 3,6,7,8
21	7,8	7,8	1 – 6, nur koax
26	Ok	1-8	-
27	5,6,7,8		1 – 4, nur koax
29	6,7	7,8	1 – 6, nur koax
30	Ok	alle	-

Zusätzlich wurde der Anschluss des Steuerkabels gegen mögliche Korrosion geschützt und bei den Kabeldurchgängen die Wahrscheinlichkeit eines Wasserzutritts reduziert (Bild 3.6).



Bild 3.6: Isolierung des Steuerkabelanschlusses mit selbstverklebendem Isolierband und zusätzliche Abdichtung der Kabeldurchführungen (PG-Verschraubungen) mit Knetmasse in den ausgetauschten/reparierten Mux.

3.4.6 Aktuelles Prüfprotokoll nach Ersetzen der fehlerhaften Multiplexer

Nach Abschluss aller Arbeiten auf der Deponie wurden die im normalen Rhythmus zweimal täglich genommenen Daten ausgewertet und die Resultate bewertet. In Tab. 3.7 sind die Ergebnisse für alle Muxen und Sensoren aufgelistet.

Tab. 3.7 zeigt die aufgetretenen Fehler und mit welcher Maßnahme die betroffenen Multiplexer repariert wurden. Diese teilten sich folgendermaßen auf: Bei fünf Geräten ließ sich eine schlechte Schaltfunktion der Relais aufgrund von Korrosionseffekten an den Hochfrequenzkontakten beseitigen und die Muxen regenerieren. An drei weiteren Geräten konnten die Schäden durch Austausch der verbauten Relais durch neue beseitigen. Bei vier Muxen war die Elektronik betroffen und die Geräte wurden ersetzt.

Tab. 3.7: Ergebnis von Messungen aller Sensoren und Multiplexer nach Abschluss der Reparaturarbeiten (22.08.2012). Die Liste ist sortiert nach ZE1 und ZE2. Gelb unterlegt sind die bekannten Sensoren mit Auffälligkeiten, die durch die Aufgrabungen nicht beseitigt werden konnten.

Anmerkung	Mux	Sensor	Bemerkung	Defekte
ZE1				Sensor/Mux
	1	107,108,109,110,227,228,229,230	Ok; 230 zu kurz, Osz.	
	2	103,104,105,106,223,224,225,226	Ok	
Mux Oxidation an HF-Relais beseitigt	3	100,101,102,219,220,221,222 99	ok Nur Koaxanteil Sensor	1/0
Mux ersetzt	4	95,96,97,98,215,216,217,218	ok	0/0
	5	91,92,93,94,211,212,213,214	Ok	
Mux ersetzt	6	87,88,89,90,208,209,210,207	Ok	0/0
	7	83,84,85,86,203,204,205,206	Ok	
	8	79,80,81,82,199,200,201,202	Ok	
	9	75,76,77,78,195,196,197,198	Ok	
	10	71,72,73,74,191,192,193,194	Ok	
	11	67,68,69,70,187,188,189,190	Ok; 188 zu kurz, Osz.	
	12	63,64,65,66,183,184,185,186	Ok	
	13	59,62,179,180,181,182 60,61	Ok Nur Koaxanteil Sensor	2/0
	18	40,41,159,160,161,162 39,42	Ok Nur Koaxanteil Sensor	2/0
	22	33,34,152,153,154 151	Ok; nur 6 Sensoren Signalqualität	0/0

Anmerkung	Mux	Sensor	Bemerkung	Defekte
ZE2				
Mux Oxidation an HF-Relais beseitigt	14	55,56,57,58,175,176,177,178	ok	
Mux Oxidation an HF-Relais beseitigt	15	51,52,53,54,171,172,173,174	Ok	
Mux ersetzt	16	48, 49,50,167,168,169,170 47	Ok Nur Koaxanteil Sensor	1/0
Mux ersetzt	17	43,44,45,46,163,164,165,166	Ok	0/0
	19	29,30,31,32,147,148,149,150	Ok	
	20	25,26,27,28,143,144,145,146	Ok; 143 zu kurz, Osz.	
In Mux Relais ersetzt OMRON-Relais	21	155,156, 35,36,37,38,157,158	Ok	0/0
	23	21,22,23,24,139,140,141,142	Ok	
	24	17,18,19,20,135,136,137,138	Ok	
	25	13,14,15,16,131,132,133,134	Ok	
Mux Oxidation an HF-Relais beseitigt	26	9,10,11,12,127,128,129,130	ok	0/0
In Mux Relais ersetzt OMRON-Relais	27	7,8,117,118,125,126	ok; nur 6 Sensoren	0/0
	28	5,6,115,116,123,124	Ok; nur 6 Sensoren	
In Mux Relais ersetzt OMRON-Relais	29	3,4,113,114,121,122	ok; nur 6 Sensoren	0/0
Mux Oxidation an HF-Relais beseitigt	30	1,2,111,112,119,120	ok; nur 6 Sensoren	
			Summe Defekte	6/0

Durch die Maßnahmen konnten alle Sensoren, außer den bekannten nicht funktionsfähigen, wieder zur Funktion gebracht werden, so dass nach Abschluss der Bauarbeiten (22.08.2012) alle Muxen korrekt arbeiteten und in Summe 224 Sensoren von 230 messfähig waren.

3.4.7 Nach dem Reparaturzeitraum aufgetretene Fehler

Die Auswertung der Messperiode zwischen dem 22.08.2012 und dem 09.10.2012 zeigt allerdings ein neues Bild: Multiplexer 19 ist ab dem 28.08.2012 komplett ausgefallen (Sensoren 29 – 32, 147 – 150) und bei Mux 23 sind ab dem 09.09.2012 fünf Sensoren (21 – 24, 140) ausgefallen.

Die Zuleitung zu Mux 19 führt über die Kabeltrasse, die auch an Mux 17 vorbei läuft. Eine Möglichkeit für den Ausfall von Mux 19 könnte eine Beschädigung der Steuerleitung oder dem Koaxialkabel während der Arbeiten sein, die sich erst nach der Abschlussprüfung bemerkbar gemacht hat. Eine weitere Fehlerquelle könnte ebenfalls Wasserzutritt sein, der zufällig zu diesem Zeitpunkt zum Ausfall geführt hat.

Mux 23 war von den Aufgrabungen nicht betroffen. Die Daten vor dem Ausfall zeigen keinerlei Anzeichen für eine bevorstehende Fehlfunktion, z.B. aufgrund zu hoher Übergangswiderstände in den Multiplexer-Relais. Möglicherweise ist aber auch hier Wasserzutritt der Grund für den Ausfall.

3.5 Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Aufgrabungsmaßnahmen konnten die aufgetretenen Fehlfunktionen im Dichtungskontrollsystem beseitigt werden. Aufgrund der bei den ersten aufgedugenen Multiplexer gefundenen Fehlerquellen wurden weitere Geräte identifiziert, die zusätzlich zu den geplanten Aufgrabungen in gleicher Weise behandelt wurden.

Die am häufigsten aufgetretene Fehlfunktion wird durch den Zutritt von Wasser, welches vermutlich unter Druck durch die Kabeldurchführungen in das Innere der Außengehäuse der Mux eindringt, bewirkt, die dann überwiegend voll gefüllt waren. Die metallischen Innengehäuse dagegen waren, bis auf geringe Oxidationserscheinungen an der Steckerbuchse des Steuerkabels, überwiegend trocken. Trotzdem kann die feuchte Atmosphäre im Innern des Mux zu erhöhter Korrosion der Kontakte in den Hochfrequenz-Relais führen. Der erhöhte Übergangswiderstand führt zum schleichenden Ausfall der Schaltungsverbindungen zu den zugehörigen Sensoren im Feld.

Bei den Mux, bei denen die elektrische Behandlung der Kontakte nicht zum Ziel geführt hat, wurden die Relais gegen neue ausgetauscht. Vier Multiplexer mussten komplett ersetzt werden, da bei ihnen die Elektronik defekt und nicht reparierbar war.

Mögliche Gründe für die gehäuft auftretenden wassergefüllten Mux-Gehäuse sind die unterschiedlichen Einbettungen der Mux in Sand für den Bereich der Zentraleinheit 1 und in Löss für den Bereich der Zentraleinheit 2 und/oder ein hoher Wasserzutritt aus dem lateralen Abfluss in der Rekuschiicht.

Die nach Wassergehalt ausgewerteten Bodenproben belegten die Gültigkeit der für die Umsetzung der Messsignale notwendigen Kalibrierfunktion für die Kontrollschichten, sowohl in der Rekuschiicht als auch in der Schicht unterhalb des Dichtungsaufbaus.

Zeitlich nahe im Anschluss an die durchgeführten Maßnahmen traten an zwei weiteren Mux (19 und 23) Ausfälle auf.

Der zeitliche Verlauf der aufgetretenen Fehlfunktionen an den Mux lässt den Schluss zu, dass bei der gewählten Einbauvariante im Oberboden der Wasserzutritt eine wesentliche Rolle spielt. Innerhalb von acht Jahren sind von 30 Multiplexern 9 fehlerhaft geworden. Ein direkter Zugang zu den Muxen würde die Diagnostik und die Reparatur der Geräte erheblich erleichtern und den Aufwand von Aufgrabungen stark reduzieren. Dazu könnten die Muxen oberflächennah installiert und mit einem von oben direkt zugänglichen in die Erde eingelassenen Betonring umgeben werden. Als Absicherung der Elektronik gegen zu starke Temperaturvariationen – sowohl zu hohe Temperaturen, als auch starker Frost im Winter – dient eine etwa 10 cm starke Isolierschicht, etwa aus Styrodur. Ein stabiler Deckel sollte zusätzlich dafür sorgen, dass der gesamte Aufbau gegen mechanische Beschädigungen von oben und gegen Regenwasser geschützt ist.

Diese Maßnahmen sollten bei zukünftigen Aufbauten berücksichtigt werden. Ansonsten war der Serviceaufwand in der gesamten Betriebszeit sehr gering.

4 Beleg für Verbesserung der Randzuflüsse

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den 112 TAUPE-Sensoren aus der Kontrollschicht unterhalb des Abdichtungssystems. Betrachtet man die Ergebnisse für die Einzelsensoren seit 01. Januar 2008, gilt generell:

Es gibt einen Jahrgang der TAUPE-Messwerte, nämlich mit einem relativen Maximum im Spätsommer und dem entsprechenden Minimum im März/April, der bei den Sensoren unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Dieser Verlauf spiegelt einen Temperaturgang wieder. Hier wird keine Temperaturkompensation (siehe Kapitel 5.2) durchgeführt. Die Tendenz des Feuchtegehaltes kann auch so genau genug bewertet werden.

Untersucht wurde das Verhalten repräsentativer Sensoren in Gruppen entlang folgender Schnittlinien (die Lage der Sensoren sind Bild 4.1 zu entnehmen):

- Lysimeter und rechter Feldrand: die Sensoren 1, 5, 9, 13 und 15
- Entlang des unteren Wirtschaftsweges: die Sensoren 1, 33, 75, 94 und 98
- Auf der Kuppe: die Sensoren 13, 15, 31, 57 und 110
- Linker Feldrand: die Sensoren 94, 98, 102, 106 und 110
- Horizontalschnitt Testfeldmitte: die Sensoren 9, 25, 26, 27, 28, 70, 72, 83 und 85
- Vertikalschnitt Testfeldmitte: die Sensoren 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87 und 89

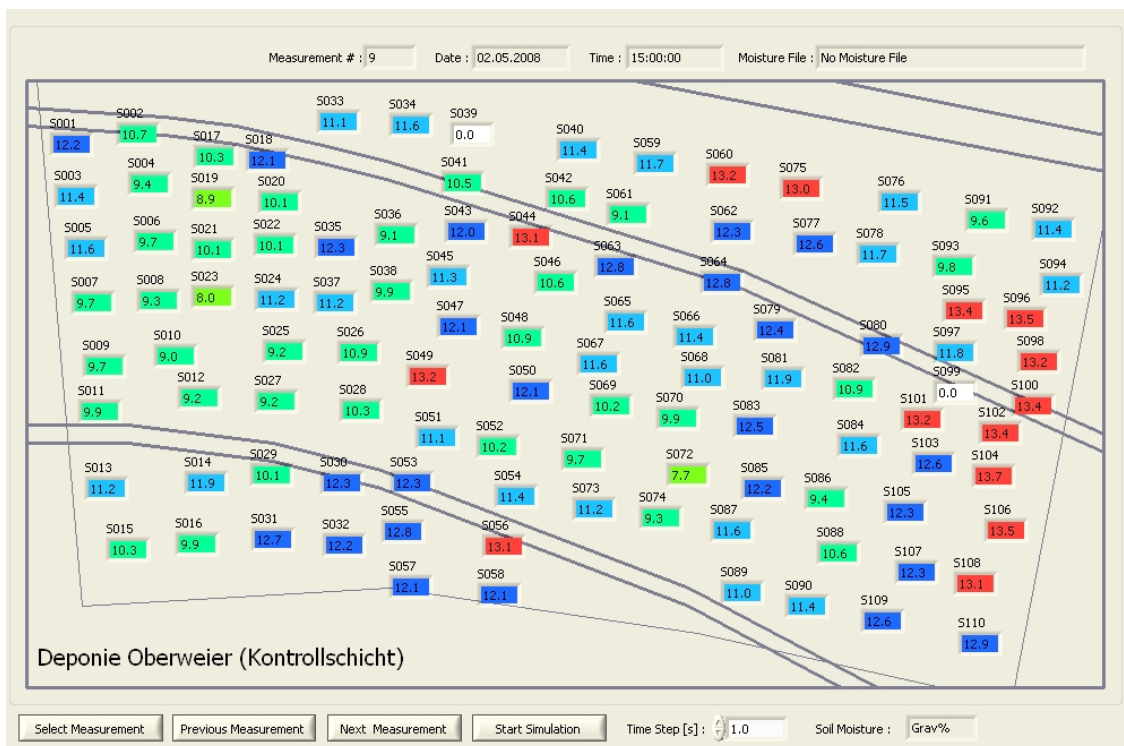


Bild 4.1: Lage der Sensoren in der Kontrollschicht (Feuchtedarstellung ist exemplarisch)

Bis etwa Juni 2010 erfolgte der Abfluss von Niederschlagswasser aus dem gesamten Kuppenbereich ungerichtet in den oberen Bereich der abgedichteten Deponie und entlang dem linken Rand bis zum unteren Bermenweg. Dadurch ergaben sich erhöhte Wassergehalte auf der Kuppe und besonders am linken Rand (siehe Bild 4.1). Aufgrabungen am oberen Ende des Bermenweges bezeugten den Zulauf von Wasser an dieser Stelle und bestätigten die Messungen des TAUPE-Monitoringsystems (Bild 4.2).

