

Universität Stuttgart

Institut für Geographie

**Oberbodenauftrag als naturschutzrechtliche
Ausgleichsmaßnahme**

Ein Konzept mit Zukunft?

Vorgelegt von:

Christoph Dengler

Mat.-Nr.: 2121440

c.dengler@gmx.net

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr. W.-D. Blümel

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplomgeographen

Stuttgart, 29.08.2008

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt wurde und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entstammen, durch Angabe der Quellen als Entlehnung gekennzeichnet sind.

Stuttgart, den 29. August 2008



(Christoph Dengler)

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen sehr herzlich bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und ihr Wissen beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt dabei Herrn Matthias Güthler (Ökologie•Planung•Forschung), der eine Diplomarbeit auf diesem Gebiet maßgeblich initiiert hat. Er investierte viel Zeit und stand mir mit wertvollem Rat zur Seite.

Auf Seiten des Instituts für Geographie gaben mir Herr Prof. Dr. Wolf-Dieter Blümel und Herr Dr. Joachim Eberle große Freiheit in der Themenwahl und boten mir wichtige fachliche, formale und praktische Unterstützung.

Die Mitwirkung von Herrn Siegmund Jaensch (Regierungspräsidium Stuttgart), Herrn Michael Klumpp (Gemeinde Möglingen), Frau Rotraut Schmalzried, Herrn Karl-Christian Stumpf und Frau Silvia Walter (alle Landratsamt Ludwigsburg) war für mich ein großer Ansporn. In zum Teil sehr ausgedehnten, aber umso interessanteren Gesprächen konnte ich viel über die Praxis im angewandten Bodenschutz und die auftretenden Probleme lernen. Ohne deren Unterstützung hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Herr Gunnar Hoefer (Universität Hannover) versorgte mich selbst von einem Tagungsaufenthalt in Australien noch mit wichtigen Hinweisen für die Arbeit mit dem Penetrologger, den die Firma Eijkelkamp für diese Arbeit freundlicherweise zur Verfügung stellte. Vielen Dank an die Mitarbeiter Frau Caroline Jaeschke und Herr Markus Reissig, die dies ermöglichten.

Wertvolle Informationen über das Profil vom September 2007 gab mir Herr Dr. Michael Kösel (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg).

Bei DEKRA Umwelt GmbH wurde während meiner mehrjährigen studentischen Mitarbeit im Fachgebiet Altlasten mein Interesse für die Belange des angewandten Bodenschutzes geweckt.

Des Weiteren danke ich Corina Dörfer für die Korrektur zahlreicher orthographischer und grammatikalischer Fehler.

Großer Dank gebührt meinen Eltern, die mich während meiner ganzen Studienzeit nach Kräften unterstützt haben, und ganz besonders meiner Freundin Anika Dörfer, die mich immer wieder aufmuntern und motivieren konnte.

Allen anderen, die mich beim Graben der Profile, beim Druck der Arbeit oder mit kleinen, aber wichtigen Hinweisen unterstützt haben, gilt hier ebenso mein Dank.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Fragestellung.....	1
2 Hintergründe zu Oberbodenauffüllungen.....	4
2.1 Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung.....	4
2.2 Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung.....	5
2.3 Praxis bei Auffüllmaßnahmen.....	10
3 Vorstellung der Untersuchungsflächen.....	16
3.1 Naturräumlicher Überblick.....	16
3.2 Auffüllfläche Bühl bei Möglingen.....	17
3.3 Vergleichsflächen im Kreis Ludwigsburg.....	20
3.3.1 Vaihingen-Riet.....	21
3.3.2 Enzweihingen.....	22
3.3.3 Ludwigsburg-Poppenweiler.....	23
4 Methoden- und Untersuchungsplanung.....	25
4.1 Schürfgruben und Lagerungsdichtebestimmung.....	25
4.2 Penetrologger.....	27
4.3 Wurzeluntersuchung.....	28
4.4 Bohrstock.....	30
5 Darstellung der Ergebnisse.....	31
5.1 Ergebnisse auf der Fläche Bühl.....	31
5.1.1 Feldbefunde aus den Schürfgruben.....	32
5.1.2 Ergebnisse der Lagerungsdichtebestimmung im Labor.....	37
5.1.3 Ergebnisse der Eindringwiderstandsmessungen.....	39
5.1.4 Wurzeluntersuchung.....	41
5.2 Ergebnisse auf den Vergleichsflächen.....	43
5.2.1 Vaihingen-Riet (VGL-A).....	43
5.2.2 Enzweihingen (VGL-B).....	46
5.2.3 Ludwigsburg-Poppenweiler (VGL-C).....	49
6 Diskussion der Ergebnisse.....	52
6.1 Beurteilung der Auffüllung Bühl und Vergleich mit anderen Flächen.....	52
6.2 Verwendung eines Penetrometer zur Untersuchung von Auffüllungen.....	60
6.3 Verbesserungsmöglichkeiten für das Vorgehen bei zukünftigen Auffüllungen.....	63
7 Zusammenfassung und Fazit.....	71
8 Quellennachweise.....	74

Abbildungsverzeichnis

1	Übersichtskarte: Lage der Untersuchungsflächen.....	15
2	Karte der Auffüllfläche Bühl bei Möglingen.....	18
3	Auffüllfläche Bühl.....	19
4	Vergleichsfläche Vaihingen-Riet.....	21
5	Vergleichsfläche Enzweihingen.....	22
6	Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler.....	24
7	Bedienung des Penetrologger.....	27
8	Entnahme von Wurzelproben.....	29
9	Bodenkundliche Daten und Ergebnisse auf der Auffüllfläche Bühl.....	34
10	Wurzelfilz am Übergang jY-fAp.....	35
11	Wurzeln entlang von Rissen.....	36
12	Verschiedene EW-Messkurven.....	40
13	Gewaschene, frische Wurzeln der Profile A-03 und A-04.....	42
14	Karte der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet.....	45
15	Geländestufe am Rand der Auffüllung Enzweihingen.....	46
16	Karte der Vergleichsfläche Enzweihingen.....	48
17	Karte der Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler.....	51
18	Beispielprofile für eine gelungene Oberbodenauffüllung.....	52
19	Profil vom September 2007.....	54
20	Profil A-04 mit scharfer Kante im Übergang jY-fAp.....	55
21	Eindringwiderstände in Referenzflächen und Vergleichsflächen.....	57
22	Korrelation zwischen effektiver Lagerungsdichte und Eindringwiderstand.....	61
23	Abbruchlockerungsgerät MM100.....	66

Tabellenverzeichnis

1	Kenndaten der Untersuchungsfläche Bühl bei Möglingen.....	17
2	Kenndaten der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet.....	22
3	Kenndaten der Vergleichsfläche Enzweihingen.....	23
4	Kenndaten der Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler.....	24
5	Daten der Profilaufnahmen.....	26
6	Befunde aus den Schürfgruben auf der Auffüllfläche Bühl.....	32
7	Daten aus der Bestimmung der Trockenrohddichte im Labor.....	38
8	Trockenmassen der Wurzeluntersuchungen.....	41
9	Ergebnisse der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet.....	43
10	Ergebnisse der Vergleichsfläche Enzweihingen.....	47
11	Ergebnisse der Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler.....	50

1 Einleitung und Fragestellung

Zeitungsleser konnten zuletzt am 25.08.2008 zum Beispiel in der Stuttgarter Zeitung lesen, dass die baden-württembergische Landesregierung das Bauen auf grüner Wiese eindämmen, den Flächenverbrauch verringern will. In Baden-Württemberg wurden im Jahr 2007 immerhin 10,3 Hektar an Flächen pro Tag (UM 2008a) für Siedlungs-, Gewerbe- oder Verkehrsflächen in Anspruch genommen. Flächen, die dem Naturhaushalt oder der Landwirtschaft verloren gehen. Betroffen sind verschiedene Schutzgüter – das Schutzgut Boden ist nur eines davon. Ein Ausgleich für Eingriffe in solche Schutzgüter ist sowohl im Baurecht, als auch im Naturschutzrecht fest verankert. Gefordert ist ein funktionaler Ausgleich (BNatSchG §19 (2)), was bedeutet, dass Eingriffe in ein bestimmtes Schutzgut auch in diesem Schutzgut ausgeglichen werden müssen. Die Anlage einer Streuobstwiese als Ausgleich für einen Eingriff in das Schutzgut Boden auf ackerbaulich genutzten Flächen stellt folglich keinen funktionalen Ausgleich dar. Doch es scheint nicht leicht zu sein, einen funktionalen Ausgleich für Eingriffe in das Schutzgut Boden zu schaffen. Im Umweltbericht Juli 2008 zu einem Bebauungsplan in Leonberg, Kreis Böblingen, der dem Gemeinderat vorlag, heißt es hinsichtlich des Ausgleichs für das Schutzgut Boden, dass keine Flächen für geeignete Ausgleichsmaßnahmen zur Verfügung stünden und daher ein Kompensationsdefizit verbleibe (Stadt Leonberg 2008:32).

Das Umweltministerium Baden-Württemberg veröffentlichte 2006 eine Arbeitshilfe „Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung“ (UM 2006). Darin wird eine Vielzahl an möglichen Ausgleichsmaßnahmen für Eingriffe in das Schutzgut Boden aufgeführt, die über die bekannteste und wirksamste Möglichkeit der Entsiegelung von Flächen hinausgeht. Einer dieser Vorschläge betrifft den Oberbodenauftrag, die Aufbringung von Oberbodenmaterial, das bei Flächenerschließungen anfällt, auf landwirtschaftliche Flächen, wo eine frühere Erosion ausgeglichen oder Böden mit mit geringer bis mittlerer Leistungsfähigkeit verbessert werden können (nach UM 2006:15). Neben der Schaffung eines realen Ausgleichs treten noch weitere positive Nebeneffekte auf: Der Landwirtschaft gehen neben den Bauflächen nicht noch weitere Flächen für Ausgleichsmaßnahmen verloren, ihre Böden werden verbessert und leistungsfähiges Oberbodenmaterial bleibt dem Naturhaushalt und der Landwirtschaft erhalten und muss nicht deponiert werden.

Bodenauffüllungen sind kein neuartiges Vorgehen, sie werden auf landwirtschaftlichen Flächen seit langer Zeit durchgeführt. Landwirte erhoffen sich dadurch Bodenverbesserungen, möglicherweise einfach eine Verbesserung der Bearbeitung auf flachgründigen, steinigen Böden oder eine Verbesserung der Fruchtbarkeit auf wenig leistungsfähigen, vielleicht erodierten Böden. Zur Durchführung von Bodenauffüllungen bestehen bereits mehrere Leitfäden, darunter DIN 19731, die den Erfolg der Maßnahme sicherstellen und das Entstehen von schädlichen Bodenveränderungen wie Verdichtungen oder Schadstoffeintrag verhindern soll.

„Erhebungsuntersuchungen zur Qualität von Geländeauffüllungen“ der Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg brachten 2000 zum Vorschein, dass bei die bis dahin üblichen Bodenauffüllungen, die noch nicht als Ausgleichsmaßnahmen konzipiert wurden, „oftmals schwere Mängel aufweisen“ (LfU 2000b:88). Es seien in mehreren Fällen gar Bodenverschlechterungen eingetreten. Die Begleitung und Überwachung von Auffüllmaßnahmen durch Fachgutachter wird darin dringend empfohlen. Dennoch werden auch jüngere Oberbodenauffüllungen, die teilweise dem naturschutzrechtlichen Ausgleich dienen, häufig immer noch ohne fachgutachterliche Begleitung durchgeführt, wie auf den in dieser Arbeit genannten Vergleichsflächen.

Die mit insgesamt fast 6 ha vergleichsweise große Auffüllfläche in Möglingen, Landkreis Ludwigsburg, wurde allerdings von einem Fachbüro geplant und während der Bauarbeiten Ende 2006 begleitet. Der Verlauf der Arbeiten war viel versprechend und ließ einen Erfolg erwarten. Ein knapp ein Jahr später wurde auf der Fläche aber ein Profil gegraben, das mehrere Mängel, insbesondere hinsichtlich der Verdichtung und der mangelnden Verzahnung und Durchwurzelung, aufwies. Aus dieser einen Profilgrube lassen sich allerdings keine Rückschlüsse auf die gesamte Fläche ziehen, weshalb sie zum Anlass für eine flächenhaft angelegte Untersuchung wurde.

