

Verbesserung der Langzeitbeständigkeit durch modifizierte mineralische Abdichtsysteme

Longterm improvement of waste deposit mineral sealing systems as an impermeable longterm solution

R. Horn

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der CAU, Olshausenstraße 40

24118 Kiel

email: rhorn@soils.uni-kiel.de

www.soils.uni-kiel.de

Zusammenfassung

Die Diskussion über „langfristig undurchlässige“ Oberflächenabdichtungen von Deponien berücksichtigt in den bisherigen Ausführungsbestimmungen TASI nicht den Zusammenhang zwischen mechanisch/dynamischer Energiezufuhr/ Porenwasserspannung und Homogenisierung durch Knetung während des Einbauvorganges. In der Arbeit werden die Hintergründe anhand der bestehenden Literatur erläutert um daraus eine Alternative für eine langfristig dichte Tonmineraldichtschicht abzuleiten.

Abstract

The discussion about the longterm stability of mineral waste deposit liners does exclude the effect of coupleed processes in mechanics and hydraulics which can be summed as follows: mechanical and dynamic energy input during compression results in higher soil homogenisation and particle reorientation, positive pore water pressure values and consecutive normal shrinkage behaviour together with tensile crack formation.

Some alternatives are discussed and the consequences for a more impermeable mineral layer due to residual shrinkage behaviour, entrapped air and a very tortuose pore system explained.

Einleitung:

Die Diskussion um die erforderlichen Maßnahmen zur Herstellung langfristig sicherer Oberflächenabdichtungen von Mülldeponien wird seit mehr als 15 Jahren in den verschiedensten Fachgebieten und unter bautechnischen, naturwissenschaftlichen sowie ökonomischen Gesichtspunkten geführt. Mit der Veröffentlichung der TA-Siedlungsabfall wurde 1993 eine gesetzliche Grundlage zur Konstruktion von Oberflächenabdichtungen auch mit mineralischem Abdichtmaterial definiert, die als Absicherung für Deponiebauer und -betreiber gewertet bzw. eingeordnet werden muß. Alternativen bzw. gleichwertige Aufbauten sind prinzipiell möglich. Vor dem Hintergrund der vorrangig ökonomischen Diskussionen im Zusammenhang mit der zu gewährleistenden Langfriststabilität von Abdichtungssystemen zögern Behörden bzw. Genehmigungsinstitute jedoch mit der Anwendung alternativer Konzepte, da durch den in der TA-Siedlungsabfall (1993) festgelegten Aufbau eine **per Definition dichte** und damit scheinbar langfristig sichere Lösung auch rechtskräftig beschrieben worden ist.

Die Vielzahl von kritischen Stimmen ebenso wie die sehr variierende Information zur Langfristsicherung und zu alternativen Konzepten einschließlich der immer aufwendigeren Herstellungsrezepturen für Deponieabsichtungsmaterialien (s. Melchior 2001 in Rahmen des LANU Seminars November 2001) läßt aber gleichzeitig die Nervosität erkennen, mit der besonders unter wissenschaftlichen aber auch unter technischen Gesichtspunkten das Thema Langfristsicherung von Mülldeponien behandelt wird. Die von Egloffstein et al. 1998, 2000 herausgegebenem Bücher zum Thema: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten – wirksame und kostgünstige Systeme, Ökonomie contra Ökologie- sowie das von Friedrich und Fricke (1998) zusammengestellte Buch zum Thema Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4.TASi zeigen die Bandbreite der Probleme auf, die es aus vorrangig technischer und auch wissenschaftlich angewandter Sicht noch immer zu lösen gilt. Wenn dabei u.a. in einem Beitrag von Schnittger (in Egloffstein et al. 1998) festgestellt wird, daß die TA Siedlungsabfall und TA Abfall bezogen auf die Oberflächenabdichtung nicht mehr Stand der Technik sei und auch die eigentlich so banale Frage „was ist dicht bzw., wie dicht ist also dicht“ nach wie vor gestellt wird, dann ist es dringend notwendig, die Ursachen für derartige trotz enormer Geldaufwendungen immer noch nicht geklärten Fragen unter bodenphysikalischen Aspekten zu suchen.

