

Forschungsvorhaben

Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten

Förderkennzeichen BWD 21010

Institut für Landespflege der Albert Ludwigs-Universität Freiburg, Prof. Dr. W. Konold

1. Kurzbeschreibung des Forschungsergebnisses

Das Forschungsvorhaben BWS 21010 hatte zum Ziel, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie Entwicklungsprozesse des Bodens, Bodenlebens und der Vegetation in den beiden unterschiedlich eingebauten Leonberger Lysimeterfeldern ablaufen und ob Einbauverfahren (K: konventioneller Einbau, U: unverdichteter Einbau) und Entwicklungsprozesse den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten beeinflussen.

Bodenmechanik

In-situ-Messungen der Scherparameter der unverdichtet eingebauten Rekultivierungsschicht bestätigen die auf Grund von klassischen Laboruntersuchungen an einem vergleichbaren Probematerial gewonnenen Erkenntnisse. Auch die Realität zeigt, dass die unverdichtete Rekultivierungsschicht des Leonberger Lysimeterfeldes standsicher ist. Es kann deshalb festgestellt werden, dass die für Leonberg gemachten Angaben zur Standsicherheit zutreffend waren.

Physikalische Eigenschaften und Bodenentwicklung

Die wichtigsten Entwicklungsprozesse der Böden nach der Bodenumlagerung können wie folgt beschrieben werden:

1. Das Feingefüge der Lössböden wird vor allem durch Organismen (Regenwürmer, Wurzeln) geprägt. Quellen und Schrumpfen des Bodens hatten trotz des extrem trockenen Jahres 2003 keinen bedeutenden Einfluss. Bei tonreicheren Böden hätte dieser abiotische Prozess allerdings eine größere Wirkung.
2. Trockenraumdichte und Eindringwiderstand unterscheiden sich nach dem Bodeneinbau deutlich: Der konventionell eingebaute Boden ist in allen Tiefenstufen deutlich dichter als der mit dem Verfahren *Vor-Kopf-Einschieben der Rekultivierungssubstrate in einer Schicht* eingebaute, auch die Eindringwiderstände sind deutlich höher. Der unverdichtete Einbau war somit erfolgreich. Dreieinhalb Jahre nach dem Bodeneinbau haben sich die Trockenraumdichten in beiden Feldern angenähert. Der unverdichtet eingebaute Unterboden ist durch Setzungen dichter geworden, ist aber nach wie vor weniger dicht als die konventionelle Variante. Die Messung der Eindringwiderstände

zeigen deutlich, dass die beim Einbau verdichteten Schichten im K-Feld bisher nicht aufgelöst wurden.

Bodenlufthaushalt

Als Folge der Bodenumlagerungen und Setzungen sind vor allem die Unterböden beider Versuchsflächen mechanisch dichter und schlechter durchlüftet als natürliche Böden aus dem gleichen Substrat. Bis in eine Tiefe von 85 cm sind beide Versuchsvarianten gleich gut belüftet, darunter belegen die Bodengasuntersuchungen nur in der verdichtet eingebauten Rekultivierungsschicht anaerobe Verhältnisse und damit Sauerstoffmangel, der die Tiefendurchwurzelung massiv einschränkt, über längere Zeiträume hinweg.

Regenwürmer

Regenwürmer haben einen wichtigen Einfluss auf die Bodenentwicklung. In Leonberg hat sich gezeigt, dass der unverdichtete Einbau für Regenwürmer deutlich günstiger ist; es überleben mehr Tiere und die Population baut sich schneller auf als beim verdichteten Einbau. Auch werden Trockenperioden besser überdauert.

Das nachträgliche Einbringen von Regenwürmern zur Förderung der Bodenentwicklung in die Versuchsfelder mit einfachen Methoden war trotz der ungünstigen Witterung des trockenen Sommers 2003 erfolgreich.