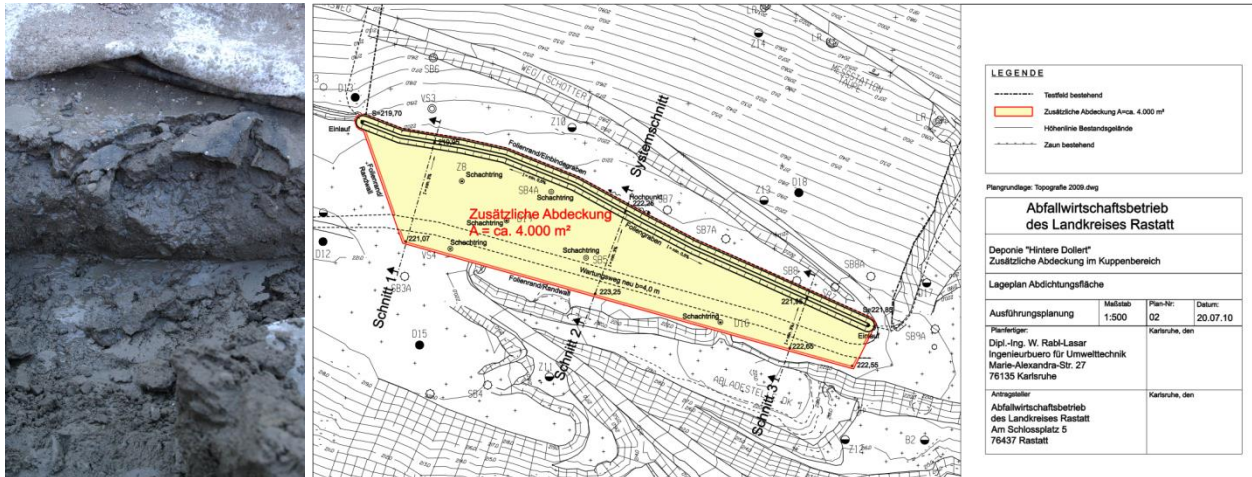


Bild 4.2 Schürfe bis unter Abdichtung zeigt Wasserzutritt

Bild 4.3: Provisorische Abdichtungsmaßnahme zum Ableiten des Oberflächenwassers der Kuppe

Zwischen Juli und September wurde die vom der Landkreis Rastatt beauftragte „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ durchgeführt (Bild 4.3). Die Maßnahmen sollen den Zufluss von Oberflächenwasser zur Deponie reduzieren.

Im Folgenden wird in der Beschreibung der davon betroffenen Sensoren auf diese Maßnahme Bezug genommen.

4.1 Lysimeter und rechter Feldrand (Sensoren 1, 5, 9, 13, 15)

Die Sensoren der Kontrollschicht (Bild 4.4) im Lysimeter (Sensor 1 und 5) zeigen über die Jahre einen nahezu unveränderten Jahrgang. Dagegen zeigen die Sensoren oberhalb seit Sommer 2010 einen deutlichen Trend zu niedrigeren Wassergehalten. Die Sensoren 1 und 5 (Lysimeter) reagieren unmittelbar auf Niederschlagsereignisse (Zufluss vom Rand aus dem benachbarten Feld), bei Sensor 15 (oberhalb des Lysimeter, praktisch auf der Kuppe) ist eine Verschiebung des Jahrgangs in 2011 erkennbar, ab 2012 ist der Gang mit den anderen Sensoren wieder harmonisiert. Für die Sensoren 13 und 15 ist eine abnehmende Bodenfeuchte als Langzeittendenz deutlich erkennbar (siehe auch unter Sensorgruppe „Kuppe“).

Somit belegt der Trend der Wassergehalte der Sensoren 13 und 15 die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“.

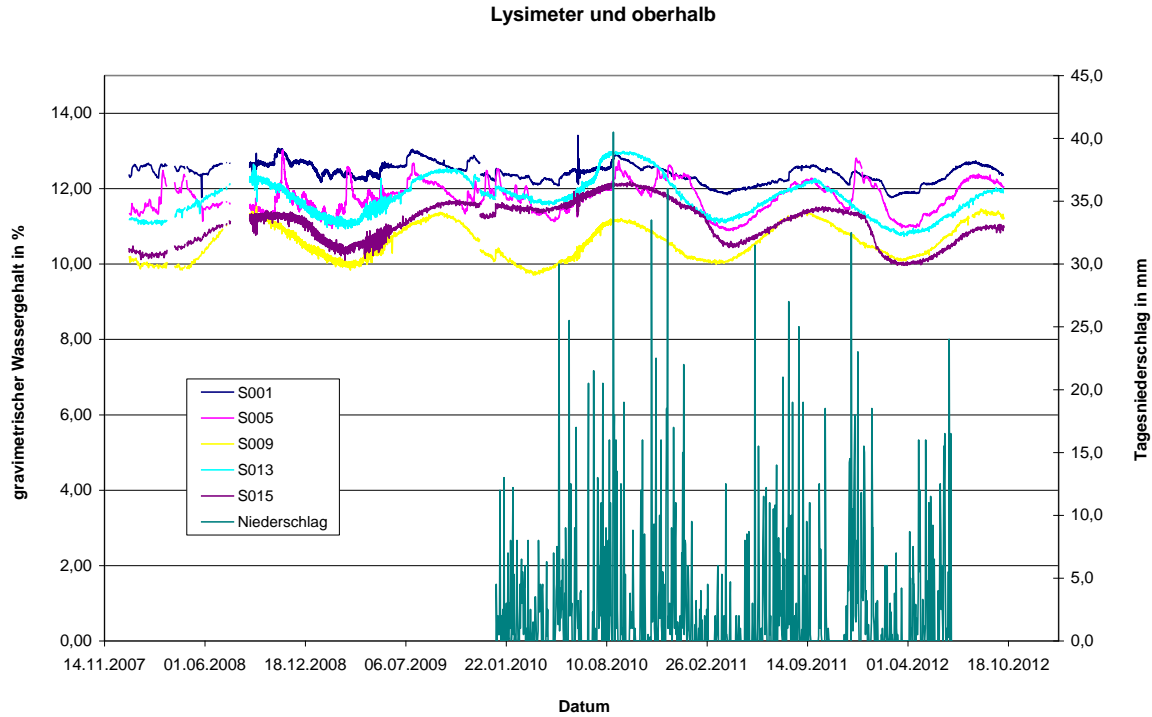


Bild 4.4: Lysimeter und rechter Feldrand

4.2 Entlang des unteren Wirtschaftsweges (Sensoren 1, 33, 75, 94 und 98)

Einen Langzeittrend zu niedrigerem Wassergehalt (Bild 4.5) zeigt in dieser Gruppe Sensor 98.

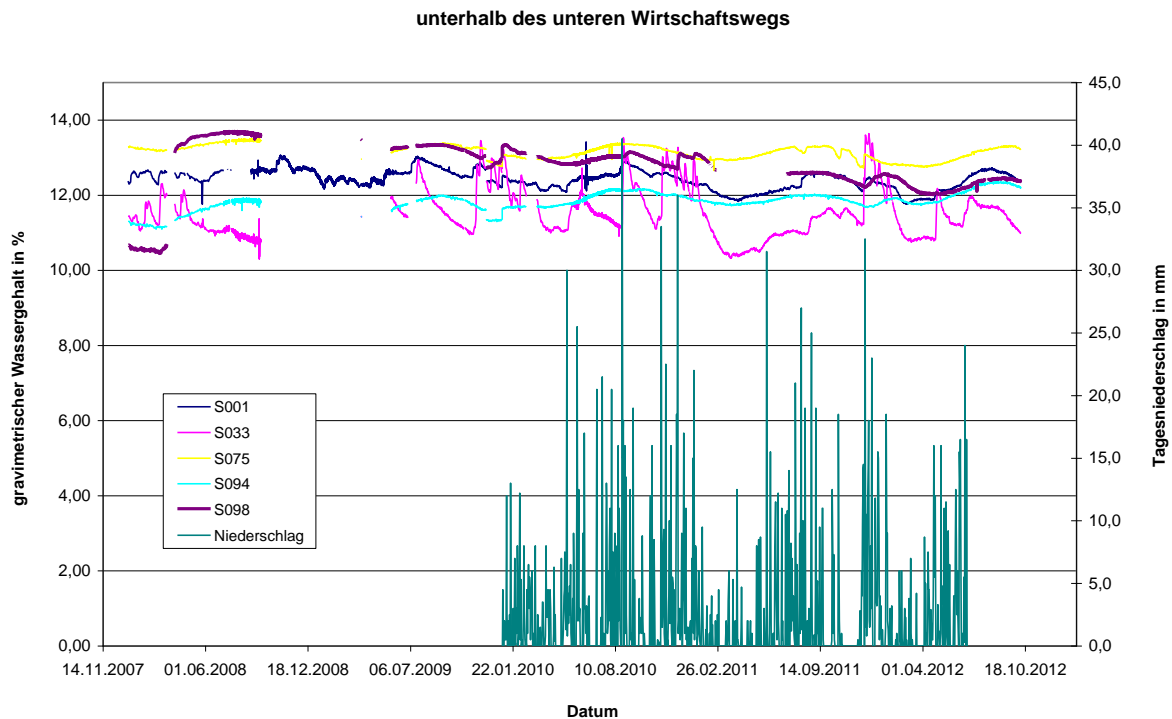


Bild 4.5: Entlang dem unteren Wirtschaftsweg

Er liegt am linken Rand des Testfelds und wird unten besprochen (linker Feldrand). Die anderen Sensoren zeigen kaum Variationen, Sensor 1 (s.o. bei Lysimeter und rechter Feldrand) reagiert auf Niederschlagsereignisse. Das ist noch ausgeprägter bei Sensor 33 (unterhalb der Zentraleinheit ZE2, unterhalb des Wirtschaftsweges) zu beobachten.

Sensor 98 gibt einen ersten Hinweis auf die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“. In diesem Zuge wurde auch die Ableitung von Niederschlagswasser entlang des linken Randes des Testfeldes neu geregelt. Die Feuchteabnahme bei Sensor 98 von 14 auf 12 Gew.-% während des Beobachtungszeitraums ist signifikant.

Auffällig bleibt Sensor 33. Hier schlagen die Niederschlagsereignisse unmittelbar durch. Offensichtlich besteht in diesem Bereich ein hydraulischer Kurzschluss zwischen dem Randgraben, der den Wirtschaftsweg begleitet, und der Kontrollschicht. Die Wassermengen, die in diesem Bereich über die KS oder KBS als Schichtabflüsse gemessen werden, sind trotzdem unerheblich (Sammler 1 und 2), da offensichtlich nur eine geringe Fläche betroffen ist.

4.3 Auf der Kuppe (Sensoren 13, 15, 31, 57 und 110)

Alle Sensoren (Bild 4.6) zeigen eine Tendenz zu niedrigeren Wassergehalten, besonders deutlich bei den Sensoren 13 und 15 (s.o. bei Lysimeter und rechter Feldrand) zu sehen.

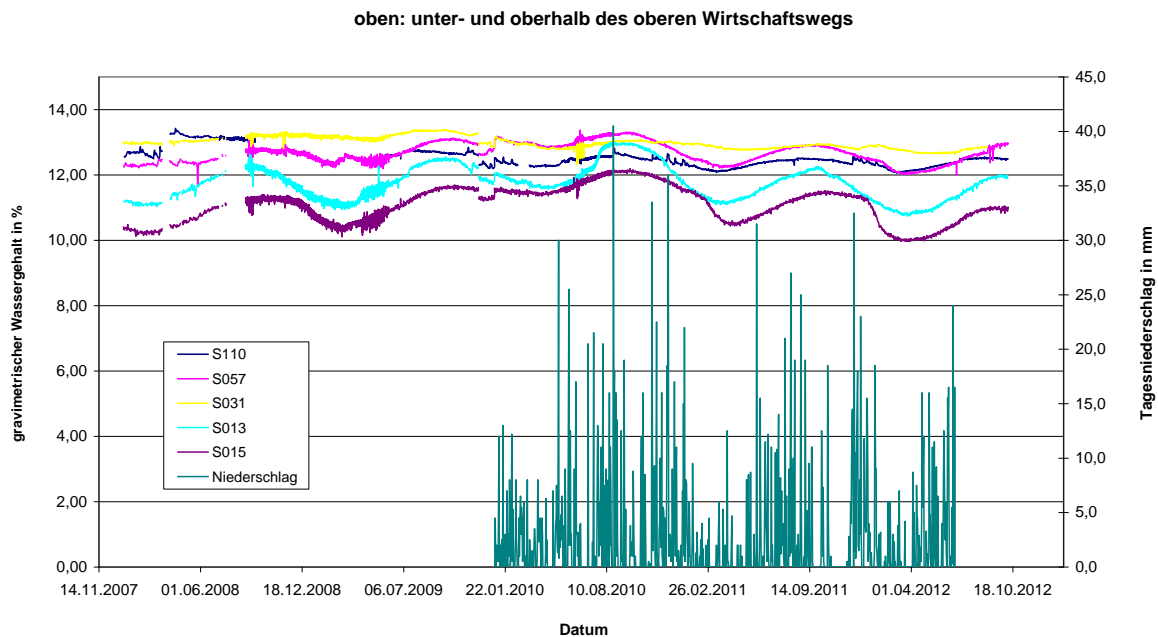


Bild 4.6: Auf der Kuppe

Diese abnehmende Feuchte ist besonders nach den Maßnahmen im Sommer 2010 zu erkennen. Für den Zeitraum, in dem Niederschlagsdaten vorliegen (ab Januar 2010) reagieren die Sensoren nicht unmittelbar darauf, die Ausnahme – mit allerdings kleiner Reaktion – bildet Sensor 110, der sich auf der Kuppe ganz links befindet, was eher auf die Randlage zurückzuführen ist.