Auch Melchior (1993), Melchior et al. (1996) sowie die aus dem Hamburger Institut für Bodenkunde in einer Vielzahl von Publikationen dokumentierten Ergebnissen der sehr ausführlichen Messungen auf der Deponie Georgswerder/Hamburg weisen immer wieder darauf hin, dass die mineralische Abdichtung (Tonschicht) in der Oberflächenabdichtung langfristig Rißbildungen zeigt und die damit einhergehende Wasserdurchlässigkeit den als Grenzwert definierten Bereich deutlich übersteigt. Hieraus wird bei schneller Analyse dann die voreilige Schlußfolgerung gezogen, dass mit mineralischen Dichtmaterialien keine langfristige Abdichtung möglich sei. Als langfristig sichere Alternative werden daher damals wie heute Kunststoffdichtungsbahnen oder verbesserte Alternativverfahren empfohlen. Inwiefern aber auch dies einer kritischen wissenschaftlichen Überprüfung standhält, soll im Folgenden erläutert und ein Alternativansatz präzisiert werden. Die ganze Problematik im Zusammenhang mit der langfristig sicheren Ablagerung von Abfällen liegt in der Zusammensetzung und damit auftretenden Umsetzung des Abfalls im Laufe der Zeit und der gleichzeitig unter unseren klimatischen Bedingungen unvermeidbaren Grundwasserneubildungen begründet, wodurch es auch zu einer deutlichen Belastung sowohl der Atmosphäre als auch des Grundwassers kommen kann. Folglich muß der Aufbau stets im Gleichgewicht mit diesen zusätzlichen Komponenten

stehen, um die Langfriststabilität und damit auch die geforderte Undurchlässigkeit zu gewährleisten. In Abb. 1 werden die zu berücksichtigenden Reaktionen summarisch dargestellt.