Vegetationsentwicklung

Die im Dezember 2000 angepflanzten Gehölze konnten sich in der Anfangszeit im unverdichteten Boden deutlich besser etablieren als im Feld mit verdichteter Rekultivierungsschicht. Es waren erheblich weniger abgestorbene Bäumchen zu verzeichnen. In der Folgezeit sind sowohl die Stammdurchmesser als auch die Zuwachsraten der verbliebenen Bäume bei unverdichtetem Einbau zwar höher als im Kontrollfeld, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Auch die oberirdische Biomasse des Bewuchses aus Gräsern und Kräutern ist bei unverdichtetem Einbau höher, aber auch hier sind die Unterschiede nur geringfügig. Es ist zu bedenken, dass sich beide Rekultivierungsschichten aus dem gleichen, sehr gutem Bodenmaterial aufgebaut wurden und der Oberboden, in dem die noch jungen Pflanzen überwiegend wurzeln, in beiden Feldern gleich behandelt wurde.

Sowohl die ersten Aufgrabungen im Jahr 2001 als auch die Untersuchungen im Jahr 2004 belegen eine eindeutig bessere Durchwurzelung des Bodens in der unverdichteten Variante. Dies gilt insbesondere für die zur Wasserversorgung wichtige Tiefendurchwurzelung.

Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten

Das Jahr 2003 zeigte, dass eine optimierte Rekultivierungsschicht auch in extremen Trockenjahren die Wasserversorgung des Bewuchses sicherstellen kann, jedoch lässt

auch ein sehr großer Bodenwasserspeicher hierbei keine uneingeschränkte Verdunstung zu.

Es sind Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern bei der Wassersättigung und dem Absickerungsverhalten zu erkennen. Deutliche Unterschiede bei der Absickerungsmenge sind jedoch erst mit der fortschreitenden Entwicklung der Gehölze zu erwarten. Vor allem im Trockenjahr 2003 zeigte sich, dass der in Lagen verdichtet eingebaute Boden in Kompartimente mit unterschiedlichem Wasserhaushalt differenziert ist. Diese Tatsache hat nachteilige Auswirkungen auf die Wasserversorgung der Pflanzen, denn in Trockenzeiten war die Nachlieferung aus dem Unterboden und die Wiederbefeuchtung bei Niederschlägen auch aus dem Oberboden, gehemmt.

In Nässephasen wird - zumindest bei dem in Leonberg verwendeten Bodenmaterial - Wasser auf verdichteten Schichten aufgestaut und fließt lateral hangabwärts. Dieses „Hangzugwasser“ beeinflusst die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht nachteilig. Das aus Gründen der Standsicherheit konventionell verwendete Verfahren „lagenweise verdichteter Einbau“ ist somit – zumindest bei bestimmten Bodenarten – nicht zielführend.

Wasserhaushaltsmodelle

Soweit beim derzeitigen relativ kurzen Betrachtungszeitraum und der Beschränkung auf einen Standort eine Bewertung der Ergebnisse möglich ist, kann festgestellt werden:

1. Die Programme HELP und BOWAHALD können für längerfristige Betrachtungszeiträume, beispielsweise Jahressummen, nur sehr überschlägige Wasserhaushaltsbilanzen zur Bewertung der Wasserhaushaltsfunktion einer Rekultivierungsschicht liefern. Modellierungen können daher nur bedingt Messwerte aus Lysimeterfeldern ersetzen. Der Oberflächenabfluss wird von beiden Programmen deutlich überschätzt.
2. Die Genauigkeit der Absickerungswerte nimmt mit zunehmender zeitlicher Auflösung deutlich ab. Einzelne Tageswerte sind praktisch nicht verwertbar, da die Programme die Absickerung in Trockenphasen stark unter- und in Nassphasen sowie außerhalb der Vegetationszeit eher überschätzen.
3. Die Bodenwassergehalte werden von HELP und BOWAHALD in ihrer Tendenz ansatzweise richtig wiedergegeben, allerdings nur innerhalb des durchwurzelten Bereich oder der Verdunstungszone. Die Bodenwassergehalte des Unterbodens werden, vor allem im Sommer, zu hoch angesetzt.
4. Im Beispiel der Leonberger Lysimeterfelder lieferte das Programm HELP genauere Wasserhaushaltsbilanzen als BOWAHALD, jedoch erscheinen auch an HELP substanzielle Korrekturen erforderlich. Lysimeterfelder als Lieferanten valider Vergleichsdaten können hierbei eine wesentliche Rolle spielen.