Im Zusammenhang mit dieser, aber auch mit anderen Oberbodenauffüllungen, die als Ausgleichsmaßnahme anerkannt wurden, stellen sich mehrere Fragen. Zunächst ist von großem Interesse, wie die Verhältnisse insbesondere hinsichtlich der genannten Aspekte Verdichtung, Verzahnung und Durchwurzelung auf der Fläche in Möglingen tatsächlich sind. Zur Untersuchung von Auffüllflächen besteht der Bedarf, eine schnelle und mit geringem technischen Aufwand vonstatten gehende Methode zu finden. Eine in Frage kommende Möglichkeit wäre ein Penetrologger, mit dem der Eindringwiderstand des Bodens tiefenabhängig gemessen wird. Es sind jedoch keinerlei Untersuchungen bekannt, in

der die Eignung eines solchen Geräts zur Untersuchung von Bodenauffüllungen bereits betrachtet worden wäre. Im praktischen Einsatz muss sich zeigen, ob sich das Gerät zu diesem Zweck eignet. Nicht zuletzt müssen die beim Oberbodenauftrag eingesetzten Vorgehensweisen überprüft und auf Verbesserungsmöglichkeiten hin untersucht werden. Auf Basis empirischer Untersuchungen sollen zu diesen Themen Antworten gefunden werden und schließlich eine Aussage darüber erlauben, ob sich fachgerecht konzipierte und durchgeführte Oberbodenauffüllungen als Ausgleichsmaßnahme im Rahmen der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung eignen.

Für diese Diplomarbeit ergeben sich daraus folgende Fragestellungen:

- **Wurde bei der Auffüllung in Möglingen das Ziel einer Bodenverbesserung tatsächlich erreicht und welche Ergebnisse zeigen andere, nicht fachgutachterlich betreute Oberbodenauffüllungen?**
- **Eignet sich ein Penetrologger zur Untersuchung der Qualität von Oberbodenauffüllungen?**
- **Welche Vorschläge können auf Grundlage der vorliegenden Daten für die Optimierung von Oberbodenauffüllungen gemacht werden?**
- **Können Oberbodenauffüllungen auch in Zukunft als naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahme empfohlen werden?**

2 Hintergründe zu Oberbodenauffüllungen

2.1 Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung

Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung stützt sich auf zwei Rechtsbereiche, das Baurecht (BauGB § 1a (3)) sowie das Naturschutzrecht, hier sowohl auf Bundesebene (BNatSchG §§ 19 ff) als auch auf Länderebene (in Baden-Württemberg: NatSchG §§ 20 ff). Demnach müssen Eingriffe in oder erhebliche Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft vermieden werden, unvermeidbare Eingriffe müssen ausgeglichen oder ersetzt werden.

Es ist genau festgelegt, wie im Rahmen der Eingriffsregelung nach dem Naturschutzrecht verfahren werden muss (REESKE-MANTHEY 2005:8). An oberster Stelle steht die Vermeidung von Eingriffen, wobei die Vermeidung eher als Gebot zur Minimierung von Eingriffsfolgen zu sehen ist, nicht als Verpflichtung zur Suche nach einem alternativen Standort (KOCH 2008:16). Erst wenn eine Vermeidung nicht möglich ist, oder wenn minimierte Eingriffsfolgen übrig bleiben, müssen Ausgleichsmaßnahmen gesucht werden. Diese müssen einen „unmittelbaren funktionalen, räumlichen und zeitlichen Bezug zum Eingriffsvorhaben“ (REESKE-MANTHEY 2005:10) aufweisen. Dagegen sind die diesbezüglichen Anforderungen an Ersatzmaßnahmen wesentlich geringer, wenn auch nicht genau definiert (SRU 2002b:311). Ersatzmaßnahmen kommen jedoch erst in Frage, wenn ein Ausgleich nicht möglich ist. In der Praxis wird die Abgrenzung zwischen Ausgleich und Ersatz aber relativiert, was nach SRU (2008:356) „zu immer gleichartigen Standardmaßnahmen und einer Homogenisierung der Landschaft“ führen kann. Bei dieser Unterscheidung ist auch die Eingriffsregelung nach BauGB zu beachten (siehe unten). Sind keine Ersatzmaßnahmen möglich, so muss abgewogen werden, ob im konkreten Fall „Belange von Natur und Landschaft oder der geplante Eingriff im Range vorgehen“ (REESKE-MANTHEY 2005:12). In diesem Fall sind Ersatzzahlungen möglich, die dem Verursacher des Eingriffs auferlegt werden. Nach SRU (2002a:129) sei es allerdings fast nie der Fall, dass Eingriffe aufgrund einer Abwägung nicht genehmigt werden würden.

Die Eingriffsregelung nach dem Baurecht unterscheidet sich in Details von der Eingriffsregelung nach dem Naturschutzrecht. Hier wird nicht zwischen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen unterschieden (§ 200a BauGB), dafür ist die Definition des Ausgleichs entsprechend weiter gefasst. Der funktionale Bezug zum Eingriff ist ebenfalls festgelegt,

ein räumlicher Zusammenhang ist nach § 1a (3) BauGB jedoch nicht erforderlich. Zudem gestattet es §135a (2), Ausgleichsmaßnahmen schon vor einem Eingriff durchzuführen und erst später den Eingriffen zuzuordnen. Dies ermöglicht das Führen von „Ökokonten“ (LfU 2000a:10).

Wie bislang deutlich wurde, ist bei Ersatz- wie auch bei Ausgleichsmaßnahmen (im weiteren werden beide Maßnahmentypen gemeinsam als Kompensationsmaßnahmen bezeichnet) immer der funktionale Bezug gefordert, die Maßnahmen sollen also genau die Funktionen kompensieren, die beim Eingriff beeinträchtigt wurden. Wird also der Lebensraum einer bedrohten Art durch einen Eingriff zerstört, sollte dieser wieder neu gestaltet werden. Wird Boden versiegelt und kann so nicht seine Funktion als Ausgleichskörper im Wasserhaushalt erfüllen, so muss zur Kompensation ein solcher Ausgleichskörper wieder hergestellt werden. Im folgenden Kapitel soll nun im Detail auf naturschutzrechtliche Eingriffsregelung in Bezug auf das Schutzgut Boden eingegangen werden.

2.2 Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung

Das Schutzgut Boden steht in seiner Wertigkeit nicht hinter den anderen Schutzgütern des Naturhaushaltes zurück (UM 2006:5). Jedoch ist der Boden nach §1 BBo-dSchG nicht als solcher geschützt, sondern nur die Funktionen, die dieser erfüllt (BfN 2000:19). Diese werden in §2 (2) wie folgt definiert:

Der Boden erfüllt im Sinne dieses Gesetzes

1. natürliche Funktionen als

- a) Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,*
- b) Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,*
- c) Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers,*

2. Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte sowie

3. Nutzungsfunktionen als

- a) Rohstofflagerstätte,*
- b) Fläche für Siedlung und Erholung,*
- c) Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung,*
- d) Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung*

Insbesondere die Nutzungsfunktionen stehen zum Teil im Widerspruch zueinander und mit den anderen Funktionen, jedoch lässt sich aus §1 ablesen, welche Funktionen im Zusammenhang mit der Eingriffsregelung von Bedeutung sind. Demnach sind Beeinträchtigungen der *natürlichen Funktionen* sowie der *Archivfunktion* soweit wie möglich zu vermeiden. Folglich handelt es sich nach BfN (2000:46) bei den 4 Funktionen *Lebensgrundlage, Bestandteil des Naturhaushalts, Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium* sowie *Archiv der Natur- und Kulturgeschichte* um die für die Eingriffsregelung relevanten Bodenfunktionen.

Lange wurde die Eingriffsregelung insbesondere auf die belebte Umwelt angewandt und das Schutzgut Boden im Wesentlichen auf die Funktion als Lebensraum für Tiere und Pflanzen hin bewertet (UM 2006:4, BfN 2000:40). Daher sind konkrete Aussagen zu möglichen Kompensationsmaßnahmen selten zu finden. Diese beziehen sich meist auf den Ausgleich von Versiegelungsmaßnahmen mit Entsiegelungsmaßnahmen, wobei die Verfügbarkeit von geeigneten Flächen ein Problem darstellt (siehe unten). Andere Beeinträchtigungen würden zumeist zusammen mit dem Ausgleich für Biotoptypen behandelt, ohne spezifische Betrachtung (BfN 2000:137f). Es wird davon ausgegangen, dass eine Ausgleichsmaßnahme im Schutzgut Biotope sich auch positiv auf die Bodenfunktionen auswirkt. Das Fehlen von fachlich fundierten und genau definierten Konzepten und Verfahren für Ausgleichsmaßnahmen im Schutzgut Boden (UM 2006:4) überrascht daher nicht.

Erst in den letzten Jahren, nachdem 1999 das Bundesbodenschutzgesetz verabschiedet wurde, rückte das Schutzgut Boden im Zusammenhang mit der Eingriffsregelung mehr ins Blickfeld. Eingriffe in das Schutzgut Boden sollen auch im Schutzgut Boden kompensiert werden. Von großer Bedeutung ist es, die Bodenfunktionen genau zu benennen, da nach BfN (2000:139f) der Einsatz bestimmter Maßnahmen gleichzeitig einzelne Funktionen verbessern und andere verschlechtern kann. Die Bodenfunktionen stehen zum Teil in einem engen Zusammenhang miteinander, weshalb die Bewertung von Eingriffen und die daraus erfolgende Erfordernis von Kompensationsmaßnahmen nicht einfach ist. In BfN (2000:147f) werden einige bis zum Jahr 2000 bestehende Leitfäden mit deren Vorschlägen zum Umfang von solchen Maßnahmen aufgeführt. Die einzige konkrete Aussage in vielen dieser Leitfäden ist, dass eine Versiegelung von Flächen durch die Entsiegelung einer Fläche vergleichbarer Größe ausgeglichen werden soll. Auch hinsichtlich anderer Eingriffe wird vorgeschlagen, im gleichen Flächenumfang zu kompensieren,

wobei teilweise noch Aufschläge für Faktoren wie zeitliche Verzögerung angesprochen werden. Überwiegend wird jedoch eine einzelfallbezogene, verbal-argumentative Begründung empfohlen. Dementsprechend empfiehlt auch BfN (2000:140) eine einzelfallbezogene Auswahl und Begründung von Kompensationsmaßnahmen, die den örtlichen Gegebenheiten und den klar formulierten Zielen angepasst werden.

Einen anderen Ansatz formuliert das Umweltministerium Baden-Württemberg (UM 2006), hier werden anhand einer bestehenden Bewertungssystematik (UM 1995) die Bodenfunktionen „Standort für natürliche Vegetation“, „Standort für Kulturpflanzen“ bzw. „natürliche Bodenfruchtbarkeit“, „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“, „Filter und Puffer für Schadstoffe“ sowie „landschaftsgeschichtliche Urkunde“ bewertet. Diese Funktionen können den bereits genannten Funktionen nach BBodSchG gut zugeordnet werden. Zur Berechnung des Kompensationsbedarfs werden die Böden vor dem Eingriff bewertet, sowie die zu erwartende Bewertung nach dem Eingriff ermittelt. Aus der Differenz der Werte, multipliziert mit der Fläche des Eingriffs wird der Kompensationsbedarf (KB) in Hektarwerteinheiten (haWE) berechnet. Ebenso wird bei Kompensationsmaßnahmen der Wert der Fläche vor der Maßnahme sowie der zu erwartende Wert nach der Maßnahme ermittelt. Multipliziert mit der Fläche der Maßnahme, ergibt sich die Kompensationswirkung (KW), ebenfalls in haWE. KB und KW können nun gegeneinander aufgerechnet werden.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der recht universellen Anwendbarkeit. Werden die Böden strikt nach UM 1995 bewertet, ergeben sich durch die Berechnung von KB und KW klare und eindeutige Werte. So kann auf einfachem Wege festgestellt werden, ob eine Kompensationsmaßnahme tatsächlich die benötigte Wirkung hat. Insbesondere in Baden-Württemberg wurde erst mit der Veröffentlichung von UM 2006, bzw. mit den bereits zuvor in Behördenkreisen veröffentlichten Informationen, die Umsetzung der Eingriffsregelung für das Schutzgut Boden verstärkt vorangetrieben. So wurden zum Beispiel in Landkreis Ludwigsburg 2006 die ersten Oberbodenauffüllungen als Kompensationsmaßnahmen durchgeführt und anerkannt.