UMWELTBELASTUNGEN DURCH DEPONIEEN

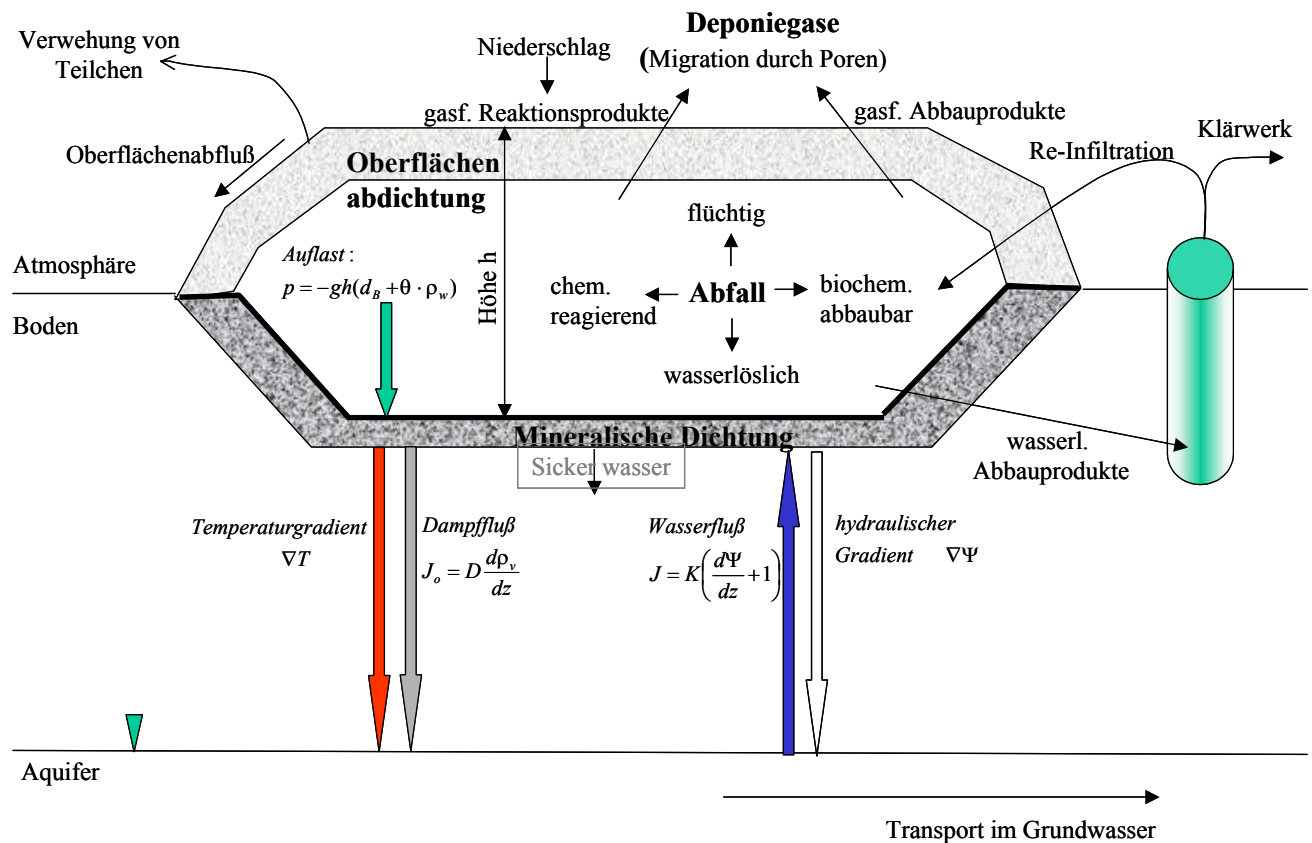


Abb. 1: Umweltbelastungen durch eine Deponie

Analyse des Schrumpfungsverhaltens von Tondichtungen

Es ist allgemein bekannt, daß vor allem in tonigen Substraten ebenso wie auch in Schluffen und Lehmen (Gräsele 1999) durch die Entwässerung der Bodens Volumenveränderungen verbunden mit Ribbildungen besonders dann auftreten können, wenn die Substrate über keine große Eigenstabilität verfügen. Dies gilt besonders dann, wenn die Substrate weitgehend homogenisiert und darüberhinaus auch nur wenig ausgetrocknet sind, d.h. nahe dem maximalen Sättigungsgrad liegen (Hartge und Horn 1999). Albiker (in Horn et al. 2001) konnte für eine 7 ha große mineralische Abdichtung den Zusammenhang zwischen erreichter Proctordichte, hydraulischer Leitfähigkeit und Schrumpfverhalten nachweisen, dass selbst bei dem Einbau der mineralischen Dichtschicht bei Werten nahe der Proctordichte, allerdings auf dem nassen Ast der Proctorkurve, mit Wasserleitfähigkeitswerten gerechnet werden kann, die deutlich

unter den in der TA-Siedlungsabfall geforderten Grenzwerten liegen. Gleichzeitig läßt sich aus diesen Daten aber auch der für die Langfristbeurteilung sehr viel wesentlichere Kurvenverlauf des Schrumpfungsverhaltens diskutieren. Es zeigt sich nämlich, dass bei gegebenen Wassergehalten sich das Bodenmaterial im Normalschrumpfungszustand befindet und damit volumenproportionale Wasserabgaben auftreten müssen, kaum daß die Wasserabgabe durch Austrocknung oder durch Wasserfluß einsetzt. Da diese volumenproportionale Wasserabgabe jedoch begrenzt ist, entstehen bereits gravitationsbedingt durch Matrixspannungen induziert Dehn- bzw. Zugrisse, womit das ursprünglich dichte Material seine geforderten Eigenschaften verliert.

Bauer et al. (2001) konnten in umfangreichen Untersuchungen zu diesem Thema durch die gleichzeitige Ermittlung der Schrumpfungskurven für auf dem nassen Ast der Proctorkurve eingebautes toniges Material immer wieder den in Abb. 2 dargestellten Kurvenverlauf ermitteln. Es zeigt sich, daß mit zunehmendem Wassergehalt auch das Schrumpfungspotential deutlich steigt und damit auch die erreichte Dichte bzw. im Sinne der Reißbildungsgefährdung die Zunahme der Wasserdurchlässigkeit als notwendigerweise zu berücksichtigendes Phänomen hinzukommt.

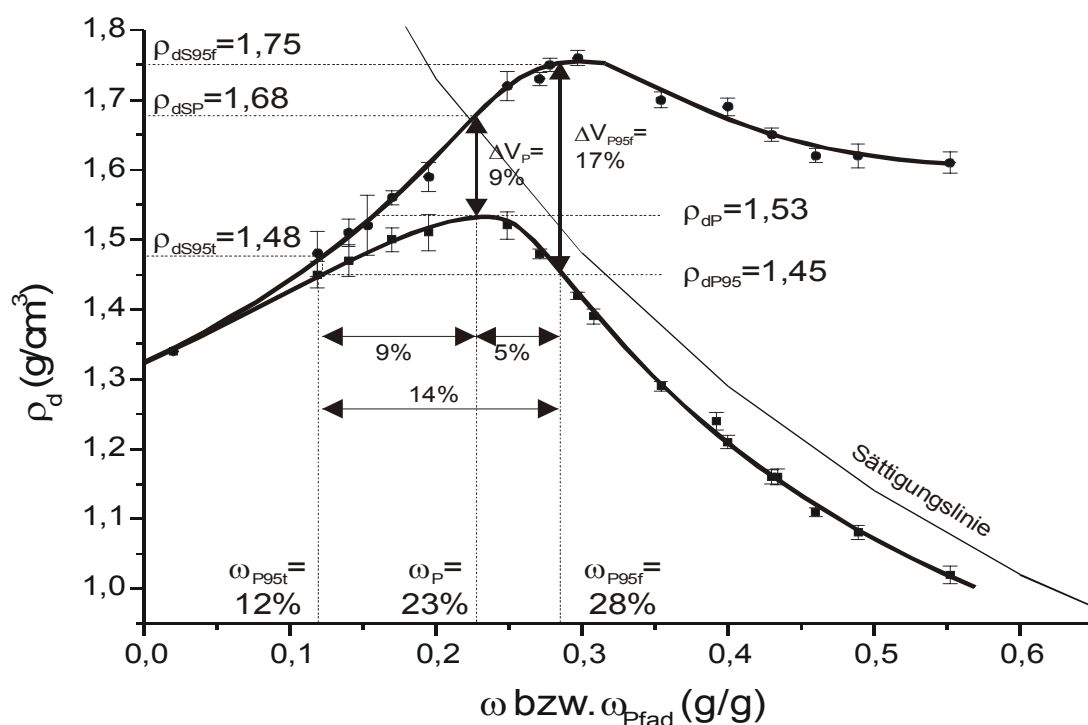


Abb.2: Proctorkurve und Schrumpfungspotential (aus Bauer et al. 2001)