Hier wird die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ sehr deutlich. Während der Feuchtegehalt im Bereich des Sensors 15 bis zur Umsetzung der Maßnahme im Sommer 2010 ansteigt (Zufluss von Niederschlagswasser von der Kuppe unter die Abdichtung), sinkt er unmittelbar mit Abschluss der Maßnahme bis heute ab. Die Differenz der Feuchte von 2 Gew.-% ist signifikant.

4.4 Linker Feldrand (Sensoren 94, 98, 102, 106 und 110)

Zunächst zeigen alle gezeigten Sensoren (Bild 4.7) eine stark ansteigende Bodenfeuchte im Zeitraum März 2008. Im weiteren Verlauf (mit Ausnahme von Sensor 94) zeigt sich dann die Tendenz zu niedrigeren Wassergehalten, die sich seit Mitte 2010 verstärkt. Sensor 94 befindet sich wie die anderen Sensoren dieser Gruppe am linken Rand und gleichzeitig unterhalb des unteren Wirtschaftsweges. Sein Jahresgang bleibt praktisch unverändert. Eine, wenn auch geringe, direkte Reaktion auf Niederschlagsereignisse zeigt inzwischen nur noch Sensor 110 (links, auf der Kuppe), die Sensoren 98, 102 und 106 reagieren mit Verzögerung.

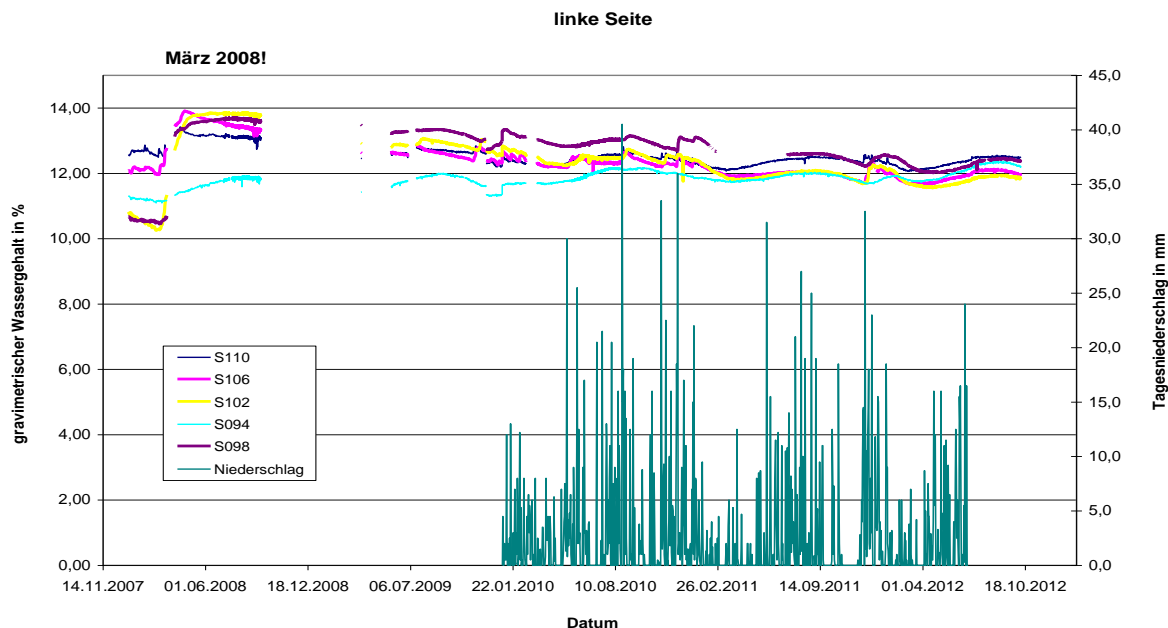


Bild 4.7: Linker Feldrand

Mit dieser Sensorgruppe wird der erste Hinweis von Sensor 98 (s.o. bei „Entlang des unteren Wirtschaftsweges“) bestätigt. Die Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ zeigt eindeutig Wirkung, d.h. die Feuchtegehalte nehmen kontinuierlich ab.

Interessant ist außerdem das Verhalten von Sensor 94: während vor der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ eine Reaktion auf Niederschlagsereignisse klar erkennbar war, ist diese Reaktion nun weg. Das deutet darauf hin, dass diese Beeinflussung des Feuchteverlaufes von der Ableitung des Niederschlagswassers von der Kuppe vor der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ herrührte. Der Einfluss, der bei Sensor 33 beschrieben ist, ist hier nicht erkennbar. Das hilft mit, den Einfluss des hydraulischen Kurzschlusses räumlich abzugrenzen.

4.5 Horizontalschnitt Testfeldmitte (Sensoren 9, 25, 26, 27, 28, 70, 72, 83 und 85)

Tendenzen in den Feuchtegehalten der Sensoren (Bild 4.8) sind hier wie erwartet kaum feststellbar. Sensor 85 zeigt als Einziger unmittelbare Reaktionen auf Niederschlagsereignisse.

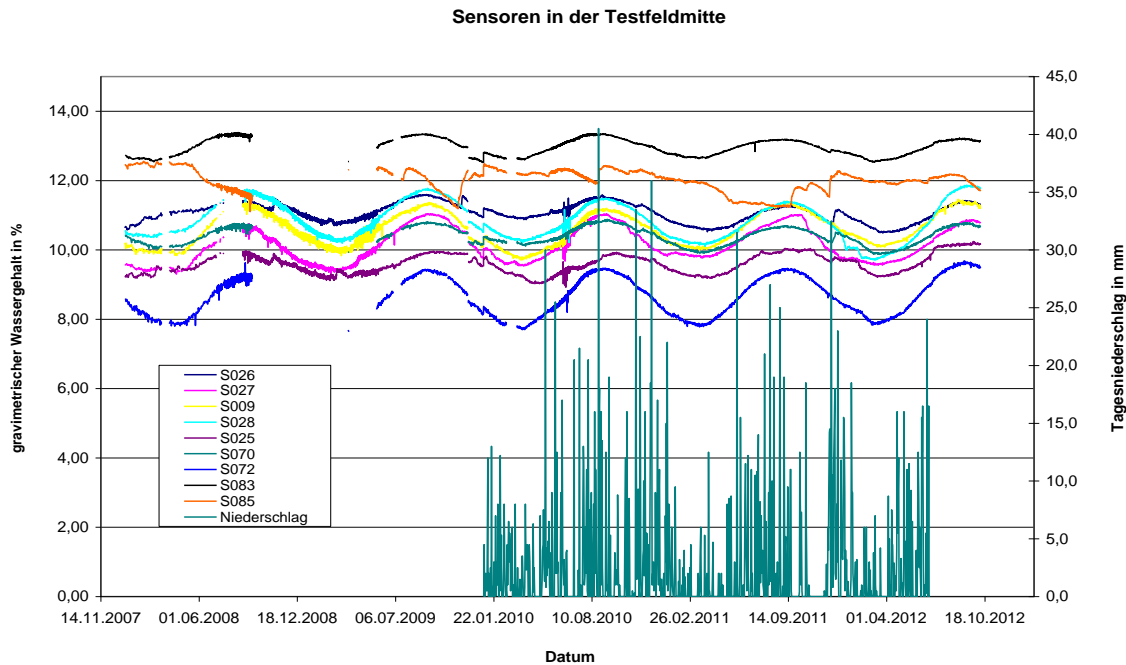


Bild 4.8: Horizontalschnitt Testfeldmitte

Diese Feuchteverläufe waren auch so erwartet. Hätte sich der Einfluss des Zuflusses von Niederschlagswasser von der Kuppe hier noch gezeigt, wäre es ein Indiz dafür gewesen, dass die Kapillarschicht unterdimensioniert gewesen wäre. So kann mit dieser Sensorgruppe belegt werden, dass die Kapillarschicht das anfallende Niederschlagswasser (vertikal durch den Wurzelboden) lateral abführt.

Die Korrespondenz von Sensor 85 mit den Niederschlagsereignissen zeigt ein sehr lokales Verhalten. Schon der in Hangrichtung folgende Sensor 83 gibt sich von den Niederschlagsereignissen völlig unbeeindruckt. Sollte sich das Verhalten von Sensor 85 im weiteren Beobachtungszeitraum so bestätigen, so könnte über eine Quantifizierung des Niederschlagszutritts an dieser Stelle die Sinnhaftigkeit einer bautechnischen Sanierung abgeschätzt werden.

4.6 Vertikalschnitt Testfeldmitte (Sensoren 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87 und 89)

Eine leichte Tendenz zu niedrigeren Feuchtegehalten zeigen die Sensoren 85 (s.o.), 87 und 89 (Bild 4.9). Sie befinden sich im oberen Teil des Testfelds. Alle anderen Sensoren zeigen einen unveränderten Jahresgang. Unmittelbar auf Niederschlagsdaten reagieren die Sensoren 75, 79 und 85 (s.o.), davon Sensor 79 (oberhalb von Zentraleinheit ZE1) mit der deutlichsten Reaktion.

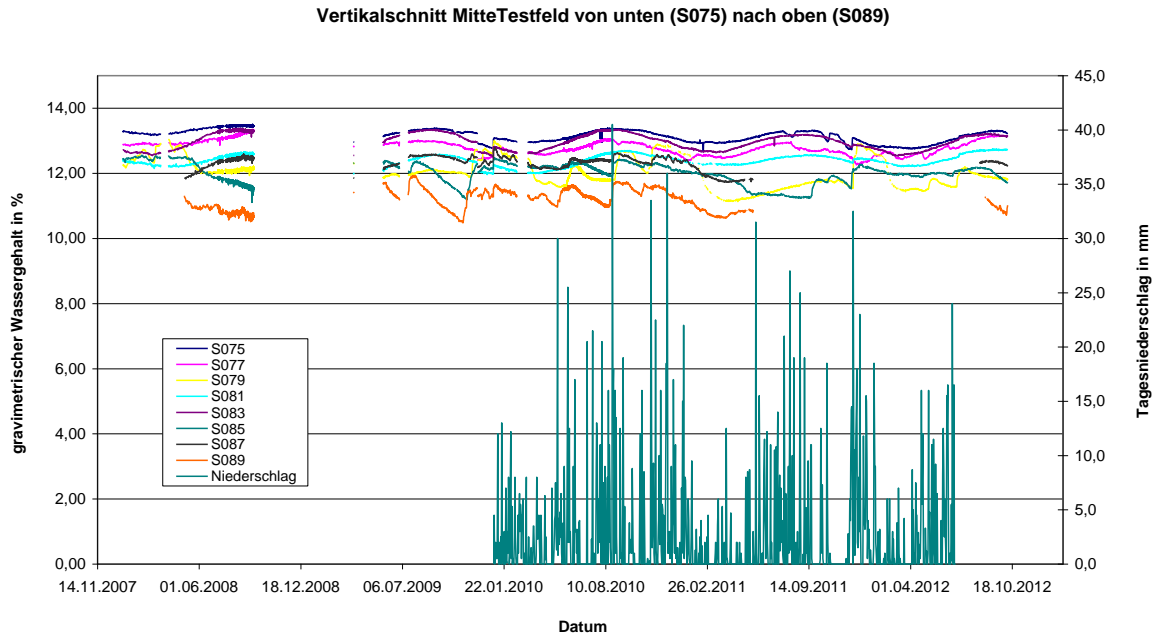


Bild 4.9: Vertikalschnitt Testfeldmitte

Der Verlauf war für die Sensoren 75 bis 83 so erwartet, Begründung siehe unter „Horizontalschnitt Testfeldmitte“. Die Reaktion der Sensoren 85, 87 und 89 belegt die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“.

Die Reaktion der Sensoren 75 und 79 auf Niederschlagsereignisse belegt die Erkenntnisse zu Sensor 33. Im Bereich des Randweges und im Bereich des Endes des Oberflächenabdichtungssystem am Böschungsfuß sind offenbar hydraulische Verbindungen vorhanden.

4.7 Zusammenfassung

Von 112 Sensoren in der Kontrollschicht, reagieren ca. 30 auf Niederschlagsereignisse. Die Änderungen der Bodenfeuchte sind in Ausmaß und zeitlicher Verzögerung sehr unterschiedlich, das soll durch die folgende Abbildung von 7 Sensoren (Bild 4.10) gezeigt werden. Gewählt wurde der Winter 2011/2012 (Dezember und Ende Januar). Es fielen insgesamt 324 mm Niederschlag pro Quadratmeter, dargestellt sind die Tagessummenwerte.

Es gibt Sensoren die unmittelbar reagieren, wie 33, 59 und 79. Die ersten beiden Sensoren reagieren auch noch auf Folgeereignisse, während 79 sich erst Ende März wieder dem Novemberwert annähert.

Eine andere Gruppe, hier als Beispiel die Sensoren 22 und 46, reagiert mit Verzögerung, die bis zu einer Woche dauern kann. Die deutlichste Verzögerung bei gleichzeitigem Anstieg der Bodenfeuchte wird bei Sensor 36 sichtbar, die erste Reaktion erfolgt fast 3 Wochen nach den kräftigen Niederschlägen Anfang Dezember, die maximale Bodenfeuchte an Sensor 36 wurde dann Mitte Januar 2012 gemessen. Anschließend erfolgt ein sehr langsames Abklingen der Feuchte.