Forschungsbedarf

Die aus dem Vorhaben BWD 21010 gewonnenen Ergebnisse bestätigen die vermuteten günstigeren Standorteigenschaften unverdichtet eingebauter Rekultivierungsschichten. Im Testfeld U entwickelte sich eine größere Regenwurmpopulation und die Vegetation reagierte mit einer deutlich tiefer reichenden Durchwurzelung und geringfügig besserem Wachstum der gepflanzten Gehölze. Die Lysimeterfelder unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer Reaktion auf Niederschläge und Austrocknung, jedoch nicht durch signifikant unterschiedliche Absickerungsmengen. Dies ist wohl in erster Linie darin begründet, dass die angepflanzten Gehölzbestände noch sehr jung und somit noch weit davon entfernt sind, einen Wasserverbrauch in der Größenordnung von Wäldern zu erreichen. Es ist damit zu rechnen, dass mit der Entwicklung der Gehölze und steigendem Wasserverbrauch die Unterschiede zwischen den Testfeldern deutlicher werden.

Aus den vorgenannten Gründen muss die Forschung in Leonberg auf die langfristige Untersuchung der in den Testfeldern zu erwartenden Veränderungen von Boden und Vegetation und damit auch des Wasserhaushaltes abzielen. Das Forschungsprogramm sollte deshalb weitergeführt werden. Sinnvoll wäre hierbei eine kontinuierliche Überwachung der Lysimeterfelder mit reduzierten Bodenwassergehaltsmessungen sowie in zeitlichen Abständen von drei bis fünf Jahren Untersuchungen zur Bodenentwicklung, Regenwurmfaua und Vegetation.

Im Hinblick auf die praxisnahe Umsetzung der Forschungsergebnisse sind noch einige Fragen offen, die zukünftig beantwortet werden sollten:

1. Herkunft und Eigenschaften der bei einer Rekultivierung verwendeten Substrate sind aus baubetrieblichen Gründen in der Regel nicht im Voraus bekannt. Im Bauablauf ist eine kurzfristige Prüfung der angedienten Böden und eine schnelle Freigabe zur Anlieferung erforderlich. Somit sind selbst einfache Laborscherversuche zur Bestimmung der Scherparameter unverdichteter Rekultivierungssubstrate in der Praxis selten möglich. Ein erster Ansatz zur Bewertung der Bodeneignung wird nachfolgend (siehe 3. Empfehlungen) vorgestellt, um diesen Widerspruch aufzulösen. Allerdings sollten weiter gehende Untersuchungen zu prinzipiellen Schereigenschaften für typische und verbreitete Bodenmaterialien Baden-Württembergs als „Referenzböden“ im Voraus ermitteln. In Verbindung mit Verbreitungskarten geeigneter Bodenarten könnten somit bereits im Vorfeld umfangreicher Bauvorhaben Maßnahmen zur Bodenbeschaffung einsetzen.
2. Der Bau der Leonberger Versuchsanlage hat gezeigt, dass auch beim Bodeneinbau ohne zusätzliche Verdichtung trotz Verwendung einer leichten Raupe mit Moorketten Oberbodenverdichtungen entstehen. Diese sind positiv mit der Häufigkeit der Befahrungen der Bodenoberfläche korreliert. Es sollte deshalb untersucht werden, ob in der Praxis der Einsatz einer schweren Raupe effektiver ist, weil so mit einer geringeren Zahl von Überfahrten das gleiche Bodenvolumen eingebaut werden kann. Dieses Verfahren wäre aufgrund der höheren Arbeitsleistung in jedem Fall kostengünstiger, möglicherweise könnte damit sogar das Ausmaß der Oberbodenverdichtung reduziert werden.

3. Dem lateralen Wasserzug in geneigten Rekultivierungsschichten, wie er in den Leonberger Lysimeterfeldern nachgewiesen werden konnte, wurde bislang keine Beachtung geschenkt. Ein Grund hierfür kann sein, dass die im Deponiewesen eingesetzten Wasserhaushaltsmodelle lateralen Wasserzug praktisch nicht berechnen können. Es wäre interessant, zu prüfen, ob sich mit lagenweise eingebauten Rekultivierungsschichten und dem Fassen und Abführen der lateralen Absickerung am Böschungsfuß langfristig die Absickerungsmengen aus der Rekultivierungsschicht in die Entwässerungsschicht beziehungsweise beim Fehlen weiterer Dichtungselemente in den Deponiekörper reduzieren lassen.