Vor diesem Hintergrund stellt sich daher die Frage nach der Ursache derartiger Ergebnisse und den Konsequenzen für alternative und damit langfristig sichere Abdichtsysteme.

Aus chemischer und physikalischer Sicht eignen sich Tone aufgrund der sehr hohen Austauschkapazität und im homogenen Zustand auch gleichzeitig geringen Wasserdurchlässigkeit als langfristig sicheres Abdichtungsmaterial. Tone verfügen über ein intensives Quellungs- und Schrumpfungsvermögen, so dass unter der Voraussetzung der Konstanz dieser Kapazitätseigenschaften Ton als langfristig dichtes mineralisches Dichtmaterial eingestuft werden muß (Hartge/Horn 1999, Scheffer-Schachtschabel 1998). Diese Einschätzung steht aber im Widerspruch zu den Befunden der Oberflächenabdichtung Georgswerder und an einer Vielzahl weiterer Standorte. Aufgrund der Tatsache der intensiven Quellungs- und Schrumpfungsneigung toniger aber auch schluffiger und lehmiger Substrate ist nämlich besonders im Zusammenspiel von Einbauwassergehalt und Einbautechnik bei der Verwendung auf die Randbedingungen zu achten, da ansonsten die Porengrößenverteilung und damit auch die ökologischen und hydraulischen Funktionen über mehrere Potenzen schwanken können. In der Bodenkunde ist allgemein die Beziehung zwischen Normal- und Restschrumpfung von Substraten so definiert, dass für jeden Wassergehalt in homogenen Substraten zu Beginn der Entwässerung auch das entsprechende Volumenverformungsverhalten definiert werden kann. Allerdings hat Hartge bereits 1965 nachgewiesen, dass bei natürlich strukturierten Böden dieser Normalverlauf nicht eintritt, sondern stattdessen während der Austrocknung über einen größeren Wasserspannungsbereich hinweg keinerlei Volumendeformationen erfolgten. Erst bei Überschreitung eines bestimmten Wassergehaltes traten dann wiederum Normalschrumpfungen ein. Dieser Sachverhalt wurde sowohl in prozessorientierten Untersuchungen von Horn (1978, 1981), als auch später von Junkersfeld (1997), Junkersfeld und Horn (1997) sowie Baumgartl u. Horn (1999) basierend auf einer Vielzahl von Messungen bestätigt und die Ursachen hierfür auch unter Berücksichtigung von mechanischen Prozessen analysiert. Ähnlich wie der im Zusammenhang mit dem Drucksetzungsverhalten definierte Wieder- und Erstverdichtungsbereich einschließlich des diese beiden Spannungsbereiche charakterisierenden Wertes der Vorbelastung muß bei dem Vorgang der Schrumpfung neben Normal- und Restschrumpfung ein der Vorspannung identischer Wert der Vorschrumpfung und damit der Vorstabilisierung ausgewiesen werden. Baumgartl et al. (1995) konnten diesen Effekt anhand der Beziehung zwischen der Porenziffer und dem Feuchtverhältnis (moisture ratio = vol. Wassergehalt bezogen auf das Volumen der festen Substanz) verifizieren. Es zeigt sich, daß unabhängig davon, ob eine mechanische oder hydraulische Vorbelastung/Vorschrumpfung als Ursache für eine mechanische Stabilisierung vorliegt, der Boden bis zu diesem Spannungswert keine weitere Deformation während der neuen Austrocknung zeigt. Erst nach Überschreitung z.B. des in diesen Versuchen vorgegebenen mechanischen Verdichtungsgrades (