Auswahl von Sensoren in der Kontrollschicht, die auf Niederschlagsereignisse reagieren

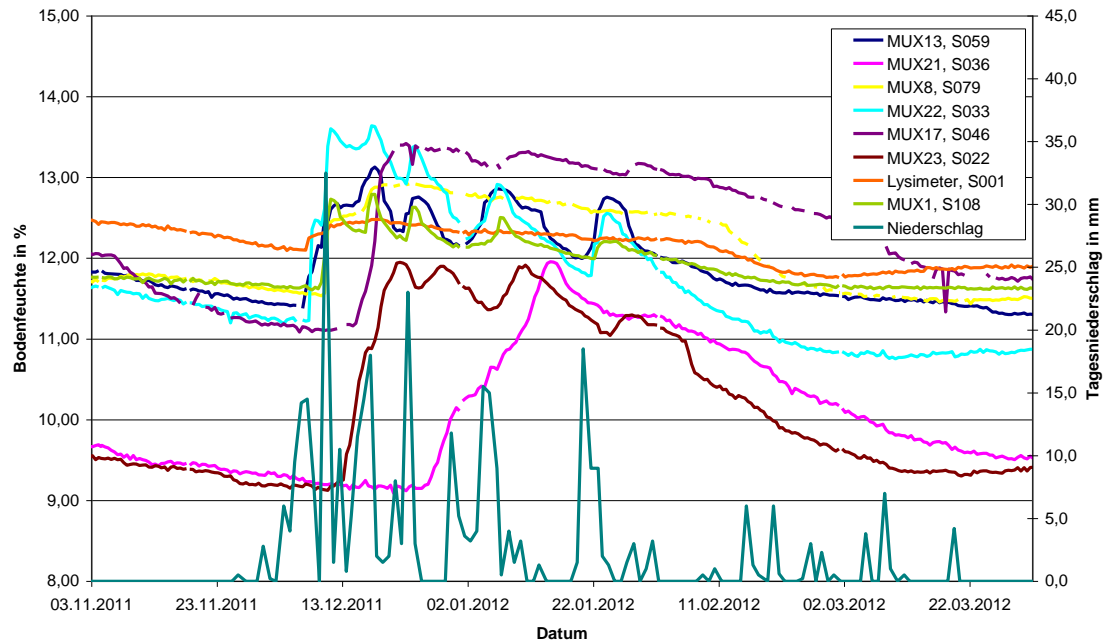


Bild 4.10: Reaktion auf Niederschlagsereignisse

Als Beispiel für eine zwar unmittelbare, im Ausmaß jedoch schwache Reaktion wurde Sensor 1 gewählt. Der Anstieg der Bodenfeuchte (von hohem Niveau) beträgt weniger als 0,5%, er klingt sehr langsam ab.

Zur Lage der Sensoren mit Reaktion auf Niederschlagsereignisse:

Ein Drittel dieser Sensoren liegt rund um die Zentraleinheit ZE2 und im Lysimeterfeld (Mux 21 bis 24, bzw. 28 und 30). Eine zweite Gruppe von 5 Sensoren liegt ebenfalls im unteren Teil des Beobachtungsfeldes (Mux 16 und 17), zwischen den Zentraleinheiten. Eine weitere Gruppe von 7 Sensoren liegt am linken Rand (Mux 1 bis 4). In der Bild 4.8 ist der Sensor 108 mit der stärksten Reaktion auf Niederschlag gezeigt, der auch auf Folgeereignisse reagiert. Die anderen Sensoren dieser Gruppe zeigen deutlich kleinere Änderungen.

Auf einem groben Raster liegen die meisten Sensoren mit Reaktion auf Niederschlagsereignisse im unteren Teil des Beobachtungsfeldes und am linken Rand nach oben.

Nach Bild 4.5 bis 4.10 wird weiterhin ersichtlich, dass der Einfluss der Niederschlagsereignisse auf die Ausschläge der Sensoren mit zunehmender Zeit gedämpft wird. Dieses und die oben genannten Sensorauswertungen belegen die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“.

5 Aufbereitung der TAUPE-Daten

5.1 Abgleich der Sensoren und Identifizierung von Auffälligkeiten (siehe OZ 3)

Bei der Konzeption des Angebotes war eigentlich vorgesehen, an dieser Stelle einen Abgleich der Sensoren mit der Identifikation von Auffälligkeiten einzufügen. Bei der Umsetzung der Arbeitspakete und wegen des Abstimmungsbedarfs mit der Fach- und Genehmigungsbehörde hat es sich für das gesamte Projekt als sinnvoll und als beschleunigend gezeigt, diese Analyse in Top 3 zu integrieren.

Die Auffälligkeiten sind somit auch in die Identifizierung der Aufgrabungen eingeflossen und waren hilfreich, mit Top 4 die Wirksamkeit der Maßnahme „Provisorische Abdeckung der Kuppe“ zu bewerten.

Daher werden diese Darstellungen hier nicht mehr wiederholt, oder – aus dem Zusammenhang gerissen – separat dargestellt.

5.2 Temperaturkompensation

Die Aufzeichnungen der Sensoren (gravimetrischer Wassergehalt [%] über die Zeit) unterliegen alle einem Temperaturgang. Das rührt aus der Tatsache, dass die Dielektrizitätszahl (DZ) temperaturabhängig ist.

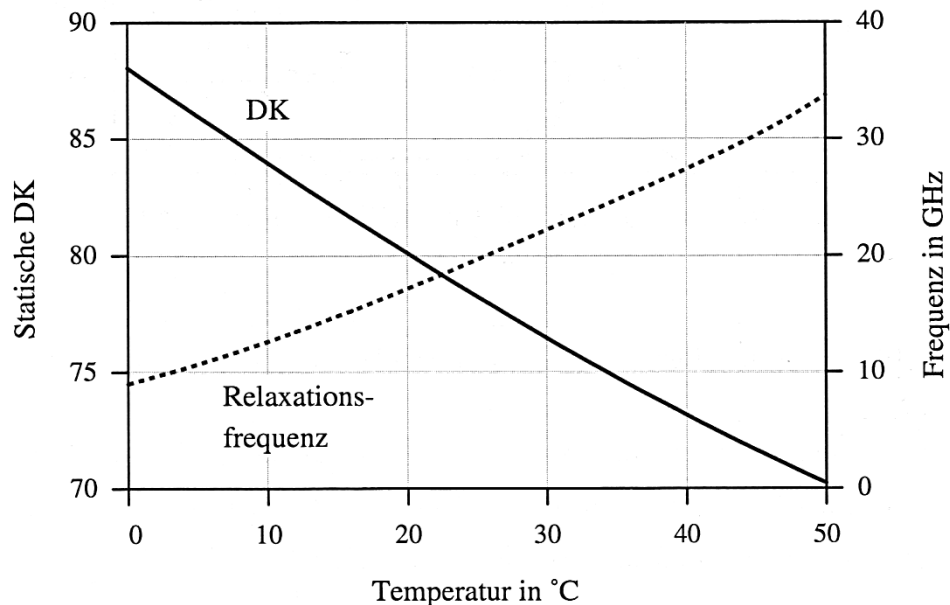


Bild 5.1: Temperaturabhängigkeit der statischen DZ (hier im Bild als DK bezeichnet) und der Relaxationsfrequenz von Wasser (Hübner, 1999)

Betrachtet man den Temperaturbereich im Boden, der in einem bestimmten, durch die Dämmwirkung des Bodens verzögerten Jahresgang, auftritt, so sind das sicherlich

etwa 10 ° Celsius. Wie aus dem Bild 5.1 ersichtlich wird, ändert sich die statische Dielektrizitätszahl von Wasser in diesem Bereich um ca. 5.

Die Temperaturabhängigkeit der statischen DZ von Wasser hat also auf die dielektrische Feuchtemessung einen nicht zu unterschätzenden Einfluss. Sie verringert sich mit steigender Temperatur. Dieses Verhalten lässt sich mit der zunehmenden thermischen Bewegung der Moleküle erklären, die eine Gleichverteilung der Dipolorientierung anstrebt und damit dem angelegten elektrischen Feld entgegenwirkt (Hübner, 1999).

Es können in Bodengemischen folgende Fehlergrößen entstehen (Bild 5.2):

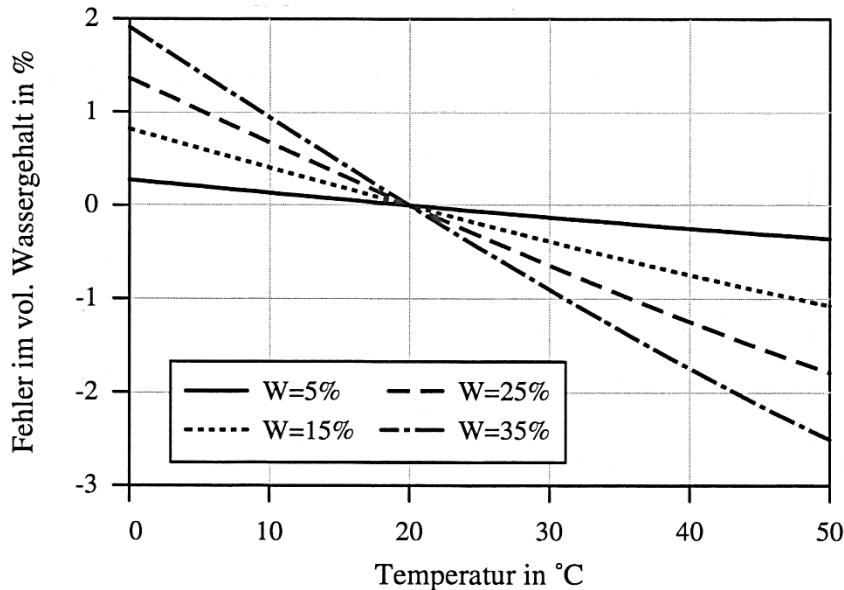


Bild 5.2: Typische Messfehler bei Nichtberücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der statischen DZ von Wasser (Bezug: T = 20° C), Hübner 1999

Untersuchungen des Einflusses des Temperaturverlaufes der Relaxationsfrequenz von Wasser (siehe gestrichelte Linie in Bild 5.1) auf die Messergebnisse haben ergeben, dass dieser im hier vorliegenden Frequenzbereich bis 1 GHz gering ist. Er wird im Weiteren auch vernachlässigt (Hübner, 1999).

Es wurde nun folgendes weitere Vorgehen gewählt:

Es liegen keine Temperaturdaten direkt aus den Kontrollschichten unterhalb und oberhalb der Dichtung vor. Deshalb wurde aus Feuchteverläufen verschiedener Sensoren an diesen Orten ein sinusförmiger Temperaturverlauf erzeugt, der die jahreszeitlichen Veränderungen angenähert wiedergibt. Der Feuchteverlauf eines spezifischen Sensors wurde damit in der Amplitude korrigiert und dann bewertet, ob die gewünschten Aussagen (Bewertung der Dichtigkeit und der Funktion des Oberflächenabdichtungssystems) weiterhin prägnant sichtbar bleiben.

Ausgewählt wurden die Sensoren 86, 26, und 72, alle aus der Kontrollschicht unter der Kapillarsperre, und Sensor 111 als Referenz aus der Kontrollschicht unter dem Wurzelboden (Bild 5.3). In der Kontrollschicht unter der Kapillarsperre erfolgt auch der Beleg der Funktion des Oberflächenabdichtungssystems. Die Lage in der Mitte der Böschung wurde gewählt, weil hier Einflüsse von Zuflüssen vom Rand etc. auszuschließen waren.

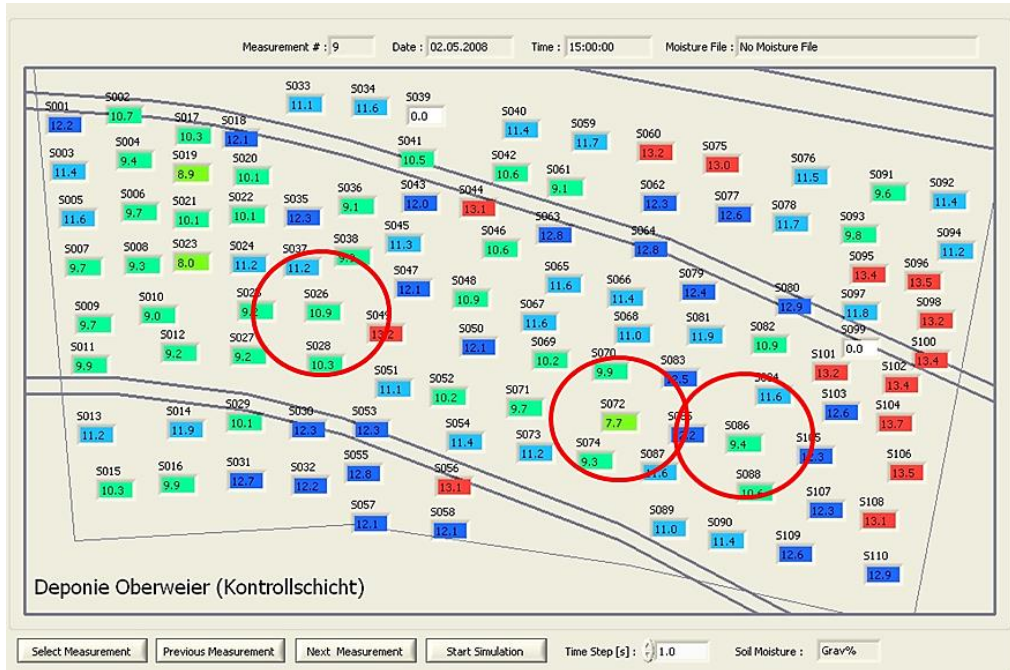


Bild 5.3: Lage der gewählten Sensoren

5.3 Betrachtung von Einzelsensoren

Im Beobachtungszeitraum (hier bis Mitte 2011) prägt sich bei **Sensor 86** der Temperatureinfluss stark durch (Bild 5.4). Der gemessene Wassergehalt in der Kontrollschicht würde um ca. 1,5 Gew.-% (Minima zu Maxima) verfälscht.

Legt man nun, um die Schärfe der einzelnen Ereignisse darzustellen, eine Trendgerade durch beide Kurven (Ursprungsdaten und temperaturkorrigierte Daten), so sind die beiden Geraden-Steigungen (Ursprungsdaten: 10×10^{-5} und temperaturkorrigierte Daten: 8×10^{-5}) etwa gleich groß. Das ist der Beleg dafür, dass die Temperatur als aufgeprägte Größe die Signifikanz der Messwerte nicht beeinträchtigt.