Die Möglichkeiten für Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen für das Schutzgut Boden beschränken sich auf eine überschaubare Auswahl an Maßnahmen:

- **Entsiegelung:**

Die Entsiegelung von Flächen gilt als wirkungsvollste Maßnahme zur Kompensation verlorener Bodenfunktionen. Wichtig ist hierbei, dass nicht nur die Versiegelung entfernt wird, sondern auch der Unterbau. Zudem müssen Schadverdichtungen

entfernt und eine vegetationstaugliche Bodenschicht aufgebracht werden, da eine solche bei Baumaßnahmen häufig entfernt wurde und wird (BfN 2000:141). Ein großes Problem bei Entsiegelungsmaßnahmen ist die Verfügbarkeit von geeigneten Flächen. Schon die Tatsache, dass es einen *Nettoverbrauch* von Flächen gibt, zeigt dieses Dilemma auf. Wo mehr Flächen neu in Anspruch genommen als Flächen aufgegeben werden, ist es naturgemäß schwierig, für alle neu versiegelte Flächen im gleichen Umfang Flächen zu entsiegeln.

- **Rekultivierung:**

Bei jüngeren Abbau- oder Auffüllprojekten ist die Bedingung üblich, dass nach Ende der Tätigkeiten wieder annähernd der Ausgangszustand hergestellt werden soll. Dies ist bzw. war bei älteren Projekten nicht der Fall, so dass die Rekultivierung solcher Flächen als Kompensationsmaßnahme herangezogen werden kann. Dabei gibt es jedoch Einschränkungen, denn zahlreiche ehemalige Steinbrüche, die nicht in den Ausgangszustand zurückversetzt wurden, bieten heute wichtige Lebensräume für Flora und Fauna. Solche oft unter Naturschutz stehenden Flächen dürfen daher nicht gestört werden. Auch die Rekultivierung von Altablagerungen bietet sich möglicherweise als Kompensationsmaßnahme an, sofern auf diesen im Rahmen der Altlastenbearbeitung kein weiterer Handlungsbedarf besteht (UM 2006:14f). Dies bedeutet, dass auf den Flächen keine Anhaltspunkte für das Vorliegen einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung vorliegen dürfen.

- **Tiefenlockerung:**

Durch Tiefenlockerung können Wasserhaushalt und Durchwurzelbarkeit deutlich verbessert werden. Allerdings kann auch die Tiefenlockerung nicht überall als Kompensationsmaßnahme eingesetzt werden. Auf landwirtschaftlichen Flächen erfordert es die „gute fachliche Praxis“ (BBodSchG §17) ohnehin, dass Verdichtungen vermieden werden müssen. Es bleiben Flächen wie ehemalige Baustelleneinrichtungen oder alte Auffüllungen und Deponieabdeckungen, die durch Tiefenlockerung verbessert werden können (UM 2006:16). Bei letzteren muss aber beachtet werden, dass die Schutzwirkung der Abdeckung hinsichtlich eines Schadstoffaustrags aus der Deponie durch eine Lockerung nicht beeinträchtigt werden darf.

- **Bewirtschaftungsänderungen:**

Durch schonende Bewirtschaftungsweisen wie die Minimalbodenbearbeitung können die mechanische Belastung des Bodens verringert und alle Bodenfunktionen

verbessert werden. Auch Erosionsschäden können so vermindert werden. Zahlreiche Maßnahmen fallen jedoch unter die „Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ und damit unter die Vorsorgepflicht gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen (§§ 7 und 17 BBodSchG). Daher ist der Einsatz schonender Bewirtschaftungsweisen nur in Ausnahmefällen als Kompensationsmaßnahme geeignet.

- **Wiedervernässen:**

Durch das Schließen von Drainagen können Moore renaturiert werden, allerdings nur, solange sie nicht zu stark degradiert sind. Im Rahmen von Gewässerrenaturierungen kann der durch vorherige Verbauungen abgesenkte Grundwasserspiegel in Auen angehoben werden. Die Wasserretention und damit der natürliche Hochwasserschutz würden profitieren (BfN 2000:141ff).

- **Dachbegrünung:**

Entsprechend ausgeführte Dachbegrünungen, also mindestens 10 cm mächtig und mit Oberbodenmaterial, können Bodenfunktionen aufweisen, da Wasser gespeichert wird und ein Standort für Pflanzen entsteht. Diese reichen zwar nicht an die Leistungsfähigkeit eines natürlichen Bodens heran, können aber einen Teil des Kompensationsbedarfes erfüllen. Nach UM (2006:16) werden Dachbegrünungen als Kompensationsmaßnahmen nur dann akzeptiert, wenn dabei Oberbodenmaterial verwendet wird.

- **Oberbodenauftrag:**

Oberbodenauftrag auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ist eine eher neue Idee, Kompensation für das Schutzgut Boden zu erreichen. In UM (2006:15) wird dies zum Ausgleich älterer Erosionsereignisse oder zur Verbesserung von Böden mit mittlerer oder geringer Leistungsfähigkeit vorgeschlagen. Wichtig ist hierbei der Aspekt der Verbesserung oder nachhaltigen Sicherung, der aber laut BBodSchV §12 (2) für Bodenauftragsmaßnahmen ohnehin gefordert ist. Dabei zeigt der Oberbodenauftrag als Kompensationsmaßnahme noch einige organisatorische Vorteile: Neben den Bauflächen, auf denen die auszugleichenden Eingriffe stattfinden, gehen der Landwirtschaft nicht noch zusätzliche Flächen für den Ausgleich verloren. Landwirte können durch eine Bodenverbesserung bessere Anbaubedingungen und Erträge erwarten, Bauherren müssen den bei ihren Vorhaben abgetragenen Oberboden nicht kostenintensiv auf Deponien entsorgen und leistungsfähiges Bo-

denmaterial bleibt dem Landschaftshaushalt erhalten. Zudem sei laut BLUME (2004:574) die Wiederverwendung von humosem Oberbodenmaterial generell gegeben und nach BauGB (§179) sogar vorgeschrieben. Die Idee scheint also vielversprechend zu sein, jedoch gibt es bislang nur wenige Studien, die die Wirksamkeit von Oberbodenauffüllungen zur Bodenverbesserung und damit die Eignung als Kompensationsmaßnahme belegen. Im Folgenden sollen dargestellt werden, in welchem Rahmen Bodenauffüllungen bislang durchgeführt wurden.

2.3 Praxis bei Auffüllmaßnahmen

Bodenauffüllungen sind an sich keine neuartige Maßnahme, sie werden schon seit langer Zeit durchgeführt. Landwirte erhoffen sich dadurch Bearbeitungserleichterungen auf schweren oder steinigen Böden, eine Lockerung von schweren, tonigen Böden durch das Einarbeiten von sandigem Bodenmaterial, oder aber einfach eine günstige „Entsorgung“ des Aushubs von eigenen Bauvorhaben.

Da die Bodenschätzung das einzige flächendeckend vorliegende Werk ist, das eine Bewertung von Böden beinhaltet, wird meist auf dieser Grundlage beurteilt, ob eine Auffüllung genehmigungsfähig ist. Grundsätzlich gelten Böden mit einer Bodenzahl von über 60 nicht mehr als verbesserungsfähig, da negative Begleiteffekte einer Auffüllung hier die positiven Auswirkungen kompensieren würden (LABO 2002:17+20). Zudem wird davon ausgegangen, dass Böden mit einer Bodenzahl von 20 oder weniger häufig besonders wertvolle Lebensräume darstellen und daher nicht für Auffüllungen in Frage kommen (LABO 2002:20). Wenn der Bodenauftrag geeignet ist eine Verbesserung von Bodenfunktionen zu bewirken, was im Regelfall nur bei Bodenzahlen zwischen 20 und 60 angenommen werden kann, kann er genehmigt werden. Möglich ist eine Genehmigung auch, wenn der Bodenauftrag die Bearbeitung der Fläche durch den Landwirt erleichtert, beispielsweise wenn der Steingehalt des Oberbodens verringert werden soll.

Zur Genehmigung und Durchführung von Oberbodenauffüllungen bestehen bereits einige Regelungen. Dazu gehört auf rechtlicher Seite der §12 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Diese Bestimmungen sind in der Vollzugshilfe zu §12 BBodSchV (LABO 2002) weitergehend erläutert. Weiterhin wird in beiden genannten Quellen auf DIN 19731 „Verwertung von Bodenmaterial“ verwiesen, diese bein-

hält die derzeit geforderten Standards bei Bodenauffüllungen. Ältere, in den Anforderungen aber grundsätzlich ähnliche Leitfäden wurden bereits 1991 und 1994 vom Umweltministerium Baden-Württemberg herausgegeben (UM 1991 und UM 1994). Dabei bezieht sich UM 1991 allgemein auf die „Erhaltung fruchtbaren und kultivierbaren Bodens bei Flächeninanspruchnahmen“ und gibt vor allem für Rekultivierungsmaßnahmen Vorgaben. Dagegen macht UM 1994 als „Leitfaden zum Schutz der Böden beim Auftrag von kultivierbarem Bodenaushub“ schon sehr detaillierte Angaben zur Vorgehensweise bei Oberbodenauftrag, die offensichtlich auch bei der Erstellung der genannten DIN 19731 berücksichtigt wurden.

Die wichtigste Anforderung an einen fachgerechten Oberbodenauftrag ist das Verschlechterungsverbot. In keinem Fall darf der Bodenauftrag negative Auswirkungen haben (LABO 2002:10). Mögliche Risiken sind laut DIN 19731 (S.3) Verdichtungen durch das Befahren mit großen Lasten, Schadstoffeintrag, nicht standortgerechter Nährstoffeintrag sowie die Nivellierung von extremen Standorteigenschaften. ÖPF (2006a:20) benennt zudem eine erhöhte Erosionsgefahr durch Oberflächenabfluss aufgrund der verminderten Infiltrationskapazität des Auftragsbodens. Die in DIN 19731 sowie in UM 1991 dargestellten Vorgaben sollen hier knapp wiedergegeben werden:

- **Eignung des Materials:** Der Gehalt an bodengefährdenden Stoffen muss unterhalb der für die vorgesehene Nutzung geltenden Grenzwerte liegen. Für einige Flächen, zum Beispiel Kinderspielplätze, Sportanlagen oder Klein- und Hausgärten oder Wasserschutzgebiete, sind von vornherein nur unbelastete Materialien zulässig. Die „Verdünnung“ von belastetem Material mit unbelastetem auf geringere Konzentrationen ist nicht erlaubt. Zudem werden auch Bodenart, Grobbodenanteil, Nährstoffgehalt und Humusgehalt betrachtet, so dass dadurch keine Verschlechterung entstehen kann.
- **Vermeidung von Verdichtungen:** Ein großflächiges Befahren der Fläche mit LKW ist nicht erlaubt. Falls die Verschiebewege des Auffüllmaterials über 20 m betragen, müssen provisorische Baustraßen eingerichtet und am Ende der Arbeiten zurückgebaut werden. Zum Verschieben sollen Kettenfahrzeuge mit geringem Anpressdruck (maximal 15 kPa) verwendet werden. Der Bodenauftrag und die Einebnung sollen möglichst in einem Arbeitsgang erfolgen, da ein schichtweiser Einbau mehrfache Überfahrten und eine erhöhte Verdichtungsgefahr verursacht. Die Bearbeitung sollte nur bei trockenen oder schwach feuchten Bedingungen (k_{01} oder

ko2, siehe BGR 2005:115) stattfinden, da die Tragfähigkeit des Bodens so am höchsten ist. Feuchte Bedingungen (ko3) gelten noch als tolerierbar.