Die Vergleiche der realen Messwerte der Leonberger Lysimeterfelder mit den modellierten Absickerungsraten beruhen aufgrund des relativ kurzen Vergleichszeitraums (August 2001 bis April 2004) und lediglich zwei Aufbauvarianten auf einer relativ schmalen Datenbasis. Die Modellierungsergebnisse konnten jedoch insgesamt nicht hinreichend genau die Zustände in Leonberg abbilden. Insbesondere in Trockenphasen wurde die Absickerung drastisch unterschätzt und bei einer zeitlichen Auflösung als Tageswerte waren die von den Modellen berechneten Sickerwassermengen falsch. Es liegt deshalb auf der Hand, weitere Vergleiche zwischen Messwerten und Modellierungsergebnissen zu fordern und bei ähnlichen Resultaten eine Verbesserung der Modelle anzustreben. So wird als notwendig erachtet, Wasserhaushaltsmodelle dahin gehend zu erweitern, dass sie lateralen Wasserzug abzubilden vermögen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Tatsache, dass Deponien zum großen Teil aus Böschungsflächen bestehen und verdichtete Lagen, auf denen Wasser lateral fließt, in konventionell ausgeführten Rekultivierungsschichten häufig zu finden sind. Entsprechend groß ist der Anteil von Flächen mit mutmaßlich lateral fließendem oder ziehendem Hangwasser. Ein weiterer, allerdings mathematisch und im Modell sicher schwer zu quantifizierender Faktor ist, dass Bodenkenngrößen wie beispielsweise die Feldkapazität wohl in der Realität weit weniger klar definierte Grenzen sind, als dies im Allgemeinen angenommen und auch in die Modelle integriert wird. So zeigen die Leonberger Lysimeterfelder ein von den Modellrechnungen deutlich abweichendes Absickerungsverhalten.

2. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Die Optimierung von Rekultivierungsschichten dient in erster Linie umweltschützerischen Zielen. Eine nachhaltige Oberflächensicherung von Deponiebauwerken hat, auch auf sehr lange Zeiträume bezogen, das Ziel, die Umwelt (Boden, Wasser, Luft) vor dem Austrag von Schadstoffen aus dem Deponiekörper zu schützen. Dies ist langfristig nur mit geeigneten Rekultivierungsschichten einschließlich ihrem Bewuchs möglich. Die Diskussionen um die Dauerhaftigkeit und Funktionssicherheit technischer Dichtungssysteme, beispielsweise der mineralischen Abdichtungen, macht dies deutlich.

Die Untersuchungen des Wasserhaushalts sowie der Boden- und Regenwurm- und Vegetationsentwicklung einer mit dem Verfahren *Vor-Kopf-Einschieben der Rekultivierungssubstrate in einer Schicht* hergestellten Rekultivierungsschicht bestätigen die Boden schonende Wirkung des Verfahrens. Die unverdichtet hergestellte Rekultivierungsschicht ist ein günstigerer Standort als eine verdichtete Schicht. Somit ist davon auszugehen, dass mit diesem Verfahren ein wesentlicher Beitrag zur nachhaltigen Sicherung von Deponieoberflächen geleistet werden kann. Ein günstigerer Pflanzenstandort fördert eine stabilere, weniger stress- und störungsanfällige Vegetationsschicht. Positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sind zu erwarten.

Die Vergleiche zwischen Messergebnissen der Großlysimeterfelder und Wasserhaushaltsmodellierungen zeigen, dass die in der Praxis eingesetzten Modelle noch weiterer Verbesserungen bedürfen.

3. Welche Empfehlungen ergibt sich aus dem Forschungsergebnis für die Praxis?

Bodenmechanik und Rekultivierungseignung

Aus den Erfahrungen beim Bau der Lysimeteranlage Leonberg können die folgenden allgemeinen Empfehlungen für standsicheres Bodenmaterial abgeleitet werden. Bei einer Hangneigung flacher als 1:2,5 bis 1:2,7 können Bodenarten mit bis zu 25 Masse-% Ton bei unverdichtetem Einbau der Rekultivierungsschicht als standsicher angesehen werden. Die Eigenschaften der verwendeten Böden sind jedoch im Einzelfall immer mit klassischen Scherversuchen zu ermitteln. Weiter gehende Versuche (Großrahmenschergerät etc.) sind in diesem Fall nicht erforderlich.