In erster Konsequenz ergibt sich daraus, dass zur Berechnung der durchschnittlichen Feuchtwerte eine einfache Mittelung der Messwerte über die Periode ausreichend ist.

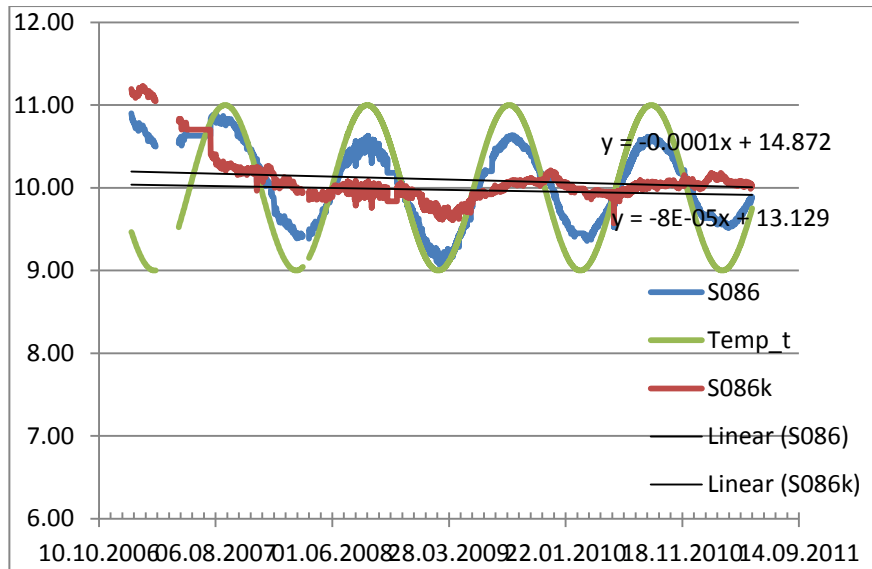


Bild 5.4: Zeitlicher Verlauf der gravimetrischen Feuchte von Sensor 86 (gilt ebenso für die Abbildungen 5.5 bis 5.7). (S086: Messwerte, Temp_t: Temperaturfunktion über die Zeit, S086k: temperaturkorrigierte Messwerte, Linear(): Ausgleichsgerade mit Geradengleichung)

Um zu zeigen, ob einzelne, meteorologische Ereignisse weiterhin sichtbar bleiben, wurde **Sensor 26** ausgewählt (Bild 5.5).

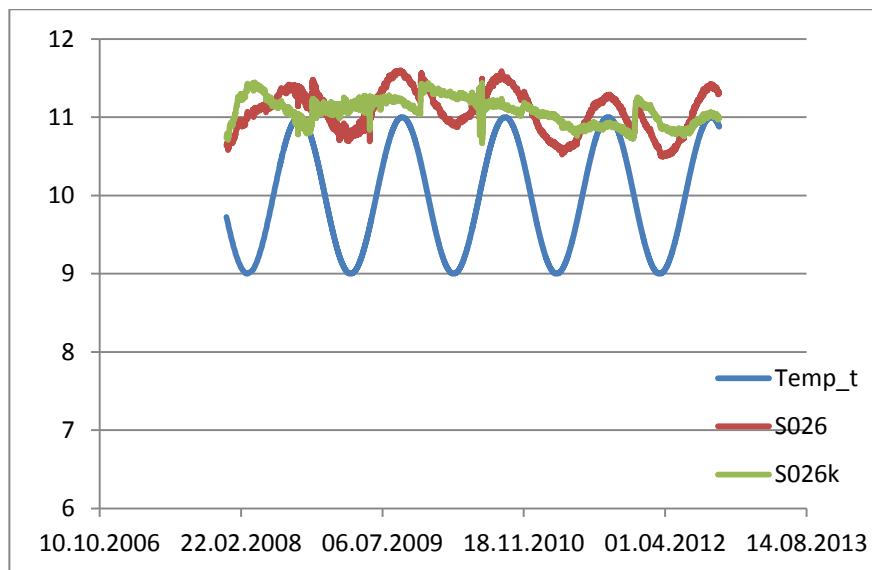


Bild 5.5: Verlauf Sensor 26 (Bezeichnungen äquivalent zu Bild 5.4)

Die temperaturkorrigierten Werte (Kurve S026k) geben weiterhin die Auffälligkeiten als Sprünge wieder.

Sensor 72 zeigt eine steigende Feuchtetendenz (Bild 5.6). Es ist einer der wenigen Sensoren, der steigende Feuchte zeigt. Das liegt einfach daran, dass die Kontrollschicht in diesem Bereich sehr trocken war (Wassergehalt < 8 Gew.-% im Frühjahr) und sich die Wassergehalte in der Kontrollschicht bei dem hier vorliegenden geringen Wasserangebot ausgleichen. Korrigiert man nur die Messwerte mit der aufgeprägten Temperatur (Kurve S072k), so wird erkennbar, dass die Steigung der Trendlinie den doppelten Wert gegenüber der der Ursprungsdaten hat.

Das ist aber alleine den höheren Messwerten im Sommer 2012 geschuldet. Außerdem sind die Steigungen der Trendgeraden mit 1×10^{-4} bzw. 2×10^{-4} sehr gering.

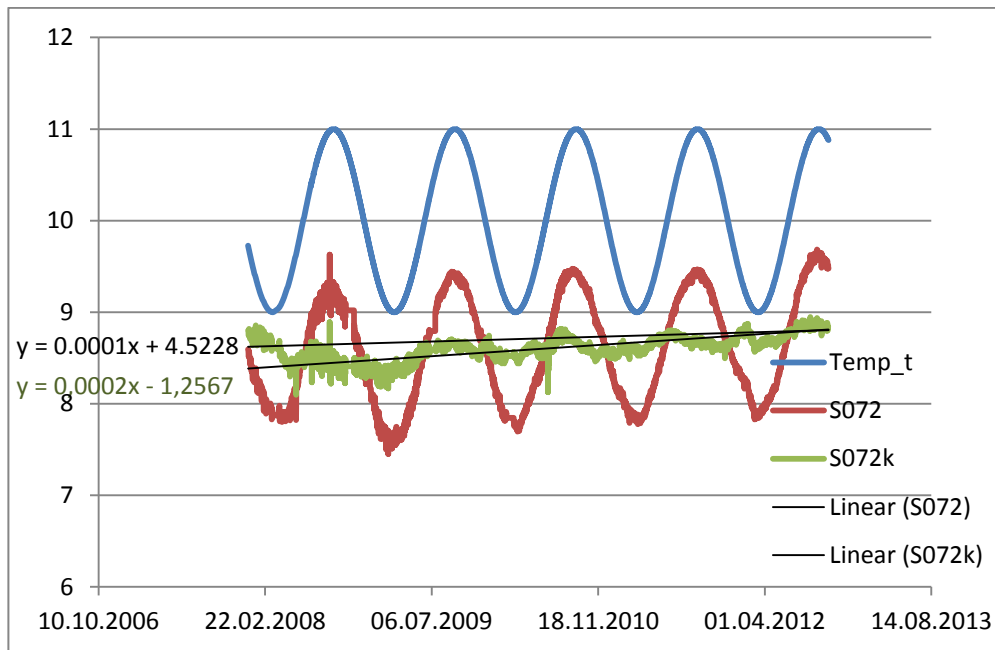


Bild 5.6: Verlauf Sensor 72 (Bezeichnungen äquivalent zu Bild 5.4)

Sensor 111 liegt in der Kontrollschicht unter der Rekultivierungsschicht, also über der Kapillarsperre (Bild 5.7). Da ist es klar, dass die meteorologischen Ereignisse stark durchschlagen. Die Kontrollschicht ist an dieser Stelle weniger verdichtet als unterhalb der Kapillarsperre, deshalb liegt auf Grund der höheren Porosität der zur hydraulischen Leitfähigkeit gehörige Wassergehalt niedriger.

Deutlich ist auch, dass sich durch den lateralen Abfluss von Niederschlagswasser in einzelnen Schichten der Rekultivierungsschicht dieser Wassergehalt weiter verringern muss.

Ein „Glätten“ über die aufgeprägte Temperatur bringt hier keine Vorteile: die Steigungen der beiden Trendgeraden sind mit 10×10^{-4} und 9×10^{-4} in etwa gleich groß.

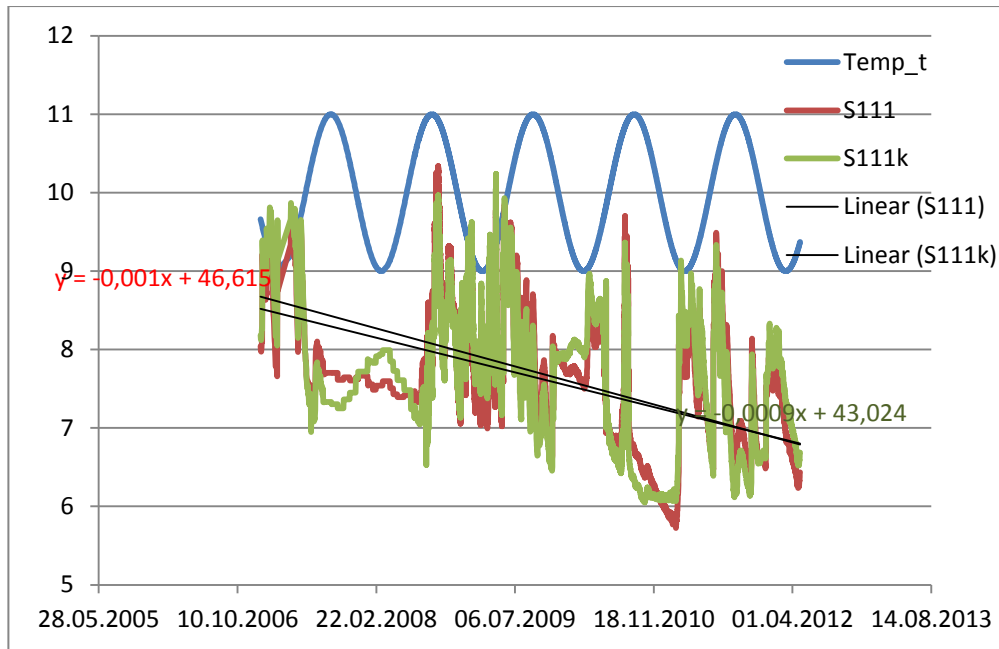


Bild 5.7: Verlauf Sensor 111 (Bezeichnungen äquivalent zu Bild 5.4)

Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Temperaturkompensation an den beschriebenen charakteristischen Sensoren zeigen, dass das Herausrechnen dieser Überprägung keinen Gewinn an Genauigkeit oder Signifikanz bringt. Es ist absolut ausreichend, für eine Bilanzierung des Wasserhaushaltes den Jahresmittelwert der Feuchte zu ermitteln und den mit der zugehörigen hydraulischen Leitfähigkeit zu verknüpfen.

Darum werden im Weiteren die Ursprungsdaten herangezogen und die Temperaturkompensation zurückgestellt.

5.4 Korrelation Wassergehalt zu hydraulischer Leitfähigkeit

Zur Darstellung einer Wasserhaushaltsbilanz ist die Kenntnis der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens notwendig. Diese kann bei Kenntnis des hydraulischen Verhaltens des Bodens aus dem Bodenwassergehalt eindeutig ermittelt werden.

5.4.1 Bestimmung des Wassergehaltes mittels TAUPE-Verfahren

Elektromagnetische Verfahren messen den Wassergehalt indirekt über die Dielektrizitätszahl (DZ) des Bodens. Dabei besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen der DZ des Bodens und seinem volumetrischen Wassergehalt. Die DZ von Wasser (~ 80) unterscheidet sich deutlich von der DZ des Bodenmaterials (3 bis 8) und von Luft (= 1). **Der Wassergehalt dominiert also die DZ des Gemisches.** Wird nun ein elektrischer Impuls entlang eines Sensors durch das Gemisch geleitet, so ist die Laufzeit des Impulses eindeutig dem Wassergehalt des Gemisches zugeordnet. Die Genauigkeit der Messung liegt bei etwa ± 1 Vol.-%. Da die Sensoren im Bodengemisch verlegt sind, sind die Messungen jederzeit durchführbar und die Messergebnisse sind reproduzierbar.

Die TAUPE-Sensoren wurden in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit (Böschungsneigung, Bodeneigenschaft) flächendeckend in der Kontrollschicht (mineralische Schicht, welche die TAUPE-Sensoren umgibt; vorzugsweise aus sandigem Schluff) eingebaut. Wie aus Bild 5.8 ersichtlich, wurden die Sensoren parallel zueinander und senkrecht zur Böschungsneigung so verlegt, dass unter Berücksichtigung eines lateralen Abflusses in der Kontrollschicht ein Monitoring der gesamten Abdichtungsfläche gewährleistet ist.



Bild 5.8: Verlegen der TAUPE-Sensoren in parallelen Gräben senkrecht zur Hangneigung

Die Sensoren sind über Koaxialkabel an Multiplexer (MUX) angeschlossen. Von dort wird über ein weiteres Koaxialkabel die Messeinrichtung eingebunden. Parallel werden die Sensoren über Signalleitungen mit der Steuereinheit verbunden, über die die Identifizierung und die Funktionskontrolle individuell für jeden Sensor möglich sind. Die Komponenten sind in Bild 5.9 dargestellt.