- **Auftragsmächtigkeit:** Die Auftragsmächtigkeit soll maximal 20 cm betragen, da dies laut LABO (2002:11) noch in den vorhandenen Oberboden eingearbeitet werden kann. Zudem besteht beim Aufbringen von mächtigeren Schichten auf einen Oberboden die Gefahr, dass unter Sauerstoffmangel „vegetationsschädliche Stoffe“ entstehen (LABO 2002:11). Sollen mächtigere Schichten eingebaut werden, muss der vorhandene Oberboden abgeschoben und später wieder aufgebracht werden, was aber durch die mehrfache Befahrung der Fläche eine größere Verdichtungsgefahr und durch die häufigere Bodenumlagerung Gefügeschäden zur Folge hat.
- **Nachsorge:** Als Nachsorge verlangt §12 (9) BbodSchV, auf „die Sicherung oder den Aufbau eines stabilen Bodengefüges hinzuwirken. DIN 19731 (Ausgabe 5/98) ist zu beachten.“ Damit werden die dort geäußerten Vorgehensweisen zur Vorschrift. Demnach sollen durch den Bodenauftrag entstandene Verdichtungen und Vernässungen durch Lockerung beseitigt werden und zunächst mehrjährige, intensiv wurzelnde Pflanzen angebaut werden. Die Bewirtschaftung darf nur bei trockenem Boden erfolgen, gegebenenfalls kann eine Kalkung erfolgen. Hackfrüchte oder Mais, bei denen über eine vergleichsweise lange Zeit des Jahres relativ große Bodenflächen frei bleiben und die so die Erosion fördern könnten, sollen „möglichst“ nicht vor dem 6. Jahr nach dem Bodenauftrag angebaut werden.

Die entsprechenden Vorgaben sind üblicherweise Bestandteil der Genehmigungen von Auffüllungen, ob sie als Kompensationsmaßnahme anerkannt werden oder nicht. Häufig besteht jedoch das Problem der Kontrolle dieser Auflagen. Die Genehmigung einer Auffüllung sagt noch nicht aus, dass auch sofort aufgefüllt werden darf. Eine Baufreigabe kann erst erteilt werden, wenn der zuständigen Behörde die Herkunft des Bodens bekannt ist. Doch häufig wird dies unterlassen und dennoch wird aufgefüllt, da ja die Genehmigung vorliegt. Dies führt dazu, dass die Behörde nicht immer genau weiß, ob, wann oder wie genehmigte Auffüllungen nun tatsächlich durchgeführt wurden. Eine Kontrolle aller Auffüllungen ist oft schon aus personellen Gründen nicht möglich, eine Überwachung der Bauarbeiten aus den genannten Gründen erst recht nicht. Die Planung und Begleitung eines Vorhabens durch einen externen Sachverständigen ist bislang eher die Ausnahme als

die Regel. Dadurch könnte aber eine optimierte Durchführung sichergestellt werden, die sich auf das Endresultat positiv auswirkt.

Tatsächlich wird immer wieder – entgegen der Genehmigung – Unterbodenmaterial in der Auffüllung verarbeitet. Dies ist insofern nachvollziehbar, als dass bei Baumaßnahmen anfallendes Oberbodenmaterial auch zur Verfüllung des Arbeitsraumes oder zur Gestaltung eines Gartens verwendet werden kann. Das Unterbodenmaterial bleibt übrig und muss „entsorgt“ werden. Gelegentlich wird sogar gänzlich ungeeignetes Material wie Bauschutt oder Ähnliches im Aufbau der Auffüllung „entsorgt“ (vgl. LfU 2000b:80f). Außerdem ist das Vorgehen während des Bodenauftrags zu einem gewissen Teil von der Einsicht des Maschinenführers abhängig, da die geforderte Bearbeitung mit möglichst wenig Überfahrten nicht unbedingt dem ökonomischsten oder „bequemsten“ Vorgehen eines Baumaschinenführers entspricht. Auch die Anlieferung des Bodenmaterials per LKW – eigentlich sollte sie von Wegen oder provisorischen Baustraßen aus erfolgen – ist für das Bauunternehmen möglicherweise günstiger, wenn der LKW eine bequeme Schleife über die Fläche fährt. Selbst wenn dabei immer die selbe Spur verwendet wird, ist diese immer noch wesentlich länger als eine gerade angelegte Baustraße und bewirkt eine großflächige Bodenbelastung. Die Einrichtung dieser geraden und damit möglichst kurzen Baustraßen ist jedoch teurer.

Die tatsächliche Qualität von Geländeauffüllungen ist daher kaum bekannt, nur wenige Untersuchungen sind bislang dieser Frage nachgegangen, darunter „Erhebungsuntersuchungen zur Qualität von Geländeauffüllungen“ (LfU 2000b) für Auffüllungen in Baden-Württemberg sowie „Ergebnisse von Qualitätskontrollen bei Bodenrekultivierungen“ (FABO 2005) für Auffüllungen in einigen Kantonen der Schweiz. In LfU 2000b werden 13 Auffüllungen in Baden-Württemberg beschrieben und mit benachbarten Referenzstandorten verglichen. Die Auffüllungen sind unterschiedlich, es sind von vornherein genehmigte, aber auch ungenehmigte Auffüllungen darunter. Auch eventuelle fachtechnische Vorgaben wurden betrachtet, um diese mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu vergleichen. FABO 2005 bezieht sich teilweise auf LfU (2000b), bezieht aber noch weitere Auffüllungen in der Schweiz mit ein. Zu beachten ist bei diesen Untersuchungen jedoch, dass es sich selten um relativ geringmächtige (~20 cm) Oberbodenauffüllungen handelt, sondern meist um mächtigere Auffüllungen mit > 50 cm.

Eine echte Verbesserung kann laut FABO (2005:1) nur in 10 % der Fälle festgestellt werden, dagegen wird immerhin 60 % eine Verschlechterung bescheinigt. Das

Hauptproblem sind Verdichtungen (LfU 2000b:81), was dazu führt, dass in vielen Auffüllungen die physiologische Gründigkeit geringer ist, als in den Referenzprofilen. Auch das eingesetzte Bodenmaterial sei häufig ungeeignet gewesen. Dazu zählen nicht nur Bauschutt oder Ähnliches, der in der Auffüllung untergebracht wird, sondern auch zu hohe Grobbodenanteile oder unpassende Bodenarten. Abrupte Schichtwechsel zwischen sehr unterschiedlichen Bodenarten können einen sogenannten Kapillarsprung bewirken, der ein Hindernis für die Versickerung von Wasser darstellen kann. Ein Kapillarsprung entsteht zwischen Bodenschichten, die unterschiedliche Porengrößen aufweisen. Fließt Wasser von feinen Poren in Richtung gröberer Poren, kann das Wasser aufgrund des Kapillareffektes in den feineren Poren, die als Kapillaren wirken, zurückgehalten werden. Bei der Abdichtung von Deponien kann dieses Prinzip genutzt werden, um die Infiltration von Wasser in den Deponiekörper zu verhindern. Dazu wird zunächst eine möglichst grobe Kiesschicht aufgebracht, darauf eine feine Sandschicht. Eindringendes Wasser wird durch die Kapillarität im Sandkörper gehalten und fließt innerhalb des Sandkörpers seitlich ab.

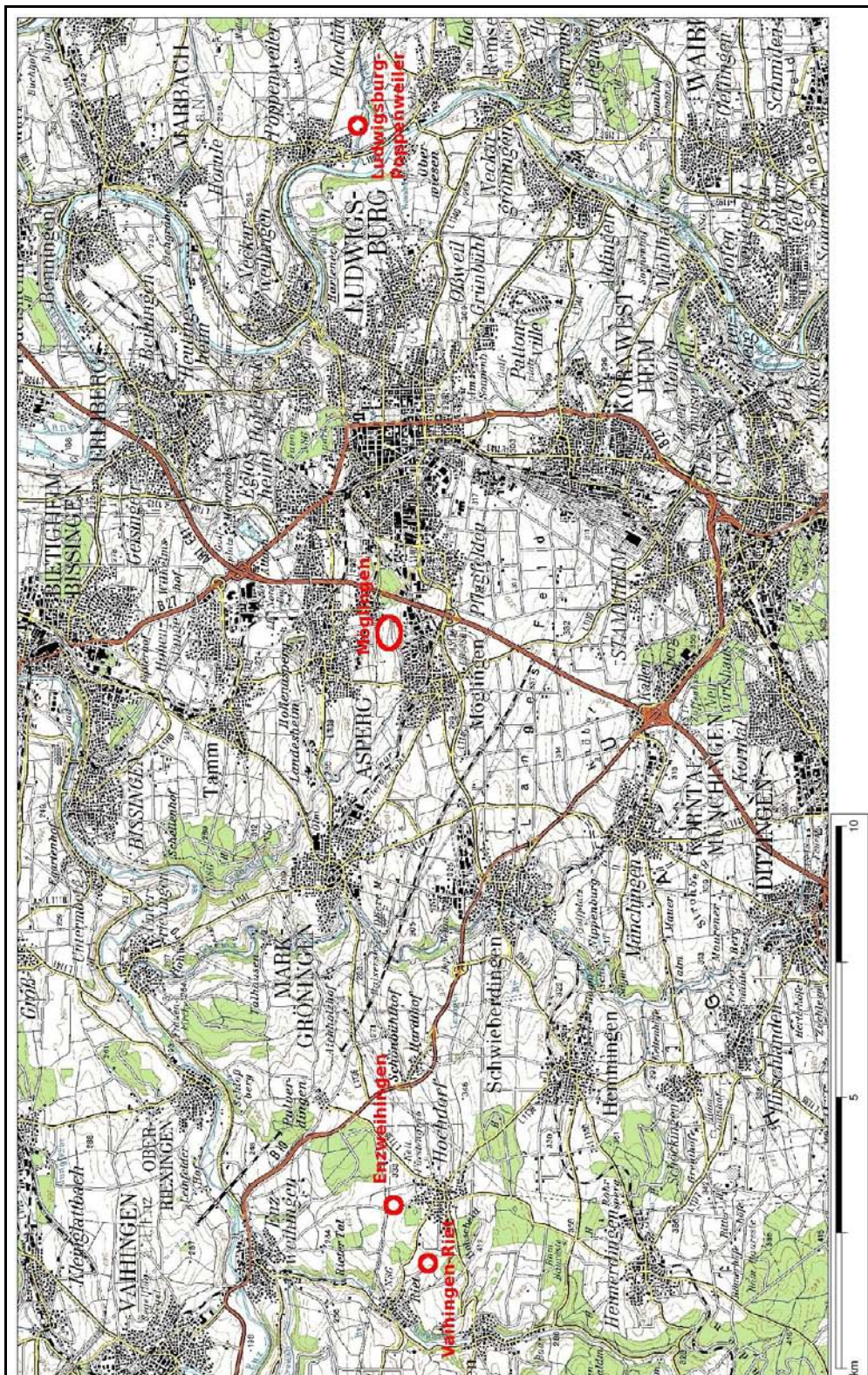


Abbildung 1: Übersichtskarte: Lage der Untersuchungsflächen. (Quelle: TK100 aus TOP25, Landesvermessungsamt, 2004)

3 Vorstellung der Untersuchungsflächen

3.1 Naturräumlicher Überblick

Die Untersuchungsflächen liegen in Möglingen, Vaihingen-Riet, Enzveihingen und Ludwigsburg-Poppenweiler im Landkreis Ludwigsburg (vgl. Abb. 1). Alle Flächen liegen im Neckarbecken, das durch schwach wellige bis hügelige Flächen charakterisiert ist. Diese liegen auf einer Höhenlage von meist etwa 250 bis 350 m und weisen bei einer Jahresmitteltemperatur von rund 9 °C einen Jahresniederschlag von knapp über 700 mm auf (DWD 2006 und 2007).

Der Untergrund ist auf der Schichtfläche des oberen Muschelkalk aufgebaut, die häufig noch von Mergel- und Tonsteinen des Lettenkeuper und des Gipskeuper überlagert ist. Im Pleistozän wurden teilweise mehrere Meter mächtige Lössdecken sedimentiert. In stärker zertalten Gegenden fehlt diese Lössdecke jedoch weitgehend (UM 2008b). Auf lösslehmbedeckten Flächen entwickelten sich häufig sehr fruchtbare Parabraunerden, teilweise auch Tschernosem-Parabraunerden. Die jahrtausendelange ackerbauliche Nutzung dieser Böden verursachte auch Erosion, weshalb zahlreiche Parabraunerden mittlerweile erodiert sind. Die jedoch überwiegend immer noch sehr guten Böden brachten der Gegend auch den Namen Strohgau ein. Wo weniger Löss ansteht, sind meist Pararendzinen, in tieferen Lagen auch Pelosole zu finden, die bezogen auf den Ackerbau weniger leistungsfähige Böden abgeben.