Die Beschränkung des Tongehaltes eines Bodenmaterials auf < 25 Masse-% im Hinblick auf die Standsicherheit schließt einen Teil des Bodenartenspektrums für Rekultivierungszwecke an Deponieböschungen praktisch aus. Eine weitere Einschränkung bei der Auswahl der Bodenart ist die Rekultivierungseignung des Bodenmaterials die noch nach Folgenutzung und vorherrschendem Klima differenziert werden kann. Qualifizierte Rekultivierungsschichten müssen aus geeigneten Bodenarten aufgebaut sein, damit die Ansprüche der Vegetation an Nährstoff- und Wasserversorgung sicher gestellt sind. Im Hinblick auf den Wasserhaushalt, insbesondere die Verminderung und Vergleichmäßigung der Absickerungsraten ist zu fordern, dass die Böden eine möglichst hohe (nutzbare) Wasserspeicherkapazität besitzen sollen. Bei der folgenden Bewertung der Bodenarten ist vorausgesetzt, dass die Steingehalte bei guter Eignung höchstens 10 Vol-% und bei eingeschränkter Eignung maximal 30 Vol-% betragen:

Am Besten geeignet sind sandige und (schwach) tonige Schluffe, lehmige, schluffige und tonige Sande sowie sandige Lehme, gut geeignet sind reine und stark tonige Schluffe sowie schluffige Lehme bis zu 25 % Tongehalt. Tonige Lehme sind an Hängen aus Standsicherheitsgründen (Tongehalt > 25 %) eher ungeeignet. Sandige, schluffige und lehmige

Tone sind für ebene Flächen eingeschränkt geeignet. Reine Tone und reine Sande sind in keinem Fall als Rekultivierungssubstrate geeignet.

Regenwürmer

Bodenumlagerung und -einbau sind katastrophale Ereignisse für eine Regenwurmpopulation. Ein drastischer Verlust von Individuen ist in Folge dieser Maßnahmen zu erwarten. Um die unvermeidbaren hohen Verluste zu begrenzen sollte der Boden nicht zwischengelagert und nicht unnötig befahren und verdichtet werden; eine nachträgliche Lockerung ist immer ineffektiv und kommt für die Regenwürmer zu spät.

Auch bei hochwertigen Rekultiverungen braucht die Entwicklung der Regenwurmpopulationen und der von ihnen geprägten Bodenstruktur Zeit. Daher fehlt anfänglich ihre positive Wirkung auf die Bodenstruktur. Wie schnell und in welchem Umfang sie später auftritt, ist in hohem Maße von der Art und Weise der Rekultivierung abhängig.

Auf der Grundlage der erfolgreichen Versuche können zwei einfache Verfahren zum Einbringen von Regenwürmern für die Baupraxis vorgeschlagen werden:

- Das Ausbringen von Oberboden aus Grünland unmittelbar nach Abschluss der Erdarbeiten oder
- Das Einbringen von regenwurmreichen Grassoden im Frühjahr des Folgejahres nach der Rekultivierung in Abhängigkeit vom Ergebnis einer vorangegangenen Populationserhebung.

Wasserhaushaltsmodelle

Bezüglich der Verwendung von Wasserhaushaltsmodellen ergeben sich aus dem Vergleich zwischen Messwerten und Modellierungsergebnissen folgende Empfehlungen:

1. Da die Ungenauigkeit der Modellierungsergebnisse mit zunehmender zeitlicher Auflösung erheblich steigt, ist die Betrachtung von Einzelereignissen oder die Bemessung von Entwässerungseinrichtungen etc. auf der Basis von Modellierungen mit den Programmen HELP und BOWAHALD somit nicht anzuraten.
2. Die Bodenwassergehalte des Unterbodens werden, vor allem im Sommer, von den Modellen zu hoch angesetzt. Die Modelle sollten daher nicht zur Abschätzung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Dichtungen eingesetzt werden.