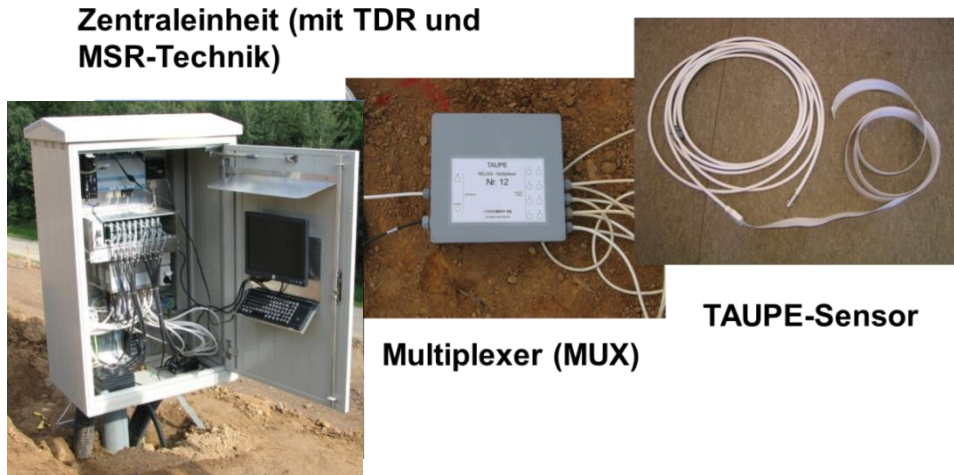


Bild 5.9: TAUPE-System mit Zentraleinheit, Multiplexer und Sensoren

Der Messvorgang ist in Bild 5.10 dargestellt. Das Ergebnis der Messung ist die Laufzeit eines Impulses (Signal), der auf den Sensor gegeben, zu dessen Ende läuft und dort zum Anfang reflektiert wird.

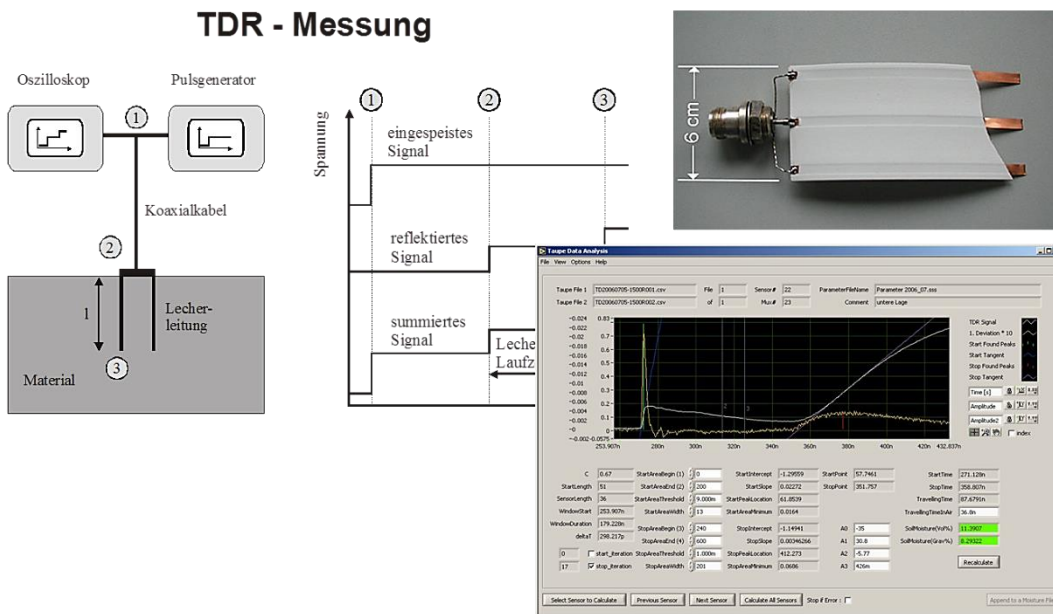


Bild 5.10: Messung mit dem TAUPE-System und Darstellung des resultierenden Signals

Da der Feuchtegehalt des umgebenden Materials (hier der Kontrollschicht) die Dielektrizitätszahl des Materials wesentlich bestimmt, wird die Laufzeit entsprechend dem Feuchtegehalt verändert.

Mittels einer Mischungsregel, die auf das trockene umgebende Material abgestimmt ist, kann aus der gemessenen Signallaufzeit über die Dielektrizität der Materialmischung (Boden, Wasser, Luft) der Feuchtegehalt bestimmt werden. Die Signallaufzeit wird aus dem resultierenden Signal berechnet. Das zugehörige Verfahren erschließt sich aus dem aufgezeichneten Graphen in Bild 5.10. Das Vorgehen zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl ist in Bild 5.11 dargestellt.

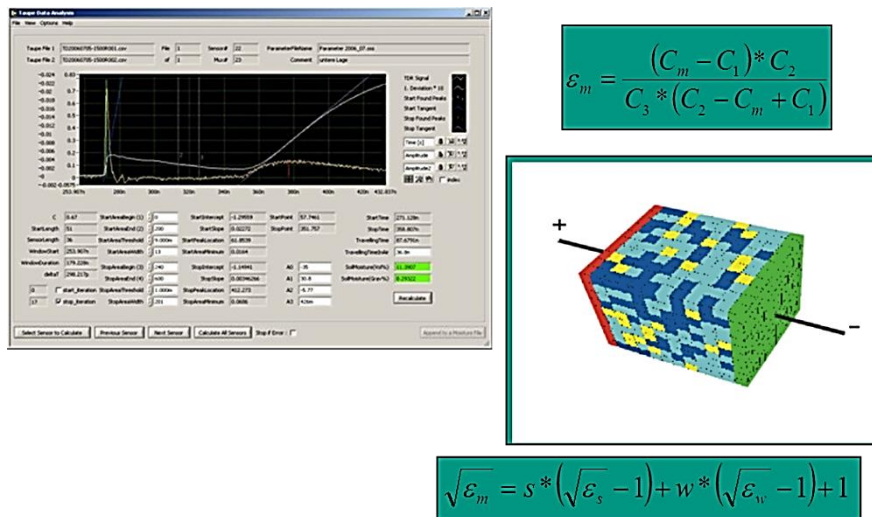


Bild 5.11: Berechnung der Materialfeuchte aus der gemessenen und den bekannten Dielektrizitätszahlen von Bodenmaterial (s), Wasser (w) und Luft (w = Wassergehalt), wobei $s + w + a = 1$ gilt)

In die Berechnung des Wassergehaltes fließt die aktuelle Bodentemperatur mit ein, da die Dielektrizität temperaturabhängig ist. Diese Kompensation ist einfach möglich, zur Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit aber nicht notwendig (siehe Kap. 5.2).

5.4.2 Einfluss von Materialeigenschaften auf die Wasserbewegung im Boden

Die Bewegung des Wassers im Boden wird durch verschiedene Boden- (= Material) Eigenschaften beeinflusst (exemplarisch):

- Oberflächenspannung an der Grenzfläche Bodenluft/Wasser
- Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Bodenmatrix
- Benetzbarkeit der Bodenmatrixoberfläche
- Bindung des Wassers an die Mineraloberfläche durch Adhäsionskräfte
- Kapillarer Aufstieg, dem die Schwerkraft entgegenwirkt
- Geometrie des Porenraumes
- Vorhandensein von Makroporen (Wurzeln, Tiergänge, Schrumpfrisse ...)

Einen weiteren Einfluss hat die Hysterese, die in leicht bindigen Materialien i.d.R. aber weniger stark ausgeprägt ist. Die Hysterese in Bodenmaterialien beschreibt die unterschiedlichen Saugspannungen bei gleichem Feuchtegehalt, je nach Bewässerung der Bodenmatrix oder deren Austrocknung. Literaturrecherchen haben ergeben, dass bei sandigem Schluff die Hysterese nicht stark ausgeprägt ist (siehe auch: Topp, G. C., „Soil water hysteresis measured in a sandy loam compared with the hysteresis domain model“; soil science society America, Proceedings 33, 1969, Seite 645-51).

Alle diese Einflüsse auf die Wasserbewegung im Boden können durch ein enges Messraster (tägliche kontinuierliche Messung) in der Form egalisiert werden, dass zwischen den Messzeitpunkten quasi-stationäre Verhältnisse angenommen werden.

5.4.3 Verknüpfung des Bodenwassergehaltes mit der hydraulischen Leitfähigkeit

Überwachungsparameter für die Funktionsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen ist nicht der Wassergehalt, sondern die hydraulische Leitfähigkeit k_f . Die hydraulische Leitfähigkeit ist sehr stark vom Wassergehalt abhängig und erreicht ihr Maximum bei Sättigung (k_s). Dieser physikalisch bedingte Zusammenhang wird über die Parameter von van-Genuchten (siehe auch: Genuchten, M. Th. van, „A dual porosity model for simulation the preferential movement of water and solutes in structured porous media“, Soil science society American journal, Nr. 44, 1980, S. 892-98) experimentell bestimmt. Man erhält für jede Bodenart einen charakteristischen Verlauf (Bild 5.12).

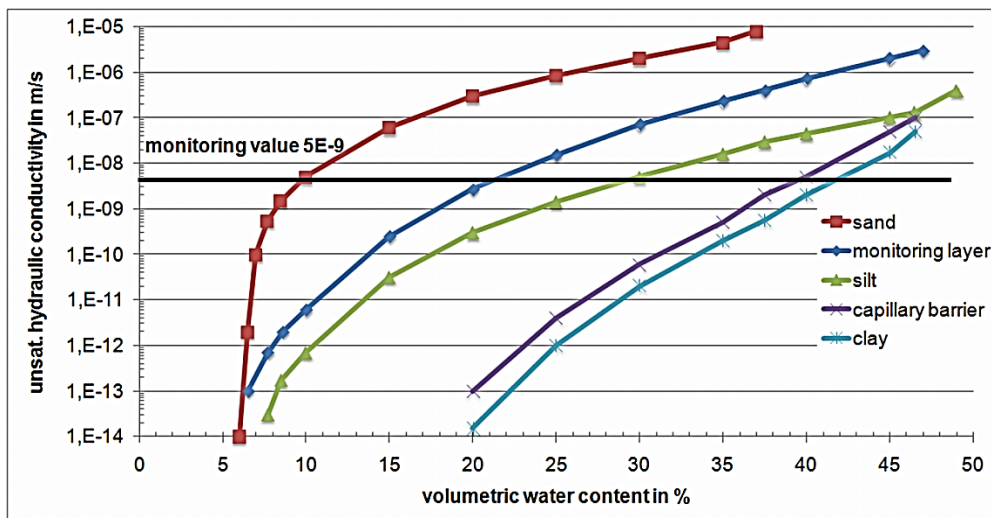


Bild 5.12: Zusammenhang der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_f mit dem Wassergehalt verschiedener Bodenarten.

Anhand einer Kombination von tonmineralischer Abdichtung mit darunter liegendem Kontrollsystem wird in Bild 5.13 beispielhaft dargestellt, wie der Abgleich zwischen gemessener Bodenfeuchte in der Kontrollschicht und dem Überwachungsparameter in einer tonmineralischen Dichtungsschicht erfolgt.

Aufgetragen ist die hydraulische Leitfähigkeit k_f im logarithmischen Maßstab über dem volumetrischen Wassergehalt WG des Bodens. Mit Hilfe der aus den jeweiligen Bodenschichten (hier: Kontrollschicht und tonmineralische Dichtung) experimentell bestimmten van-Genuchten-Parametern sind die k_f -WG-Kurven und der Überwachungswert (z.B. 5×10^{-9} m/sec) und die Schrumpfgrenze der tonmineralischen Dichtung (2×10^{-10} m/sec) als Parallele zur x-Achse eingetragen.

Der Abgleich wird wie folgt vorgenommen:

Liegt der WG in der Kontrollschicht unter 22 Vol.-%, so ist aufgrund des quasistationären Strömungszustandes der WG in der tonmineralischen Dichtschicht unter 40 Vol.-% und damit wird der Überwachungswert von 5×10^{-9} m/sec unterschritten, d.h. erfüllt.

Liegt der WG in der Kontrollschicht über 14 Vol.-%, so ist aufgrund des quasistationären Strömungszustandes der WG in der tonmineralischen Dichtschicht über 32 Vol.-% und damit wird die Schrumpfgrenze von 2×10^{-10} m/sec überschritten, d.h. die tonmineralische Dichtung bleibt frei von Rissen und funktionsfähig.

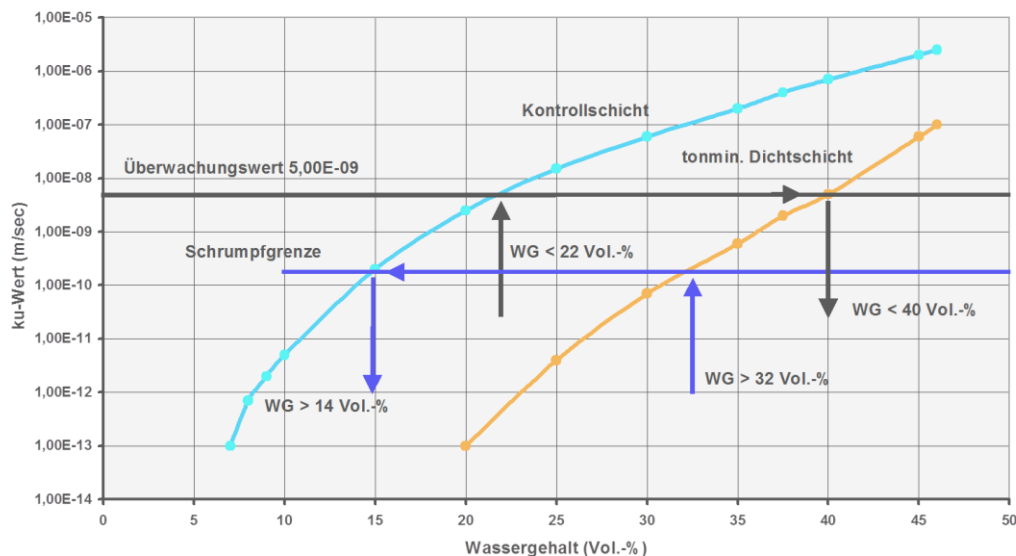


Bild 5.13: Abgleich der hydraulischen Leitfähigkeit von der Kontrollschicht zur tonmineralischen Dichtschicht; hier $k_f = k_u$.

Dieser Abgleich lässt sich zu jedem Messzeitpunkt für jeden Sensoren wiederholen, eine zeitaufgelöste und reproduzierbare Kontrolle der Abdichtung ist möglich. Weiterhin ist es möglich, die Messergebnisse an evtl. Fortschreibungen der Überwachungswerte anzupassen.