3.2 Auffüllfläche Bühl bei Möglingen

Die Untersuchungsfläche im Gewann Bühl gehört zur Gemeinde Möglingen. Sie liegt nordöstlich von Möglingen (Abb. 1), an der Grenze zu Asperg, direkt unterhalb des Kleinaspergle, einem keltischen Fürstengrabhügel. Die gesamte Fläche liegt im Landschaftsschutzgebiet „Oberes Leudelsbachtal“. In Tabelle 1 werden die wichtigsten Hintergründe zur Fläche genannt.

Tabelle 1: Kenndaten der Untersuchungsfläche Bühl bei Möglingen

Exposition und Relief	Die Fläche liegt auf dem schwach geneigten ($\sim 2,5^\circ$, aus Bodenkarte gemessen), südexponierten Hang eines West-Ost verlaufenden Rückens (siehe Abb. 3). Im Norden liegt die Fläche teilweise im Kulminationsbereich, im Süden bereits im Tiefenbereich des Leudelsbachtals. In Teilfläche C (vgl. Abb. 2) ist eine leichte Kuppe auszumachen, unterhalb in Teilfläche D eine schwache Muldenstruktur.
Gesteinsuntergrund	Der Rücken ist aus Gipskeuper aufgebaut. Im äußersten Südwesten der Fläche sowie im Osten ist eine Lössauflage zu erwarten Lössauflage. (GK)
Boden (vgl. Abb. 9)	Im <i>Norden</i> sowie im <i>Westen</i> der Untersuchungsfläche: mittlere bis tiefe Pararendzinen Im <i>Osten</i> und im <i>Zentrum</i> der Fläche: mittlere erodierte Parabraunerden Im <i>Süden</i> der Fläche, in der Nähe der Tiefenlinie liegend: mittlere kalkhaltige Kolluvien (nach BK 25, Blatt 7120)
Nutzung der Fläche	Die Fläche wird durch 9 Bewirtschafter auf teilweise nur wenige Meter breiten Schlägen ackerbaulich genutzt. (Abb. 2)
Flächengröße	4,3 ha Die Gesamtfläche der Auffüllung beträgt 5,9 ha, nach Absprache mit Landratsamt, Regierungspräsidium, ÖPF und Gemeinde Möglingen wurde eine westlich gelegene Teilfläche der Auffüllung nicht in die Untersuchungen miteinbezogen.

Abbildung 2:
Karte der Auffüllfläche
Bühl bei Möglingen
Lage von Profilen und Messplots



- Profile Auffüllfläche
- Profile Referenzflächen
- Profil Fahrweg
- ◆ Penetrologger Messplots
- Fahrwege (Änderungen)
- Fahrwege (Planung oepf 2006)
- Abgrenzung Bewirtschafter
- A Untersuchungsfläche mit Teilflächennummern
- Flurstücke mit Nummern

0 25 50 100 m

Maßstab: 1:1.500

Datum: 20.08.2008



Kartengrundlagen:
 LV BW (Orthophotos),
 ÖPF (Abgrenzungen, Fahrwege, Bewirtschafter),
 eigene Erhebungen

Diplomarbeit:
 Oberbodenauftrag als naturschutz-
 rechtliche Ausgleichsmaßnahme

Christoph Dengler
 Lauchheimer Weg 14
 71229 Leonberg

Kontakt:
 Mobil: 0178/1498126
 christoph.dengler@web.de

Die Auffüllung im Gewann Bühl ist mit 5,9 ha im Vergleich zu anderen Auffüllflächen (siehe 3.3) sehr groß. Sie soll als Ausgleichsmaßnahme für Eingriffe in das Schutzgut Boden in 2 Baugebieten in der Umgebung dienen. Die Baugebiete sind das Wohngebiet „Hasenkreuz“ im Westen von Möglingen sowie das Gewerbegebiet „Beim Bierkeller“ im Osten, zwischen der Autobahn A8 und der Stadtgrenze von Ludwigsburg. Beide Baugebiete sind mit Bodenzahlen zwischen 70 und 85 bewertet, es handelte sich bis zum Baubeginn um sehr leistungsfähige Ackerböden auf Löss. Die Bodenkarte (7120 Stuttgart-Nordwest) weist mittlere und mäßig tiefe, teilweise erodierte Parabraunerden aus. Das Ziel des Ausgleichs ist es, insbesondere die Funktion „natürliche Bodenfruchtbarkeit“ bzw. „Standort für landwirtschaftliche Nutzung“ zu sichern (ÖPF 2006a:13). Dazu wurde geplant, den bei der Erschließung anfallenden Oberboden auf die gemäß den Bodenzahlen geringerwertigen Böden (57 bis 59, in einem Bereich auch 47) im Gewann Bühl aufzutragen, um durch die Aufwertung dieser Böden den Ausgleich zu erhalten.



Abbildung 3: Auffüllfläche Bühl. Blick vom Kleinaspergle nach Südwesten. (DENGLER 2008)

Die Vorgaben an die Durchführung richteten sich nach den bereits erläuterten Vorgaben (vgl. 2.3). Vor Beginn der Arbeiten wurden der aktuelle Zustand der Flächen kartiert und Teilflächen mit hohem Bewuchs gemulcht. Aufgrund der großen Fläche wurden durch Abschieben des Oberbodens Baustraßen eingerichtet (Abb. 2), zum Teil als Erdwege, Hauptwege wurden zusätzlich mit Kalk stabilisiert. Auf diesen Baustraßen wur-

de das Bodenmaterial angefahren und von Raupen mit dem geforderten geringen Anpressdruck in die Fläche verschoben. Die Baustraßen wurden nach Beendigung der Arbeiten bis zu 50 cm tief gelockert und mit Oberbodenmaterial aufgefüllt, die gekalkte Schicht der Hauptzufahrtstraße über den östlichen Bereich der Auffüllung wurde ausgebaut. Nach den Baustellenprotokollen von ÖPF (2006b) wurden die Arbeiten nur bei geeignetem Feuchtezustand durchgeführt. Es fand eine nahezu tägliche Kontrolle der Arbeiten durch ÖPF statt. Dabei konnten mehrfach Probleme in der Ausführung erkannt und behoben werden. Eine erste Lockerung erfolgte auf der gesamten Fläche unmittelbar nach dem Bodenauftrag mittels eines 3-zinkigen, maximal 50 cm tief reichenden Aufreißers. Als Nachsorge wurde die Fläche über den Winter mit Strohhacksel bedeckt, um Erosion zu verhindern. Im nächsten Frühjahr wurde Luzerne ausgesät, die laut den Vorgaben 3 Jahre dort stehen soll. Im März 2008 war die gesamte Fläche mit Luzerne bebaut, im Mai 2008 stand die Luzerne ca. 70 cm hoch und wurde teilweise bereits gemäht. Es wurde den Landwirten offen gelassen, die Luzerne zu verwerten oder zu mulchen. Laut Herrn GÜTHLER machen die Landwirte von beiden Möglichkeiten Gebrauch (mündliche Mitteilung). Nach Ende des Anbaus von Luzerne soll weitere 2 Jahre auf den Anbau von Hackfrüchten oder Mais verzichtet werden.

3.3 Vergleichsflächen im Kreis Ludwigsburg

Zum Vergleich wurden drei weitere aufgefüllte Flächen im Kreis Ludwigsburg herangezogen (vgl. Abb. 1). Aufgrund der recht jungen Idee, Oberbodenauftrag als Ausgleichsmaßnahme zu genehmigen und der gerade bei älteren Flächen häufig nur spärlich vorhandenen Informationen, wann, wie und mit welchem Material aufgefüllt wurde, musste von dem Vorhaben, ältere, aber ähnliche Auffüllungen zu untersuchen, Abstand genommen werden. Daher wurden drei Flächen gewählt, die der Möglinger Fläche in Alter und Art ähneln und ebenfalls als Kompensationsmaßnahmen genehmigt wurden. Auch hier können die Bedingungen nur eingeschränkt verglichen werden, da die vorherrschenden Bodenarten sich zum Teil deutlich von der Möglinger Fläche unterscheiden. Da jedoch alle diese Flächen Mitte bis Ende 2006, also etwa zeitgleich mit der Möglinger Fläche, sowie mit den gleichen Auflagen aufgefüllt wurden und eine kurze Inspektion durch das Landratsamt eine überwiegende Einhaltung der Auflagen erkennen ließ, boten sie sich an.

3.3.1 Vaihingen-Riet

Die Vergleichsfläche Vaihingen-Riet (Abb. 4) liegt westlich von Hochdorf im Gewann Schnee. Tabelle 2 erläutert die wichtigsten Hintergründe. Die Auffüllung erstreckt sich nur über den nördlichen Teil des Flurstücks 684/2, da im südlichen, tiefer gelegenen Teil, Kolluvien mit Bodenzahlen von über 60 anzutreffen sind. Im aufgefüllten Teil war neben der Bodenverbesserung auch eine Bewirtschaftungserleichterung angestrebt worden.



Abbildung 4: Vergleichsfläche Vaihingen-Riet. (DENGLER 2008)

Die Genehmigung der Auffüllung mit 1000 m³ Oberbodenmaterial, also um knapp 0,2 m, erging bereits im Mai 2005. Im Oktober 2006 war die Fläche nach einer Ortsbegehung durch einen Mitarbeiter des Landratsamtes aufgefüllt und lückenhaft bewachsen. Im März 2008 war die Fläche mit Wintergetreide bestellt (Abb. 14).

Tabelle 2: Kenndaten der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet

Exposition und Relief	Die Fläche liegt westexponiert auf einem mittel geneigten Hang, der im weiteren Verlauf steiler wird. Die Untersuchungsfläche liegt überwiegend auf dem weniger geneigten Teilbereich.
Gesteinsuntergrund	Oberer Muschelkalk mit geringmächtiger Auflage aus Lösslehm.
Boden	braune Rendzina, untergeordnet Terra Fusca (nach BK 25, Blatt 7119)
Nutzung der Fläche	Die Fläche wird durch einen Bewirtschafter ackerbaulich genutzt.
Flächengröße	5100 m ²

3.3.2 Enzweihingen

Direkt nördlich von Hochdorf liegt die Vergleichsfläche Enzweihingen (Abb. 5). Die Auffüllung umfasst einen zentralen Teilbereich des Flurstückes 3404, der laut der Bodenschätzung unter anderem Tonböden mit Bodenzahlen von 33 aufweist. Eine Verbesserung der Bodenfunktionen war hier aufgrund des tonigen Bodens zu erwarten. Auf den Randbereichen des Flurstücks wurde eine Auffüllung wegen zu hoher Bodenzahlen nicht genehmigt. In Tabelle 3 werden einige Hintergründe zur Fläche aufgeführt.



Abbildung 5: Vergleichsfläche Enzweihingen. (DENGLE 2008)

Tabelle 3: Kenndaten der Vergleichsfläche Enzweihingen

Exposition und Relief	Die Fläche liegt in einer schwach nach Osten abfallenden, flachen Kuppenlage.
Gesteinsuntergrund	Löss oder Lösslehm auf Gesteinen des Unterkeuper.
Boden	mittlere bis tiefe erodierte Parabraunerden, in der Umgebung auch Pseudogleye (nach BK 25, Blatt 7119) Die Untersuchungen lassen hier eher auf einen pseudovergleyten Boden schließen, da ab ca. 80 cm sehr stark tonhaltige, graue Horizonte erbohrt wurden.
Nutzung der Fläche	Die Fläche wird durch einen Bewirtschafter ackerbaulich genutzt.
Flächengröße	5000 m ²

Nach Auskunft des Landratsamts erging die Genehmigung der Auffüllung am 07.09.2006, ausgeführt wurde die Auffüllung jedoch möglicherweise schon im Juli, spätestens im September 2006. Genehmigt wurde das Aufbringen von 1000 m³ Oberbodenmaterial in einer Mächtigkeit von 0,2 m. Im März 2008 war auf der Fläche Winterraps angebaut (Abb. 16).