chungen auch an Freilandstandorten (=Deponien) zeigt, daß in dem Maße, in dem die Intensität der Vortrocknung des einzubauenden mineralischen Materials größer ist als die im eingebauten Zustand zu erwartenden Austrocknungen, auch mit keiner weiteren Schrumpfrißbildung gerechnet werden muß. Zur Abschätzung dieser über die Bodentiefe variierenden minimalen Wassergehalte im Laufe eines Jahres (für den Fall der Oberflächenabdichtung ist dies z.B. die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht) können die in der Literatur zitierten Zusammenhänge zwischen Intensität der Austrocknung, Landnutzung und Bodensubstrat dienen, die in einer Literaturzusammenstellung für mehr als 300 Meßjahre unter den verschiedensten Fragestellungen regionenspezifisch untersucht worden sind. Es zeigt sich sowohl in den Auswertungen von Hartge und Horn (1977), als auch in denjenigen von Baumgartl et al. (1998), dass bodenart- und bodentypspezifisch in den obersten ca. 40 cm eine große Spannbreite von Wasserspannungen (negative Porenwasserdrücke = Sogwirkung und damit verstärkte Partikelmobilisierung und Rißgefährdung) auftreten können, während mit zunehmender Tiefe (bis in 1,50 m Tiefe analysiert), die Wasserspannungsschwankungen geringer werden und mit einer einzigen Ausnahme durchweg Werte von betragsmäßig maximal 200 - 300 hPa aufweisen. Dies wiederum bedeutet, dass nicht nur entsprechend der effektiven Spannungsgleichung (Bishop 1961) die Intensität der Bodenstabilisierung (Vortrocknung) mit der Bodentiefe variiert, sondern daß damit auch gleichzeitig ein Maß für die maximale Austrocknung und folglich auch für die Porenstabilität gegeben ist, welche abhängig von der Einbautiefe ist.

Betrachtet man nun vor diesem Hintergrund die anhand der Auswertung von Meßwerten auf einer 7 ha großen Deponie gewonnenen Daten zur Wasserleitfähigkeit ebenso wie zum Schrumpfungsverhalten und zur Proctordichte, so zeigt sich, dass bei den lt. TA-Siedlungsabfall (1993) definierten Einbauwassergehalten oberhalb der Proctordichte zwar kurzfristig die Wasserleitfähigkeit die gesetzlichen Rahmenwerte unterschreitet, aber der Schrumpfungsverlauf als Normalschrumpfung eingestuft werden muß. Zwangsläufig kommt es in sehr kurzen Zeiten zu Rißbildungen mit den Folgen einer erhöhten Wasserleitfähigkeit, einer geringeren Sorptionsfähigkeit für Nähr- oder Schadstoffe und folglich auch einer erhöhten Kontaminationsgefahr für das Grundwasser bzw. erhöhten Atmosphärenbelastung. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, wenn man sich überlegt, daß während des Walzvorganges selbst (d.h. der Wassergehalt liegt bei + 5% über dem optimalen Wassergehalt WG opt.) in dem Tonmaterial aufgrund der sehr geringen Wasserleitfähigkeit zu diesem Zeitpunkt sehr große Porenwasserüberdrücke auftreten. Gleichzeitig wird durch diese Einbautechnik aufgrund der durch die dynamische Belastung induzierten Homogenisierung die Porenstabilität

aufgehoben. (Thienemann et al. 1997) Die Folge ist eine weitgehende Überführung in einen unter dem Aspekt der Langzeitstabilität äußerst ungünstigen Normalschrumpfungsbereich.

Der Einwalzvorgang ruft nämlich durch die Schaffung von glänzenden Bodenoberflächen nicht etwa eine Boden- /Porenstabilität und gleichzeitige hohe Undurchlässigkeit hervor, sondern verringert die Dichtfunktion bis hin zur Schaffung einer völlig durchlässigen mineralischen Tonschicht aufgrund der nun nicht mehr zu verhindernden Normalschrumpfung. Da Porenwasserüberdrücke unter Schwerkraftbedingungen aber niemals langfristig erhalten bleiben, sondern abgebaut werden und gleichzeitig jede frühere Porenstabilität durch die vorherigen Einwalzungen und damit Homogenisierung aufgelöst worden ist, setzt nun alleine bereits durch gravitationsbedingte Austrocknung eine noch intensivere Rißbildung ein. Hierdurch steigen die Werte für die gesättigte Wasserleitfähigkeit des ursprünglich kurzfristig dichten Materials um mehrere Zehnerpotenzen an und können durchaus Werte erreichen, die bei $>10^{-4}$ m/s liegen.