Die BAM hat die aktuellen Überwachungswerte von Dichtungssystemen definiert. So sind für die Funktion mineralischer Dichtelemente Wassergehaltsänderungen von ± 5 Vol.-% in der Schicht mit einer Ortungsgenauigkeit von 100 m^2 zu detektieren. Leckagen in Konvektionssperren (Kunststoffdichtungsbahnen, KDB) sind auf 20 m^2 genau zu lokalisieren, wobei die Leckage selbst einen Durchmesser von maximal 5 mm haben darf. Derzeit werden diese Überwachungswerte, sowie das Zertifizierungsverfahren, von einer Arbeitsgruppe bei der BAM überarbeitet.

5.4.4 Zusammenfassung

Die Vorgehensweise orientiert sich in ihren Einzelschritten an den jeweiligen allgemein bekannten DIN-Vorschriften oder allgemein anerkannten Regeln der Technik zur Bestimmung von Materialparametern (hier: Bodenparametern).

Die Sensoren werden baubegleitend in einer Kontrollschicht in das Oberflächenabdichtungssystem integriert. Die Eigenschaften der Kontrollschicht ergeben sich aus dem Ziel, die Hysterese zu minimieren und die gesetzlichen Vorgaben (Definition in den Empfehlungen der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, BAM, mit einer Mindestdicke von 15 cm und einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von $< 10^{-6}$ m/sec) zu erfüllen. Optimal wird die Kontrollschicht unter die zu überwachende Schicht platziert oder unter dem gesamten Dichtungssystem verlegt. Im Regelfall reicht eine Lage der Kontrollschicht aus. In Lysimetern sind zur Beschreibung der Bewegung von Feuchtefronten mehrere Lagen des TAUPE-Kontrollsystems erforderlich.

Für den Wasserhaushalt ausschlaggebender Parameter ist die (un-)gesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Diese ist eine Bodeneigenschaft, d.h. sie ist unmittelbar mit dem Wassergehalt (WG) verknüpft. Dieser Zusammenhang wird mit den einschlägig bekannten Verfahren dargestellt: über die Ermittlung der van-Genuchten-Parameter wird dieser Zusammenhang eindeutig und reproduzierbar festgestellt. Die im Kapitel 3 beispielhaft aufgeführten Graphen sind auf dieser Basis erstellt.

Damit steht ein Verfahren bereit, mit dem die flächige Aufnahme der hydraulischen Leitfähigkeit zu jedem gewünschten Zeitpunkt möglich ist. Daraus lässt sich, örtlich aufgelöst, der Wasserhaushalt von Deponieoberflächenabdichtungen bestimmen.

5.5 Überschlägige Berechnung des Zuflusses zur Kapillarsperre (KS)

Mittels der für die Kontrollschicht ermittelten Funktion $k_f = f(\text{Wassergehalt})$ (siehe Kapitel 5.3, Bild 5.12) kann also die mittlere hydraulische Leitfähigkeit k_f für gewählte Zeitintervalle abgeschätzt werden. Die Funktion (Bild 5.12, Kurve für die Kontrollschicht = monitoring layer) basiert auf ermittelten bodenhydraulischen Parametern.

Der Zufluss zur Kapillarsperre ist, wie die Sensoren in der Kontrollschicht unter der Rekultivierungsschicht zeigen, stark von den einzelnen Niederschlagsereignissen abhängig. Trotzdem wird in einer ersten Abschätzung über die Wassergehalte der Kontrollschicht interpoliert. Das erscheint auch schon deshalb zulässig, da sich der Bodenwassergehalt in einem sandigen Schluff nur langsam ändert.

Es wird wie folgt vorgegangen:

Betrachtet werden die Sensoren 119 bis 230. Für alle wird der maximale und der minimale Wassergehalt im Beobachtungszeitraum ermittelt. Daraus wird durch einfache Mittelung der durchschnittliche Wassergehalt je Sensor ermittelt, der als Eingangsparemeter in Bild 5.12 die durchschnittliche hydraulische Leitfähigkeit k_f generiert.

Multipliziert mit der zum Sensor gehörigen Fläche erhält man so den Fluss je Sensor, was sich zum überschlägigen Zufluss zur Kapillarsperre summieren lässt.

Als **Beobachtungszeitraum** wird das **Kalenderjahr 2011** gewählt. Die Gesamtniederschlagsmenge mit dem Vergleich zum Jahr 2010 ergibt sich aus Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Niederschlagsmenge im Jahr

	Niederschlagsmenge			
	im Jahr	Jan-Aug	Sept-Dez	auf Gesamtfläche ca. 1,8 ha im Jahr
	l/m ²	l/m ²	l/m ²	m ³ /a
2010	1174	751	423	21130
2011	898	560	338	16160
2011 in Prozent 2010	76,5	74,6	79,9	

Daraus ergibt sich, dass in 2011 im Mittel nur etwa 76,5% des Niederschlags von 2010 gefallen sind mit einem etwas höheren Anteil zwischen September und Dezember.

Flächenermittlung der Deponie: mittlere Breite ca. 190 m, mittlere Höhe ca. 95 m (gesehen von der Straße): mittlere Fläche ca. 1,8 ha.

Mittlerer Einflussbereich eines Sensors: Länge 10 m; Sensitivität am Hang, abhängig von der Neigung und bezogen auf die Oberfläche, nach oben ca. 6 m und nach unten ca. 3 m, rechts und links an den Sensorenden etwa 3 bis 5 m, d.h. insgesamt ca. 9 m x 18 m = ca. 162 m². Alle Sensoren erfassen etwa die gleiche Fläche.

Mit der **Anzahl der Sensoren** auf der Gesamtfläche von 110 ergibt sich damit die überwachte Fläche von insgesamt 1,78 ha, das entspricht in etwa der kompletten Abdichtungsfläche auf der Deponie.

Abfließendes Oberflächenwasser und Sickerwasser wurden mit Kippwaagen gemessen (Daten vom Landratsamt Rastatt). Ab November 2011 wurden die Umschlüsse durchgeführt. Die normale Konfiguration ist: Oberflächenwasser (Kapillarschicht): Sammler 1, 3, 5, 7, Sickerwasser (Kapillarbruchsicht): Sammler 2, 4, 6, 8. Tab. 5.2 zeigt die abfließenden Wassermengen.

Tab. 5.2 Oberflächen- und Sickerwasserabfluss aus der Deponie

	Oberflächenwasser					Sickerwasser					Summe
	im Jahr	Jan-Aug	Sept-7.11.	8.11.-30.11.	6.12.-31.12.	im Jahr	Jan-Aug	Sept-7.11.	8.11.-30.11.	6.12.-31.12.	
Umschluss				1, 2	3, 4				Rest	Rest	
	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
2010	1989	1176	245	217*	351*	1250	677	152	142*	280*	3239
2011*	879	549	54	0	330	769	470	70	34	195	1648
2011 Pro- zent 2010	44,9	46,7	22,0	0	94,0	61,5	69,4	46,1	23,9	69,6	50,9

* ohne Umschluss

Der **Gesamtabfluss aus Oberflächenwasser und Sickerwasser** betrug für die Zeiträume (inkl. Berücksichtigung der Umschlüsse in 2011)

	in 2010	in 2011	bez. auf 2010
Januar bis August	1853 m ³	1019 m ³	55,0%
Sept.- Okt. 2010 / Sept - 7. Nov.2011	397 m ³	124 m ³	31,2%
Nov. 2010 / 8. - 20. Nov.2011	359 m ³	34 m ³	9,5%
Dez. 2010 / 6. - 31. Dez.2011	631 m ³	525 m ³	83,2%
Insgesamt	3240 m³	1702 m³	52,5%

Der Vergleichszeitraum Januar bis August (ohne Umschlüsse in 2011) ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die provisorischen Abdichtungsmaßnahmen auf der Kuppe und am östlichen Rand wirksam sind. Der Abfluss betrug in 2011 etwa 55% gegenüber 2010, während die Niederschlagsmenge „nur“ um 25% reduziert ist.

Im Zeitraum September bis Dezember lag die Niederschlagsmenge etwas höher bei 80% von 2010 und der Abfluss bei nur ca. 41%, das bedeutet also im Mittel einen noch stärkeren Rückgang im Abfluss, wobei im Dezember aufgrund der Niederschlagsverteilung der Abflussbeitrag mit 83% deutlich höher ausfiel. Letzteres liegt überwiegend in der Abnahme der Evapotranspiration und damit einem höheren Fluss in der Rekultivierungsschicht während der Vegetationsruhe begründet.

Der Zufluss zur Kapillarsperre beträgt in 2011 insgesamt 1.648 m³, das sind 10,2% vom Jahresniederschlag. Der Abfluss aus der Kapillarbruchschicht betrug mit 769 m³ ca. 4,7% des Jahresniederschlages.

5.6 Abgleich der Abschätzung mit den Schichtabflüssen unter Berücksichtigung meteorologischer Ereignisse

Von November 2011 bis Juni 2012 führte das LA-Rastatt Messungen der Schichtabflüsse aus der Kapillarsperre mit folgender Zielsetzung durch:

Durch gezielte Umschlüsse sollte ermittelt werden, ob eine Teilfläche des Testfeldes der Deponie überproportional zur Gesamtabflussmenge beiträgt.

Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Das Testfeld ist in 4 Teilfelder aufgeteilt, die mit jeweils zwei Leitungen (obere Leitung aus der Kapillarschicht = Flächenfilter, untere Leitung aus der Kapillarbruchschicht) entwässert werden. Die Leitungen haben folgende Charakteristik (Kapillarschicht = KS, Kapillarbruchschicht = KBS, Wirtschaftsweg = WW) (Tab. 5.3):

Tab. 5.3 Lage und Art der Entwässerungsleitungen

Bezeichnung	Lage	Länge geschlitzt [m]	Länge Vollrohr [m]	Flächenanteil [%]
Leitung 1	KS, links unter WW	169,50		24,6
Leitung 2	KBS, links unter WW	170,90		
Leitung 3	KS, links über WW	161,65		49,2
Leitung 4	KBS, links über WW	160,90		
Leitung 5	KS, rechts unten	39,20		14,0
Leitung 6	KBS, rechts unten	37,85		
Leitung 7	KS, oberer WW	142,20	86,80	12,2
Leitung 8	KBS, oberer WW	142,90	89,40	

Die Lage der Leitungen und die Einbindung in die Messstation sind aus dem folgenden Lageplan Bild 5.14 ersichtlich:

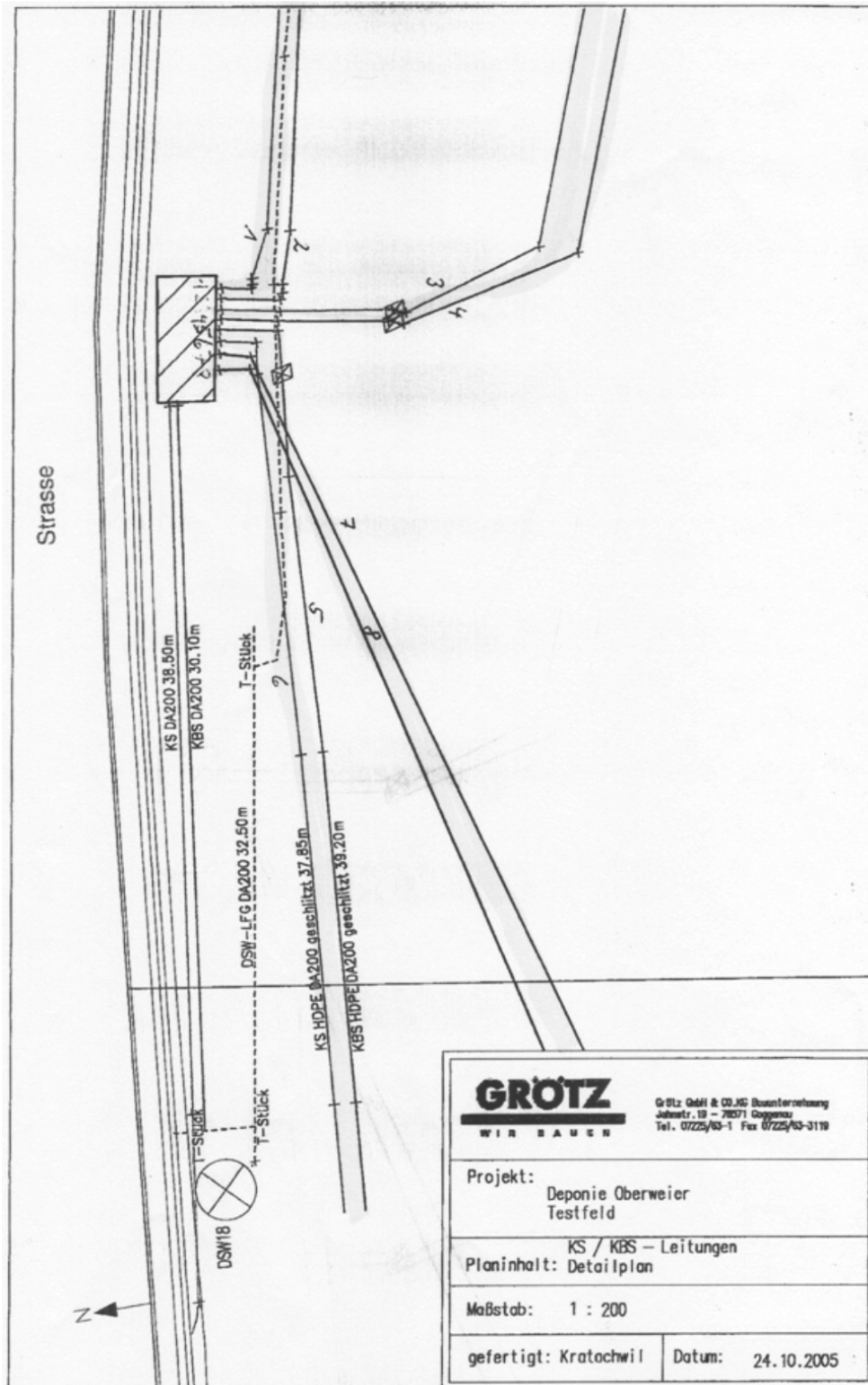


Bild 5.14: Lageplan der Drainageleitungen und des Zusammenschlusses der Leitungen

Es stehen 2 Messstellen zur Verfügung. Daher wurden die Leitungen jeweils paarweise je Feld umgeschlossen (Wassermenge in m³/Anteil an der Gesamtmenge) (Tab. 5.4).