3.3.3 Ludwigsburg-Poppenweiler

Die Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler (Abb. 6, Tabelle 4) liegt südlich von Ludwigsburg-Poppenweiler. Sieben der acht Flurstücke weisen Bodenzahlen von 61 auf und kommen daher eigentlich nicht mehr für eine Oberbodenauffüllung in Frage, dennoch wurde diese genehmigt, um eine Verbesserung der Bearbeitung der „vom Sandsteinuntergrund geprägt[en]“ Böden zu erreichen und den Wasserhaushalt zu verbessern (LRA 2006). Dem Antragsteller war es zudem wichtig die bei der Erschließung des Baugebiets anfallenden „beste[n] Böden“ für die Landwirtschaft zu retten.

Die Genehmigung für die Auffüllung mit 1800 m³ Oberbodenmaterial, also etwa 0,2 m, erging im Juni 2006, Ende Oktober 2006 war die Fläche noch nicht aufgefüllt. Laut einem der Bewirtschafter wurde die Fläche aber noch Ende 2006 aufgefüllt. Als Nachsor-

ge war hier, wie auch auf den anderen Flächen eine Lockerung sowie die Einsaat von tiefwurzelnden Pflanzen gefordert. Der südwestliche Teil der Auffüllung des einen Landwirts war im März 2008 mit Luzerne bebaut, der nordöstliche durch den anderen Landwirt bewirtschaftete Teil war gepflügt (Abb. 17).



Abbildung 6: Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler. Hinter dem mit Luzerne bewachsenen Feld ist noch vor der Baumreihe ein gepflühtes Feld zu erkennen, beide zusammen bilden die Auffüllfläche. (DENGLER 2008)

Tabelle 4: Kenndaten der Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler

Exposition und Relief	Die Fläche selbst ist sehr schwach nach Süden geneigt. Im Süden fällt das Gelände stärker geneigt, im Westen steil ins Zipfelbachtal ab.
Gesteinsuntergrund	geringmächtiger Lösslehm auf oberem Muschelkalk, im Norden auch auf sandig verwitterndem Trigonodusdolomit.
Boden	mittlere und mäßig tiefe erodierte Parabraunerden (nach BK 25, Blatt 7021)
Nutzung der Fläche	Die Fläche wird durch zwei Bewirtschafter ackerbaulich genutzt.
Flächengröße	9200 m ²

4 Methoden- und Untersuchungsplanung

Im Folgenden sollen die zur Untersuchung der Auffüllflächen eingesetzten Methoden und deren Einsatz erläutert werden. Dabei wurde die Auffüllfläche Bühl mit der Anlage von mehreren Schürfgruben und einem noch dichteren Netz von Penetrologger-Messplots detailliert untersucht. Auf den Vergleichsflächen wurde ein verringerter Aufwand, nur jeweils drei Penetrologgermessplots und drei Bohrstocksondierungen, betrieben.

4.1 Schürfgruben und Lagerungsdichtebestimmung

Schürfgruben bieten einen umfassenden Einblick in den Aufbau des Bodens. Das Profil wird nicht gestaucht oder zerdrückt, daher können bessere Aussagen beispielsweise zur Lagerungsdichte getroffen werden. Auch die Form und Ausprägung von Schichtgrenzen kann im Profil wesentlich besser beurteilt werden, als in einem Bohrstock. Allerdings muss dafür ein wesentlich höherer Aufwand in Kauf genommen werden, außerdem ist auf Flächen, die bereits bewirtschaftet werden, mit Ablehnung durch die Landwirte zu rechnen. Daher wurden auf den Vergleichsflächen keine Schürfgruben angelegt.

Im Bereich der Möglinger Fläche wurden insgesamt 19 Schürfgruben, davon 16 im Bereich der Auffüllung angelegt (Abb. 2). Da die Luzerne in erster Linie aus Gründen der Nachsorge und nicht zur Gewinnerwirtschaftung angebaut wird, stellte deren Beeinträchtigung an einzelnen Stellen kein Problem dar. Ein weiteres Profil sollte ebenfalls auf der Auffüllfläche, im Bereich einer ehemaligen Baustraße angelegt werden. Mittels GPS und Bohrstocksondierungen konnte eine solche Stelle gefunden werden. Dies sollte die Verhältnisse im Bereich einer Baustraße sichtbar machen und für die anderen Profile einen Vergleich ermöglichen. Die Lage der anderen Schürfgruben wurde im Vorhinein geplant und per GPS im Gelände verortet, um zum einen eine möglichst gleichmäßige Verteilung sicherzustellen und zum anderen möglichst nicht im Bereich von ehemaligen Baustraßen zu graben. Zum Vergleich mit den vor der Auffüllung anstehenden Böden wurden in der Nachbarschaft der Auffüllfläche 3 Referenzprofile erstellt. Der bewirtschaftende Landwirt, der selbst auch einige Flächen im Bereich der Auffüllung bewirtschaftet, stimmte

dem zu, da auf den Flächen ohnehin erst später im Jahr Mais angebaut werden sollte. Zum Zeitpunkt der Feldarbeiten waren diese Flächen gepflügt und vegetationsfrei.

Die Tiefe der Schürfgruben sollte zumindest den Auffüllhorizont und den alten A-Horizont möglichst vollständig erfassen. An einigen Stellen stellte sich die ehemalige Pflugsohle als Grabhindernis dar, so dass nur bis in den ehemaligen A-Horizont gegraben wurde. Die Breite der Profilwände lag bei ca. 60 bis 80 cm. Um die fotografische Dokumentation zu erleichtern, wurden alle Schürfgruben nach Süden hin geöffnet. Angesichts der während der Feldarbeiten herrschenden grellen Lichtverhältnisse stellte sich dies als vorteilhaft heraus.

In einigen Profilen wurden Stechzylinderproben (100 ml) zur Bestimmung der Trockenrohdichte im Labor entnommen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Anzahl von Stechzylindern konnten nur 2 Proben pro Profil und Tiefe entnommen werden, was eine gewisse Unsicherheit bei den Ergebnissen mit sich bringt. Die laut DIN ISO 11272 geforderte Probenanzahl je Tiefe wären 6 Proben. Im Labor wurden die Proben feucht gewogen, dann gut 48 h bei 105°C vollständig getrocknet und nochmals gewogen. Entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung (BGR 2005:125) wurde aus der Trockenrohdichte (ρ_t) und dem mittels Fingerprobe ermittelten Tongehalt in Masse-% (T) die effektive Lagerungsdichte (L_d) nach folgender Formel errechnet: $L_d = \rho_t + 0,009 \cdot T$. Nach LEBERT et al. (2004:8+32) kann die effektive Lagerungsdichte als Indikator für Bodenschadverdichtungen herangezogen werden, wobei insbesondere auch die feldbodenkundlichen Ergebnisse einfließen müssen. Als Schadensschwellenwerte dienen die Stufen 4 und 5 der Klassifikation nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (BGR 2005:25f), die Stufen zwischen 1 (sehr gering) und 5 (sehr hoch) vorsieht.

Tabelle 5: Daten der Profilaufnahmen.

	Horizontgrenzen	Bodenfarbe	Hydromorphie	Konsistenz	Gefügeform	Lagerungsart	Hohlräume	Lagerungsdichte	Durchwurzelung	Bodenart	Grobbodenanteil	Carbonatgehalt
Schürfgruben	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bohrstock	x	x	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x

4.2 Penetrologger

Die Messung des Eindringwiderstandes (EW) ist eine wenig zeitaufwändige Methode, Informationen zur Verdichtungssituation auf einer Fläche zu gewinnen (HARTGE 2004:303f). Es gibt mehrere Handpenetrometer für Bodenuntersuchungen auf dem Markt, aber nur wenige, die nicht nur den Eindringwiderstand, sondern auch die Tiefe messen und so eine genaue Tiefenlokalisierung von Befunden ermöglichen. Ein solches Gerät ist der Penetrologger (Abb. 7), den die Herstellerfirma Eijkelkamp freundlicherweise für diese Arbeit zur Verfügung stellte. Neben der Aufzeichnung von EW und Tiefe bis in 80 cm besitzt dieses Gerät auch einen GPS-Empfänger, so dass zu jedem Messpunkt automatisch



Abbildung 7: Bedienung des Penetrologger: Mithilfe der Libelle wird das Gerät senkrecht und mit gleichbleibender Geschwindigkeit von 2 cm/s in den Boden gedrückt. Dabei misst ein Ultraschallsensor den Abstand zur auf dem Boden liegenden Metallplatte, die der Reflektion der Ultraschallwellen dient, und hilft so, die Geschwindigkeit zu regulieren. Der optional per Kabel anzuschließende Feuchtesensor (linkes Bild, neben der Metallplatte) misst den volumetrischen Wassergehalt. Auf dem Display werden die gemessenen Werte numerisch oder grafisch (rechts) angezeigt, so dass schon im Feld eine erste Beurteilung möglich ist. Vor den Feldarbeiten ist jedoch das Erstellen eines Untersuchungsplanes notwendig, nach dem die einzelnen Messungen dann durchgeführt werden. Das Erstellen des Planes sowie die Beurteilung der Messergebnisse kann mithilfe beiliegender Software am PC erfolgen. (Fotos: links: DENGLER 2008; rechts: EBERLE 2008)

die Koordinaten gespeichert werden. Außerdem lässt sich ein Bodenfeuchtesensor anschließen. Die aufgezeichneten Daten können am Computer weiterverarbeitet werden. Für bodenkundliche Untersuchungen wird laut EIJKELKAMP (2007:24) meist ein Konus, also die Spitze der Sonde, mit einer Spitze von 60° und einer Bodenfläche von 1 cm^2 verwendet. Dieser hat einen größeren Durchmesser als die Sonde selbst, um die Reibung zwischen dieser und dem Boden zu vermindern.

Der Einsatz eines Penetrologger bei dieser Untersuchung soll helfen, die durch die Profile gewonnenen Erkenntnisse über den Aufbau des Bodens in der Fläche zu überprüfen. Außerdem soll herausgefunden werden, ob die Messung des Eindringwiderstands eine sinnvolle Möglichkeit darstellt, Oberbodenauffüllungen mit geringem Zeitaufwand zu überprüfen und zu beurteilen. Dazu war vorgesehen, bei jeder Schürfgrube einen Messplot bestehend aus 5 einzelnen Einstichen durchzuführen, sowie in den Räumen zwischen den Profilen weitere Messungen vorzunehmen. Insgesamt wurden auf der Auffüllfläche Bühl und bei den Referenzprofilen 33 Messplots zu je 5 Einstichen aufgenommen (Abb. 2), auf den Vergleichsflächen jeweils 3 Messplots zu je 5 Einstichen.

Es ist unbedingt notwendig, mehrere Einstiche je Messung durchzuführen, da die Bodeneigenschaften auch bei großer räumlicher Nähe stark voneinander abweichen können. Laut Herrn HOEFER (E-Mail-Auskunft), Universität Hannover, haben Penetrologgereinstiche eine geostatistische Reichweite von nur 1,25 m. Statistisch abgesicherte Rückschlüsse auf die Umgebung sind als nur bis in 1,25 m Entfernung möglich, bei größeren Entfernungen steigt die Unsicherheit stark an. Durch mehrere Einstiche in einem Umkreis von etwa einem Meter kann ein aussagekräftiger Wert ermittelt werden. Um mit der Handhabung vertraut zu werden und vergleichbare Messungen zu ermöglichen, wurden vor den eigentlichen Untersuchungen mehrere Probemessungen durchgeführt. Dabei erwiesen sich 5 Einstiche pro Plot als ausreichend genau.

4.3 Wurzeluntersuchung

Eine genauere Aussage bezüglich der Durchwurzelung als die Aufnahme an der Profilwand kann durch eine Untersuchung der Wurzeln getroffen werden. Dabei werden aus verschiedenen Tiefen Proben von einem bestimmten Volumen entnommen und daraus im Labor die Wurzeln freigewaschen. Zur Bestimmung der Trockendichte werden die-

se getrocknet und gewogen, die erhaltene Wurzelmasse je Volumeneinheit Boden kann eine Aussage über die Durchwurzelung zulassen. Zudem können die Wurzeln aufgrund ihrer Form beurteilt werden, zum Beispiel ob sie durchgehend gerade gewachsen sind oder auffällige Knicke oder Verzweigungen aufweisen. Letztere würden für eine Behinderung der Durchwurzelbarkeit sprechen, da die Wurzeln so versucht haben ein Hindernis zu umgehen.