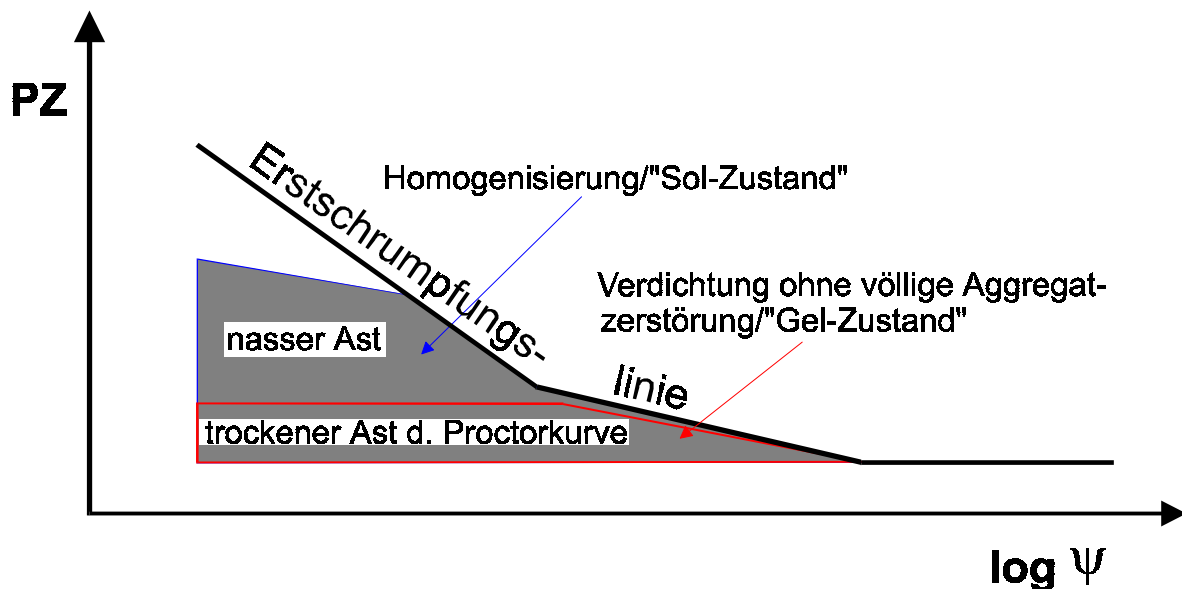
Vorschlag für einen Lösungsansatz:

Dieser Vorgang der Rißbildung erfolgt innerhalb weniger Minuten bis Tage und ist nicht zu verhindern, es sei denn, die Porenstabilität wird durch eine gezielte Vorbehandlung bzw. Verhinderung der Knetung bei zu hohem Wassergehalt erhalten. Dieser letztere Vorgang läßt sich allerdings nur dann erreichen, wenn entweder die Substratstabilität so hoch ist, dass die dynamisch wirkenden Walzvorgänge nicht zu einer völligen Zerknetung führen, oder aber bei gegebener Walztechnik die Strukturstabilität entsprechend hoch genug ist. Da aus dem Verlauf der Proctorkurve jedoch bereits abgeleitet werden kann, dass bei allen Wassergehalten oberhalb der Proctordichte die erreichbare Lagerungsdichte geringer als die optimale Proctordichte ist und das Schrumpfpotential steigt, ist dies gleichzusetzen mit einer nie zu vermeidenden Homogenisierung des Bodensubstrates während des Einwalzvorganges. Dahingegen können bei Wassergehalten kleiner als es dem Wassergehalt bei Proctordichte entspricht, d.h. auf dem trockenen Ast der Proctorkurve liegende Bodensysteme, trotz dynamischer Belastung als vorgeschrumpft und demzufolge auch als mechanisch und hydraulisch stabil eingestuft werden. In Abb. 4 sind die diesen Zusammenhang verdeutlichenden Kurvenverläufe unter dem Gesichtspunkt „nasser Ast = Überführung in den Normalschrumpfungsbereich“ und Einbau auf dem „trockenen Ast = Restschrumpungsverhalten und damit verbundene Porenstabilität“ schematisch dargestellt.

Schlußfolgerung:

Aus den dargestellten Zusammenhängen ist nachvollziehbar, dass bei Verwendung von Tonmineralsubstraten als Abdichtmaterial dann eine Rißbildung langfristig vermieden werden kann, wenn der Wassergehalt bzw. die Wasserspannung zum Zeitpunkt des Einbaues kleiner ist als der jemals später folgende Austrocknungsgrad. Für die verschiedenen Regionen der Bundesrepublik kann dieser für den Unterboden aus entsprechenden Datensätzen, die bei Baumgartl et al. (1997) dargestellt worden sind, abgeleitet werden. Aufgrund der in der effektiven Spannungsgleichung definierten Zusammenhänge zwischen mechanischer und hydraulischer Spannungskomponente sind Böden gleichzeitig auch im mechanischen Sinne als vor-entwässert d.h. vorbelastet einzustufen. Unter diesen Bedingungen kommt es dann nicht zur

Abb.4: Beziehung zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilisierung bzw. Schrumpfungsverhalten von Substraten.