Tab. 5.4 Ergebnisse der Umschlüsse (Abflussmenge in m³)

Datum	Leitung 1 und 2	Leitung 3 und 4	Leitung 5 und 6	Leitung 7 und 8
November 2011	0,0 (0%)			
Dezember 2011		329,9 (62,8%)		
Januar 2012			101,6 (19,4%)	
Februar 2012				10,4 (6,8%)
März 2012	0,3 (0,3%)			
April 2012		67,2 (73,8%)		
Mai 2012			16,3 (16,4%)	
Juni 2012				3,0 (6,5%)

Mit diesen Messungen wird auffällig (Tab. 5.5):

Tab.5.5 Bewertung der Abflussmengen (Abflussmenge in m³)

Bezeichnung	Flächenanteil [%]	Wasseranteil [%]	Kommentar
Leitung 1 und 2	24,6	0,3 korrigiert: 0,5	offensichtlich trocken, liegen unter dem Randgraben. Laterale Wassermengen werden offensichtlich komplett in Leitung 3 und 4 erfasst
Leitung 3 und 4	49,2	68,3 korrigiert 70,5	überproportionale Menge, Wasseranfall 40% größer als Einzugsgebiet, evtl. Mehrmenge durch Zufluss am linken Feldrand oder durch die großen Hanglängen
Leitung 5 und 6	14,0	17,9 korrigiert: 20,5	überproportionale Menge, Wasseranfall bis zu 50% größer als Einzugsgebiet, die großen Hanglängen könnten hier ebenfalls einen Einfluss haben, ebenso ist ein Zufluss vom Nachbarfeld nicht auszuschließen
Leitung 7 und 8	12,2	6,7 korrigiert: 8,5	plausible Größe, gerade nach Sanierung der Kuppe ist die Mindermenge nachvollziehbar und nur kurze Hanglängen

6 Bilanzierung des Wasserhaushaltes

Mit den unter OZ 5 gewonnenen Daten (Niederschlagswassermenge, Abflüsse in den Schichten, Zufluss zur Kapillarsperre) wird nun eine Wasserhaushaltsbilanz für das Testfeld aufgestellt. Dazu werden in einem ersten Schritt aus den TAUPE-Sensoren die jeweiligen hydraulischen Leitfähigkeiten ermittelt (siehe OZ 5.3) und darüber die einzelnen Jahresflüsse. Diese werden aufsummiert zur Wasserbilanz. Es interessiert dabei, welche Wassermenge durch die untere Kontrollschicht in die Deponie einsickert.

6.1 Durchflussbestimmung aus Taupe-Messungen oberhalb der Dichtung in der Kontrollschicht unter der Rekultivierungsschicht

Minimaler und maximaler Wassergehalt in 2011 werden aus den Taupe-Messungen bestimmt, die Mittelwerte der gravimetrischen Wassergehalte in volumetrischen Wassergehalt (VWC) umgerechnet und aus der Materialkurve bestimmt sich der k_f . Daraus ergibt sich der Fluss durch die anteilige Fläche pro Sensor zu:

Mittlerer VWC:	19,8%
Aus Materialkurve (Bild 5.12) mittlerer k_f :	$31,4 \times 10^{-10}$ m/sec
Gesamtfläche von Sensoren abgedeckt:	17384 m ²

Jahresmenge des Gesamtflusses:	1720 m³/a
(gemessen aus den Schichtabflüssen – OZ 5.4)	1648 m ³ /a

6.2 Durchflussbestimmung aus Taupe-Messungen in der Kontrollschicht unterhalb des Dichtungssystems

Ermittlung des minimalen und maximalen Wassergehalts in 2011 aus den Taupe-Messungen, Umrechnung des Mittelwertes in VWC, Bestimmen des k_f aus der Materialkurve, Bestimmung des Flusses durch die anteilige Fläche pro Sensor.

Abhängig von Zuflussrate aufgrund von Niederschlagsereignissen, Evapotranspiration und Bewuchs treten auffällige Änderungen (Spitzen) im normalen temperaturabhängigen Signal auf. Es sind bei dieser Betrachtung nur Sensoren berücksichtigt, bei denen Änderungen in der Amplitude > ca. 0,2% VWC auftreten (Vermeidung eines möglichen Rauschens im Signal).

Solche Variationen treten meistens am Anfang und Ende eines Jahres auf und erstrecken sich über eine aufsummierte Zeitdauer zwischen 2 (häufig) und 8 Monate (selten). Nicht berücksichtigt sind die zeitlichen Abläufe der einzelnen Niederschlagsereignisse (Zufluss, Leerlaufkurve des Materials etc.). Der verwendete Ansatz von etwa drei Monaten (25% der Jahresstunden) je Zuflussereignis stellt daher die obere Grenze für die Gesamtdauer dar, es liegt auf der sicheren (= nassen) Seite. Daraus resultiert auch die von den 40 betroffenen Sensoren abgedeckte Fläche von 6480 m².

Daraus wird die durch die Kontrollschicht durchtretende Wassermenge ermittelt:

Mittlerer VWC:	20%
Aus Materialkurve (Bild 5.12) mittlerer kf:	$25 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
Gesamtfläche von Sensoren abgedeckt:	6480 m^2

Jahresmenge des Gesamtflusses (zeitlich bewertet mit 25%): $140 \text{ m}^3/\text{a}$

6.3 Wasserhaushaltsbilanz

Die Bilanz zeigt einen Zufluss in 2011 zur Abdichtung von ca. 1720 m^3 (berechnet), in der Kapillarschicht und Kapillarbruchschicht fließen 1648 m^3 (gemessen) ab. Die Differenz von 72 m^3 (Rechenwert minus Messwert) deckt sich sehr gut mit dem durch die Kontrollschicht unter der Abdichtung fließenden 140 m^3 (berechnet) im Jahr.

Bezieht man die durch die untere Kontrollschicht fließende Wassermenge von ca. 140 m^3 auf die Jahresniederschlagswassermenge von 16.160 m^3 , so dringen

**ca. 0,9% des Jahresniederschlages in die Deponie ein,
das sind ca. 8 mm/a**

Dabei sind die Zuflüsse von benachbarten Feldern (Bereich Lysimeter, Kuppe und linker Feldrand) nicht kompensiert, d.h. die tatsächliche Wassermenge ist eher noch geringer.

Zu beachten ist hier, dass die untere Kontrollschicht gleichzeitig als weiteres Dichtungselement wirkt und so verhindert, dass das Wasser, das dem Kapillarblock zufließt, insgesamt in die Deponie eindringt.

7 Abgleich mit den Vorgaben der Deponieverordnung

Die Deponie-Verordnung (DepV) gibt verbindliche Kriterien für die Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen vor. Neben der Einhaltung von konstruktiven Maßnahmen, die sich aus der Genehmigungsfähigkeit von Einzelkomponenten oder Systemen ergeben, sind auch Materialkennwerte und hydraulische Maxima einzuhalten.

Der vorliegende Fall, qualifizierter Wurzelboden als Wasserhaushaltsschicht mit untenliegender Kapillarsperre, kombiniert mit einem TAUPE-Dichtungskontrollsystem, hat die in der Einleitung benannten genehmigungsrechtlichen Vorgaben zu erfüllen.

Abgeleitet aus der DepV sind das im Besonderen:

Beleg der Wirksamkeit über eine maximal zulässige Menge von Niederschlagswasser, die in den Deponiekörper eintritt. Das ist zum einen

- Der maximale Anteil am Jahresniederschlag in [mm] oder [%]
- Die maximale Infiltration, unabhängig vom Jahresniederschlag, in [mm]

Nach §2 Nr. 8 liegt hier eine Deponie der Klasse II (Hausmülldeponie) vor. Gemäß Anhang 1 gelten nach 2.3.1.1. für die Wasserhaushaltsschicht folgende Kriterien:

- Stärke > 1,50 Meter
- NFK (nutzbare Feldkapazität) > 220 mm
- Sickerwasser < 10% des Niederschlags, maximal 60 mm/a

Für die technische Funktionsschicht gilt nach Kap. 2.3.2:

- Hydraulische Leitfähigkeit $k < 5 \times 10^{-9}$ m/sec (DK II)

Gemäß Fußnote 5 wird zusätzlich für die Wasserhaushaltsschicht (ohne Dichtungsschichten) eine Durchsickerung von

- maximal 20 mm/a

vorgegeben.

Für die Deponie Gaggenau-Oberweier wurden im Einzelnen die folgenden Parameter ermittelt:

Der Zufluss zur Kapillarsperre betrug in 2011 insgesamt 1.648 m³, das sind 10,2% vom Jahresniederschlag von 898 mm (siehe unter OZ5.4).

Der Abfluss aus der Kapillarbruchschicht beträgt mit 769 m³ ca. 4,7% des Jahresniederschlags (OZ5.4).

Die hydraulische Leitfähigkeit in der Kontrollschicht unter dem Wurzelboden beträgt $3,1 \times 10^{-9}$ m/sec (OZ6.1).

Die hydraulische Leitfähigkeit der Kontrollschicht unter dem Abdichtungssystem ist $2,5 \times 10^{-9}$ m/sec (OZ6.2), wobei hier nur ein geringer Flächenbereich und eine geringe Zeitspanne wirksam sind. Rechnet man die hydraulische Leitfähigkeit aus dem passierenden Wasser zurück, so erhält man einen Wert von $4,5 \times 10^{-10}$ m/sec.

Bezieht man die durch die untere Kontrollschicht fließende Wassermenge von ca. 140 m^3 auf die Jahresniederschlagswassermenge von 16.160 m^3 , so dringen ca. 0,9% des Jahresniederschlages in die Deponie ein, das sind ca. 8 mm/a.

Abgleich der Werte:

Ausgewählt werden die hydraulischen Vorgaben aus der DepV, Anhang 1 mit:

- Sickerwasser < 10% des Niederschlags, maximal 60 mm/a (2.3.1.1.)
- Hydraulische Leitfähigkeit $k < 5 \times 10^{-9}$ m/sec (DK II) (2.3.2)
- Sickerwasser maximal 20 mm/a (2.3.2, Fußnote 5)

Die Sickerwassermenge durch den Wurzelboden liegt mit 10,2% des Jahresniederschlages im Bereich der Vorgabe (< 10%). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Abdichtungsmaßnahme auf der Kuppe seit Mitte 2010 beendet ist und ihre Wirksamkeit sich weiter im Wasserhaushalt zeigen wird.

Die Durchsickerung mit ca. 89 mm/a liegt über dem vorgegebenen Wert von 60 mm/a. Da davon über die Hälfte in der Kapillarschicht abgeführt werden, verbleiben 4,7% des Jahresniederschlages, die in die Kapillarbruchschicht einsickern (entspricht 41 mm/a). Beide Werte sind deutlich unter den Vorgaben der DepV.

Die hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen Schichten liegen mit $3,1 \times 10^{-9}$ m/sec (OZ6.1), $2,5 \times 10^{-9}$ m/sec (OZ6.2) und insgesamt mit $4,5 \times 10^{-10}$ m/sec jeweils unter dem vorgegebenen Wert von 5×10^{-9} m/sec.

Wertet man die in die Deponie eindringende Wassermenge von ca. $140 \text{ m}^3/\text{a}$, so sind das 0,9% des Jahresniederschlages, entsprechend 8 mm/a und damit deutlich unter den Vorgaben der DepV.

(Anmerkung: hier ist lediglich ein technischer Abgleich der Daten mit den Vorgaben der DepV erfolgt, ohne jede rechtliche Wertung und ohne Anspruch auf formalrechtliche Bestandskraft).

8 Zusammenfassung

Aufgabe des vorgelegten Gutachtens war es, die Überprüfung der Stimmigkeit der TAUPE-Messungen mit den Schichtabflüssen zu vollziehen und den Beleg der ausreichenden Leistungsfähigkeit nach DepV zu erbringen.

Dieses Ziel wurde durch umfangreiche Aufbereitungen und die Zusammenführung der vorhandenen Daten (Schichtabflüsse, meteorologische Daten, TAUPE-Messwerte und geometrische Daten) erreicht.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass durch die Anordnung der TAUPE-Sensoren oberhalb und unterhalb der Kapillarsperre (Dichtungsschicht) der Wasserhaushalt des Testfeldes genau genug beschrieben werden kann. Außerdem wirkt das unter dem Dichtungssystem angeordnete TAUPE-System, bestehend aus einer Schicht von möglichst homogenem Bodenmaterial mit bekannten Bodenparametern und den eingebauten Kabelsensoren, als zusätzliche Dichtungskomponente, sodass über 80% des in den Kapillarblock einsickernden Wassers auch darin abgeführt werden konnte.

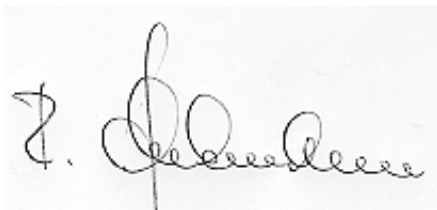
Insgesamt sind im Betrachtungsjahr 2011

- **Ca. 140 m³ Wasser im gesamten Testfeld (Fläche ca. 1,8 ha) in die Deponie eingedrungen,**
- **was 0,9 % des Jahresniederschlages von 898 mm oder**
- **8 mm/a**

bedeutet.

Nach technischer Wertung ist das Testfeld „dicht“. Das TAUPE-System liefert zudem noch wertvolle Hinweise auf z.B. Randumläufigkeiten und damit Handreichungen für den Deponiebetreiber, gezielte Maßnahmen wirtschaftlich umzusetzen.

Karlsruhe, im Januar 2013



Regierungsbaumeister Dr.-Ing. Rainer Schuhmann
(Leiter des CMM)