zusätzlichen Rißbildung und damit einhergehenden erhöhten Durchlässigkeit. Im Baugrundwesen ist dieser Zusammenhang, dass vorbelastete Böden als solche nicht setzungsempfindlich, sondern als druckstabil gelten, allgemein bekannt. Da aber durch den Porenwasserdruck (Austrocknungsgrad) ebenfalls eine sogar sehr viel intensivere mechanische Stabilisierung des Bodens erreicht werden kann, gewährleistet besonders diese Voraustrocknung bzw. früherer maximaler Austrocknungsgrad auch den Erhalt der Strukturstabilität bis zu den in diesen Tiefen auftretenden äquivalenten Wasserspannungen. Somit können z.B. durch eine Vortrocknung von mineralischen Tonmaterial und/oder Einbau von auf dem trockenen Ast liegenden mineralischen Dichtmaterial stabile und gleichzeitig undurchlässige Tonschichten geschaffen werden. Andererseits sind die nach TASI (1993) gebauten Deponiedichtsyste-

mit sehr großer Sicherheit stets undicht. Auf dem linken Ast der Proctorkurve eingebaute mineralische Dichtschichten sind auch alleine aufgrund der langfristigen Stabilität des Minerals selbst mit Sicherheit ebenso zu verwenden wie die durch Zusätze „vergüteten = sogenannten verbesserten“ Systeme. Außerdem läßt sich durch eine partielle Befeuchtung von vorge-schrumpftem Material auch noch eine weitere Verbesserung der Abdichtwirkung beim Einbau erzielen, wie Thienemann (1997) sowohl in Freiland- als auch Laboruntersuchungen nachweisen konnte.

Bei Berücksichtigung dieser bodenkundlichen Erkenntnisse kommt es weder zur irreversiblen Normalschrumpfung noch zur Ribbildung, sondern es läßt sich ein langfristig dichtes und den Anforderungen auch in den verschiedenen Klimaregionen anzupassendes Abdichtungssystem aufbauen.

Folglich kann mit einer wirksamen Abdichtung über lange Zeiträume gerechnet werden. Hiermit schließt sich auch der Kreis der Überlegungen und der Suche nach alternativen Abdichtverfahren vor dem Hintergrund der allgemeinen bekannten und seit Jahrzehnten wohl dokumentierten Zusammenhänge zwischen mechanischer bzw. hydraulischer Vorbelastung und damit einhergehender Porenstabilität und Porenfunktion. Als Konsequenz zeigt sich, dass die häufig in der Literatur beschriebene Ribbildung nicht auf das Substrat prinzipiell, sondern nur auf die gewählte, aber nicht an die Fragestellung angepaßte Einbautechnik zurückzuführen ist. Damit kann auch erklärt werden, warum bei gegebener mechanischer Belastung und vordefiniertem Wassergehalt ein an sich dichtes Tonsubstrat plötzlich seine Eigenschaften verliert. Weder ist der Einbau von Kunststoffdichtungsbahnen noch die Verwendung von „vergüteten“ Substraten als Alternative für Deponieabdichtungen unbedingt zwingend, sondern durch Anwendung bzw. Berücksichtigung physikalischer/mechanischer Gesetzmäßigkeiten lassen sich Tonsubstrate als ausgesprochen dicht für einen nachhaltigen Schutz des Grundwassers bzw. der Atmosphäre im Bereich von Mülldeponien verwenden.

Ausblick

Die Definition der mechanischen und gleichzeitig auch hydraulischen Stabilität von Substraten kann anhand einfacher Schrumpfversuche der für den Einbau für Mülldeponien zur Auswahl stehenden Substrate erfaßt und daraus auch die maximal mögliche mechanische Belastung bzw. der im Hinblick auf den Erhalt der Strukturstabilität erforderliche Austrocknungsgrad definiert werden. Als mögliche Empfehlung für eine langfristige Ribfreiheit kann z.B. ein Einbauwassergehalt von - 5% unter WG opt empfohlen werden, der damit ein Substratzustand links der optimalen Proctordichte definiert. Außerdem ist

- 1) Strukturstabilität trotz Einwalztechnik gegeben, sowie
- 2) bei bekannten klimatischen Bedingungen in dem Gebiet (Mülldeponie) auch nicht mit weiteren intensiveren Austrocknungen über das Maß der Vortrocknung zu rechnen.
- 3) die Verwendung von Tonmaterial mit Wasserhalten $< WG_{opt}$ eine kostengünstigere und gleichzeitig nachhaltig wirksame ökologisch relevante Alternative, die die in der TA-Siedlungsabfall fälschlicherweise definierten Einbaubedingungen mißachtet, dafür aber **langfristig dichte** Abdichtungen ergibt.

Literatur

- Bishop, A.W. (1961).** The measurement of pore pressure in the triaxial test. Pore pressure and suction in soils. Butterworths, London, 438 pp.
- Bauer, B., Taubner, H., und R. Tippkötter (2001):** Messung der mechanischen und hydraulischen Verdichtungsempfindlichkeit von bindigen Substraten mit einem verbesserten Proctorversuch. Wasser und Boden 53, 27 - 30
- Baumgartl, T., P. Winkelmann, W. Gräse, B.G. Richards und R. Horn (1995):** Measurement of the interaction of soil mechanical properties and hydraulic processes with a modified triaxial test. Proc. 1st. Int. Conference on unsaturated soils. Paris, 433 - 439, in: Alonso, E.E. und P. Delage (Hrsg.) Unsaturated Soils. Balkema Verlag ISBN: 9054105844.
- Baumgartl, T., Taubner, H. und Horn, R. (1998):** Wasserspannungsverläufe in Böden unter unterschiedlicher Nutzung als Entscheidungsgrundlage für die Prognose der Rissgefährdung mineralischer Dichtschichten. Z. Kulturtechnik und Landentwicklung, 39.
- Baumgartl, T. und R. Horn 1999:** Influence of mechanical and hydraulic stresses on Hydraulic properties of swelling soils. In: van Genuchten, M., F.J. Leij, L. Wu (Hrsg.): Characterisation and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media: 449 – 457; University of California, Riverside Publ.
- Egloffstein T., Burghardt, G., Czurda, K. (Hrsg.) 1998:** Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - wirksame und kostengünstige Systeme- Reststoffe als alternative Dichtmaterialien?-. in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis H.109, 309 S. Erich Schmidt Verlag, ISBN: 3-503-05059-0
- Egloffstein T., Burghardt, G., Czurda, K. (Hrsg.) 2000:** Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten –Ökonomie contra Ökologie, sind Oberflächenabdichtungen noch zeitgemäß?-. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 326 S. Erich Schmidt Verlag, ISBN: 3-503-05951-2
- Friedrich, R. und K. Fricke 1998:** Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TASI für die Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis H.110, Erich Schmidt Verlag. ISBN: 3-503-05064-7
- Gräse, W. 1999:** Numerische Simulation mechanischer, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode. Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel, H.48, 480 S. ISSN: 0933-680X
- Hartge, K.H. 1965:** Vergleich der Schrumpfung ungestörter Böden und gekneteter Pasten. Wiss. Z.-Friedr. Schiller Uni Jena, Math. Naturw. Reihe, 14, 53 - 57
- Hartge, K.H. u. R. Horn 1977:** Der Verlauf von Wasserspannungsisokronen in Sand- Löss- und Tonböden - eine Auswertung mehrjähriger Tensiometermessungen. Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 18, 312-322
- Hartge/Horn 1999:** Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart

- Horn, R.** 1978: The effect of a dynamic stress on the changes in strength of a clay soil. Proc. XI ISSS Congress Edmonton/Canada 76
- Horn, R.** 1981: Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Schriftenreihe des FB 14 TU Berlin, H.10, 200S. ISBN 379830792 X (Habilitationsschrift)
- Horn, R., T. Baumgartl, H. Possel, M. Koselowske, B. Albiker** 2001: Deponieabdichtungen aus mineralischem Material – eine undurchlässige Langzeitperspektive? Wasser und Abfall, 3, 38 – 41,
- Junge, T.** 1999: Zur Bedeutung des Porenwasserdruckes für die Zugfestigkeit von Böden. Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde, H. 52, 114 S., ISSN: 0933-680X
- Junkersfeld, L.** 1995: Dynamik der Wasserhaushaltsparameter von Aggregaten und Gesamtboden einer pseudovergleyten Parabraunerde aus Geschiebemergel. Schriftenreihe Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft 31, ISSN: 0933-68X
- Junkersfeld, L. und R. Horn** (1997): Über die Variabilität scheinbar fixer Wasserhaushaltsgrößen am Beispiel von Bodenaggregaten. Z. Pflanzenernährung u. Bodenkde. 159, 137 - 142
- Melchior, S.** 1993: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 S.
- Melchior, S.** 2001: Erfahrungen mit herkömmlichen und modifizierten mineralischen Oberflächenabdichtungen.. Proc. Deponietagung LANU, November 2001, 17 S.
- Melchior, S., Berger, K., Gröngröft, A., Kussmaul, M., Miehlich, G., Sokolek, V., Steinert, B., Dresselt, K., Vielhaber, B.** 1996: Bodenkundliche Aspekte der Einkapselung von Deponien und Altlasten. Exkursionsunterlagen. Eigenverlag des Inst. f. Bodenkunde, Univ. Hamburg
- Scheffer/Schachtschabel** 1998: Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart
- TA Siedlungsabfall 1993.** Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Bundesanzeiger 99a, 14 Mai 1993
- Thienemann, J.** 1999: Zur Bedeutung von Wassergehalt und Struktur für die mechanische Stabilität und hydraulische Dichtigkeit von mineralischen Deponieabdichtungen aus Geschiebemergel. Schriftenreihe Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft 49, ISSN: 0933-68X
- Thienemann, J., T. Junge, W. Gräse, T. Baumgartl und R. Horn** (1997): Zum Einfluß von Spannungen und Porenwasserdrücken auf die mechanische Stabilität von Basisabdichtungen. Teil I: Messungen im Feldversuch. Müll und Abfall 29, 353 – 358