Abbildung 8: Entnahme von Wurzelproben. Mit Hilfe von Messer und Spachtel werden anhand einer Form vorsichtig Quader herausmodelliert, die dann im Labor weiter untersucht werden.
(DENGLER 2008)

Es wurden ungestörte quaderförmige Proben (Abb. 8) von jeweils 700 ml aus 2 Profilen entnommen. Das Waschen der Wurzeln erfolgte in Anlehnung an ROWELL (1997:71). Dabei werden die Proben in Wasser zumindest über Nacht eingeweicht, dann gut umgerührt, so dass man eine klumpenfreie Suspension erhält. Nach kurzem Absetzen gröberer Teilchen gießt man den Überstand mit darin schwimmenden Wurzeln durch ein Sieb ab. Dieses Vorgehen wird mehrfach wiederholt. Der hohe Tongehalt in den untersuchten Proben verhinderte eine klumpenfreie Suspension, so dass die gröberen Klumpen unter einem Wasserstrahl aufgelöst wurden. Außerdem wurde an Stelle des empfohlenen 0,5 mm-Siebes ein 1 mm-Sieb verwendet, da sich so der Zeitaufwand beträchtlich minimieren ließ. Durch die Verwendung der gleichen Siebgröße in allen Proben ist eine Vergleichbarkeit dennoch gewährleistet.

Der Zeitaufwand ohne Einweichzeit wurde zunächst auf rund 10 bis 15 Minuten je Probe eingeschätzt, den Veröffentlichungen von BÖHM (1979:119) und ATKINSON & DAWSON (2000:464) folgend, die vergleichbare Vorgehensweisen beschreiben. Tatsächlich lag der Zeitaufwand je Probe im Labor bei rund 1,5 Stunden. Die geringe Probenanzahl, nicht zuletzt durch den sehr hohen Zeitaufwand bedingt, macht es schwierig, die Ergebnisse zu verallgemeinern. Dennoch bieten sie einen interessanten zusätzlichen Aspekt zur Beurteilung der Durchwurzelung.

4.4 Bohrstock

Sondierungen mit dem Pürckhauer-Bohrstock bieten eine schnelle und einfache Methode, ein Bodenprofil zu erhalten. Daten wie Bodenart, Farbe und Kalkgehalt können daraus sehr gut ermittelt werden, somit können auch Horizontgrenzen gut erkannt werden. Allerdings ist deren Tiefenlage schon etwas schwieriger zu ermitteln, da der Bohrkern im Bohrstock beim Einschlagen manchmal etwas gestaucht wird. In anderen Fällen kann der Bohrkern beim Ziehen des Bohrstocks reißen und scheint dann in größerer Tiefe zu liegen als er tatsächlich ist. Solche Vorkommnisse müssen beim Beurteilen des Bohrkerns erkannt und berücksichtigt werden. Die Lagerungsdichte kann nur teilweise aus dem Bohrkern abgeschätzt werden, hier bietet der Widerstand beim Einschlagen einen Anhaltspunkt. Dieser ist aber stark durch Faktoren wie Bodenfeuchte, Bodenart oder Grobbodengehalt beeinflusst (siehe oben). Auch zur Durchwurzelung und der Form von Horizontgrenzen lässt sich anhand des Bohrstockprofils keine Aussage treffen.

Der Bohrstock wurde auf der Fläche Bühl nur eingesetzt, um den Standort für eine Schürfgrube zu ermitteln. Auf den Vergleichsflächen wurde der Bohrstock an allen Penetrologger-Messplots eingesetzt, um hinsichtlich der Tiefenlage von Verdichtungerscheinungen Vergleichsmöglichkeiten mit dem Bodenaufbau zu haben.

5 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Untersuchungsergebnisse soll im Folgenden nach den einzelnen Untersuchungsflächen getrennt erfolgen, um die Übersicht besser zu wahren. Eine Wertung der Ergebnisse wird hier noch nicht vorgenommen, dies erfolgt in Kapitel 6.

Vorab muss noch eine wichtige Definition geklärt werden: Die **Pflugsohle** wird üblicherweise als ein künstlich verdichteter Horizont angesehen, der unterhalb der Pflugreichweite durch die Auflast der Maschinen entsteht. Dieser Horizont weist daher eine deutlich höhere Lagerungsdichte auf als der gepflügte Horizont, unterhalb der Pflugsohle nimmt die Lagerungsdichte aber wieder ab. Wenn unterhalb der Pflugreichweite die Lagerungsdichte zwar zunimmt, nach unten hin aber nicht weiter abnimmt, so liegt nach der gängigen Definition auch keine Pflugsohle vor. In dieser Arbeit soll der Begriff Pflugsohle aufgrund praktischer Erwägungen allgemein für den dichter gelagerten Ap-Horizont unterhalb der Pflugreichweite verwendet werden. Sofern eine Pflugsohle nach der üblichen, oben aufgeführten Definition vorliegt, soll von einer Pflugsohlenverdichtung gesprochen werden.

Weiterer Klärungsbedarf betrifft die **Bezeichnung der Horizonte**. In Anlehnung an L_{FU} (2000b) wurden Auffüllhorizonte nach GLA (1995:45f) mit jY bezeichnet. Dabei steht das j für „aufgeschüttet aus natürlichem Substrat“, das Y für „Horizont aus anthropogenem Auftrag“. Die früheren Ap-Horizonte wurden, ebenfalls in Anlehnung an L_{FU} (2000b), mit fAp bezeichnet. Allerdings befinden sich diese Horizonte in den vorliegenden Fällen nicht unterhalb des Wurzelraumes, wie in BGR (2005:108) beschrieben.

5.1 Ergebnisse auf der Fläche Bühl

Die bei Möglingen gelegene Auffüllfläche Bühl wurde nach der Planung und unter der Aufsicht eines Sachverständigenbüros durchgeführt. Ziel der Auffüllung war die Verbesserung der tonigen und teilweise stark erodierten Böden der an einem Hang gelegenen Flächen. Für die Arbeiten wurden zur Anlieferung des Oberbodenmaterials Baustraßen angelegt, um die Belastung durch LKWs auf der Fläche zu minimieren. Die Fläche selbst wurde nur von Raupen mit geringem Kettenanpressdruck befahren und nach der Auffüllung gelockert. Zur Nachsorge wurde Luzerne angesät. Auf dieser Fläche wurden im

Rahmen dieser Untersuchung mit mehreren Methoden Daten erhoben. Diese werden hier zunächst separat dargestellt. Insbesondere die Werte zum Eindringwiderstand sind ohne eine vergleichende Betrachtung des Profilaufbaus zunächst wenig aussagekräftig, weshalb solche Verknüpfungen, die allein dem Verständnis der Daten dienen, schon vorgenommen wurden.

Die Profile wurden jeweils mit dem Buchstaben der Teilfläche (siehe Abb. 2) sowie einer laufenden Nummer bezeichnet. Die in der direkten Umgebung gelegenen Referenzflächen wurden mit „REF“ sowie einer laufenden Nummer benannt. „TRA-01“ steht für das bewusst im Bereich eines während der Auffüllarbeiten angelegten Fahrwegs angelegte Profil.

5.1.1 Feldbefunde aus den Schürfgruben

In Tabelle 6 werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Schürfgruben auf der Auffüllfläche Bühl vorgestellt. Die Lage der Schürfgruben ist in Abb. 9 ersichtlich.

Tabelle 6: Befunde aus den Schürfgruben auf der Auffüllfläche Bühl.

Profil	Tiefe	Auffüll- mäch- tigkeit	Auffüllmaterial	organische Trenn- schicht	Wurzel- hindernis jY-fAp	sonstiges
A-01	64 cm	35 cm	Fe-Mn-Konkretionen	-	-	Ziegelreste in fAp
A-02	51 cm	30 cm	schwach grusig	-	-	
A-03	72 cm	26 cm	unauffällig	-	-	wenig Fe-Mn-Konkretionen in fAp
A-04	57 cm	25 cm	schwach grusig	x	x	Fe-Mn-Konkretionen in fAp
A-05	48 cm	25 cm	kalkhaltig	x	x	z.T. org. Trennschicht, z.T. gute Durchwurzelung bis in fAp
B-01	47 cm	27 cm	kalkhaltig	-	-	wenig Fe-Mn-Konkretionen in jY

Profil	Tiefe	Auffüll- mäch- tigkeit	Auffüllmaterial	organische Trenn- schicht	Wurzel- hindernis jY-fAp	sonstiges
B-02	47 cm	10 cm	kalkhaltig	-	-	1 gut gerundeter Stein (ca. 10 cm) in jY
B-03	43 cm	17 cm	kalkhaltig	-	-	Cv: Gipskeuper
B-04	42 cm	31 cm	schwach grusig, kalkhaltig	-	x	wenig Fe-Mn-Konkre- tionen in jY, fAp mit Gipskeupergrus und Ziegelresten, kalkhaltig
B-05	48 cm	38 cm	Fe-Mn-Konkretio- nen, kalkfrei	-	x	Fe-Mn-Konkretionen in jY, gelber Kalkgrus in fAp
C-01	52 cm	14 cm	schwach kalkhaltig und grusig	-	-	Cv: Gipskeuper
D-01	64 cm	52 cm	kalkhaltig	-	x	wenig Fe-Mn-Konkre- tionen in jY Profil ähnelt TRA-01
D-02	62 cm	23 cm	kalkhaltig	x	x	Fe-Mn-Konkretionen in allen Horizonten, fAp kalkhaltig
D-03	53 cm	24 cm	unauffällig	x	x	Fe-Mn-Konkretionen in allen Horizonten, Torf- rest und rostiger Nagel bei 45-50 cm
E-01	64 cm	31 cm	kalkhaltig	x	-	Fe-Mn-Konkretionen in fAp, Ziegelreste in fAp und M
TRA- 01	64 cm	56 cm	wenig Fe-Mn-Kon- kretionen, schwach grusig	-	x	Lage auf Baustraße, dicht gelagerter Unter- boden

Abbildung 9: Auffüllfläche Bühl: Bodenkundliche Daten und Ergebnisse

Auffülmächtigkeit nach EW

- ◇ nicht erkennbar
- ◇ 1 - 19 cm
- ◇ 20 - 29 cm
- ◇ 30 - 39 cm
- ◇ 40 - 45 cm
- ehemalige Pflugsohle
im Messplot erkennbar

Auffülmächtigkeit in Profilen

- 0 cm
- ⊗ 1 - 19 cm
- ⊗ 20 - 29 cm
- ⊗ 30 - 39 cm
- 40 - 56 cm
- organisches Material
zwischen jY und fAp

□ Bodenschätzung

LT 5 DV 47/49

Bodenkarte BK25:

- Pararendzina
- erodierte Parabraunerde
- Kolluvium
- Aufschüttung

0 25 50 100 m

Maßstab: 1:1.500

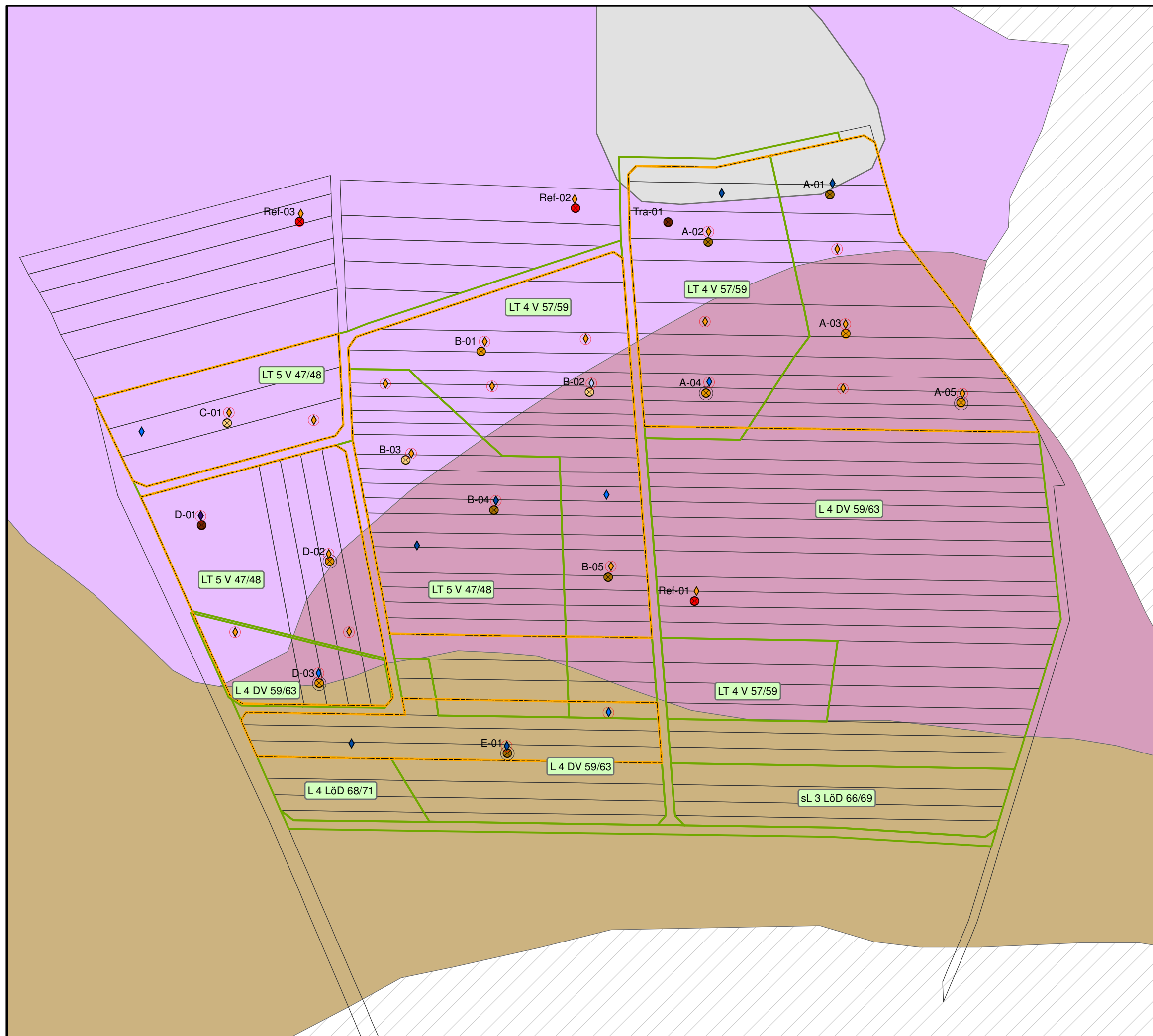
Datum: 20.08.2008

Kartengrundlagen:
LV BW (Orthophotos),
ÖPF (Abgrenzungen, Fahrwege, Bewirtschafter),
eigene Erhebungen

Diplomarbeit:
Oberbodenauftrag als naturschutz-
rechtliche Ausgleichsmaßnahme

Christoph Dengler
Lauchheimer Weg 14
71229 Leonberg

Kontakt:
Mobil: 0178/1498126
christoph.dengler@web.de



Die Profile lassen sich in räumlich getrennte Gruppen zusammenfassen. Im Norden der Teilfläche A finden sich vergleichsweise mächtige Auffüllungen, die aber gut durchwurzelt sind. Auch B-01 und B-02 können zu dieser Gruppe gerechnet werden, sie zeigen ebenfalls eine gute Durchwurzlung in den fAp hinein. Allerdings zeigen sie ein kalkhaltiges Auffüllmaterial. B-02 ist die geringmächtigste Auffüllung. A-03 kann ebenfalls in diese Gruppe gerechnet werden. Die Auffüllung ist gut mit dem fAp verbunden, nur an dem Farbunterschied kann ein Übergang ausgemacht werden. Die Luzernewurzeln reichen hier gerade gewachsen bis in über 70 cm Tiefe (Abb. 18).



Abbildung 10: Wurzelfilz am Übergang jY-fAp. Links im Profil A-05 ist der Übergang weniger scharf und stellt kein erkennbares Wurzelhindernis dar. (DENGLER 2008)

Im Süden der Teilfläche A weisen A-04 und A-05 (Abb. 10) scharfe Übergänge auf, die von unverrottetem organischem Material geprägt sind. Entlang dieser Kante verlaufen einige Wurzeln horizontal, sie stellt offensichtlich ein Durchwurzlungshindernis dar. Nach Westen hin, in der südlichen Teilfläche B ist zwar kein organisches Material im Übergang zu finden, dennoch deuten horizontal verlaufende Wurzeln ein Hindernis an. Der fAp-Horizont zeigt Gipskeupergrus und ist kalkhaltig.

B-03 und C-01 sind durch eine geringmächtige Auffüllung sowie ein insgesamt vergleichsweise flachgründiges Profil gekennzeichnet. Bei rund 40 cm steht Gipskeuper an, der ein undurchdringliches Durchwurzelungshindernis darstellt. Der fAp ist kalkhaltig und von Gipskeupergrus durchsetzt. Die Wurzeln reichen zahlreich bis in den fAp, wachsen aber häufig auch horizontal, was auf die Geringmächtigkeit des Profils zurückgeführt werden kann.

Im Süden der Auffüllfläche liegen D-03 und E-01 im Bereich des Kolluviums (Abb. 9). Der aufgefüllte Boden hebt sich farblich kaum von fAp ab, ist in beiden Fällen aber durch eine scharfe Kante mit organischem Material abgetrennt. Während in E-01 nur geringe Dichteunterschiede feststellbar waren und die Durchwurzelung bis in den fAp gleichmäßig gut war, stellen die organische Trennschicht sowie ein deutlicher Dichteunterschied in D-03 ein Wurzelhindernis dar.

TRA-01 sowie D-01 ähneln sich sehr. TRA-01 wurde absichtlich im Bereich einer ehemaligen Baustraße angelegt, während D-01 abseits von ehemaligen geplanten und dokumentierten Baustraßen liegt. Eine über 50 cm mächtige Auffüllung ist direkt einem B-Horizont aufgelagert, der vergleichsweise dicht gelagert scheint. Die Luzernewurzeln reichen nicht über die Auffüllung hinaus. D-01 scheint insgesamt etwas weniger dicht gelagert zu sein. Die Auffüllung in D-01 weist zudem eine Schichtung auf, nach der die oberen 16 cm durch einen etwas geringeren Ton- und Kalkgehalt gekennzeichnet sind.

Die oberen 5-10 cm des jY-Horizonts sind durchweg von einem Krümelgefüge geprägt, das nach unten hin häufig in ein teilweise sehr gut ausgeprägtes Polyedergefüge mit unterschiedlichen Aggregatgrößen übergeht. In einigen Profilen ist ein Kohärentgefüge anzutreffen. Der fAp-Horizont zeigt bei einer tendenziell dichteren Lagerung häufig Polyeder- oder Kohärentgefüge, in denen teilweise noch Überreste eines Bröckelgefüges von der früheren Bearbeitung erkennbar sind. Plattengefüge, das als Folge von mechanischer Verdichtung durch Befahrung auftreten kann, wurde nicht ge-



Abbildung 11: Wurzeln entlang von Rissen. In A-01 wurde dies im 35 cm mächtigen Auffüllhorizont in ca. 20 cm Tiefe fotografiert. (DENGLER 2008)

funden. Auch in den Pflugsohlen der Referenzprofile konnte kein Plattengefüge erkannt werden, diese waren als dicht gelagerte Kohärentgefüge anzusprechen. Bei gut ausgeprägten Polyedergefügen mit mittleren und gröberen Aggregaten in den oberen Horizonten war eine deutliche Durchwurzelung entlang von Rissen festzustellen (Abb. 11).

Die Referenzprofile in der direkten Umgebung ergaben ein relativ einheitliches Bild. Die oberen ca. 20 cm waren gepflügt, darunter folgte ein 5-10 cm mächtiger verdichteter Bereich im unteren Ap, der auf die Bearbeitung mit dem Pflug zurückzuführen ist. Es handelt sich allerdings nicht um eine Pflugsohlenverdichtung, da in diesem Fall die Lagerungsdichte unterhalb wieder abnehmen würde. Dies ist hier jedoch nicht der Fall. Die Kalkgehalte waren durchweg gering, im gepflügten Oberboden waren sie aber immer ein wenig höher als im verdichteten Oberboden und im B-Horizont.

5.1.2 Ergebnisse der Lagerungsdichtebestimmung im Labor

Aus insgesamt 7 Profilen wurden Stechzylinderproben zur Bestimmung der Lagerungsdichte entnommen, darunter 5 Profile auf der Auffüllfläche, das Profil im Bereich eines Fahrweges und ein Referenzprofil in der Umgebung. Die Beprobung fand in verschiedenen Tiefenlagen statt, meist eine Tiefe je Horizont. In Tabelle 7 sind die Tiefen und die Ergebnisse dargestellt. Die effektive Lagerungsdichte (L_d) ist in der Auffüllung meist als „mittel“ zu bewerten, in A-03 noch ein wenig geringer. Die fAp-Horizonte weisen dagegen durchweg hohe Lagerungsdichten auf, die grob mit dem Bereich der Pflugsohle im Referenzprofil übereinstimmen. Dass in allen Fällen exakt die alte Pflugsohle erfasst wurde ist unwahrscheinlich, da die Probennahme im Normalfall im oberen fAp erfolgte. In den ergrabenen B-Horizonten wurden die höchsten Werte ermittelt, wobei der Wert im Bereich der ehemaligen Baustraße eindeutig am höchsten ist. Möglicherweise sind hier Verdichtungen aufgrund der Bauarbeiten aufgetreten. In Tabelle 7 werden die genauen Werte tabellarisch aufgeführt, jeweils mit Profilnummer, Entnahmehorizont und Tiefenlage. Die rechnerisch ermittelten L_d -Werte liegen meist etwa eine Klasse über den im Profil abgeschätzten Werten.

Hinsichtlich der Identifikation von Schadverdichtungen birgt der aus Trockenrohdichte und Tongehalt errechnete Wert der effektiven Lagerungsdichte nach LEBERT et al. (2004:8) Probleme. Da die Datenbasis dieser Gleichung nicht aus Verwitterungs- oder Lössböden stammt und die Durchwurzelung und das Grobporensystem nicht berücksich-

tigt werden, kann zwar erkannt werden, ob ein dichtes Gefüge vorliegt, allerdings nicht, ob eine Schadverdichtung vorliegt.

Tabelle 7: Daten aus der Bestimmung der Trockenrohdichte im Labor. Es wurden jeweils 2 Stechzylinder pro Probe genommen und deren Werte gemittelt. Die Tiefenangaben beziehen sich auf die Oberkante des Stechzylinders. Die effektive Lagerungsdichte wurde nach KA5 errechnet (BGR 2005:125). Dabei gilt: $\text{Trockenrohdichte} + 0,009 \cdot \text{Tongehalt}$. Der Tongehalt wurde anhand der Fingerprobe abgeschätzt und jeweils der Mittelwert der für die Bodenart möglichen Spannweite des Tongehaltes zur Berechnung verwendet. Eventuelle kleine Abweichungen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

Profil	Horizont	Tiefe (cm)	Trockenrohdichte (g/cm ³)	Tongehalt %	eff. Lagerungsdichte	Klasse KA5
A-03	Y	2	1,41	14,5	1,54	Ld2
A-03	Y	16	1,46	14,5	1,59	Ld2
A-03	fAp	33	1,56	37,5	1,90	Ld4
A-03	B	56	1,52	55	2,02	Ld5
A-04	Y	9	1,50	21	1,69	Ld3
A-04	fAp	30	1,49	55	1,98	Ld4
B-03	Y	12	1,50	21	1,69	Ld3
B-03	fAp	29	1,45	55	1,94	Ld4
D-02	Y	12	1,51	14,5	1,64	Ld3
D-02	fAp	31	1,54	55	2,04	Ld5
E-01	Y	18	1,51	21	1,70	Ld3
E-01	fAp	37	1,51	37,5	1,85	Ld4
Tra-01	Y	3	1,45	21	1,64	Ld3
Tra-01	Y	34	1,43	21	1,62	Ld3
Tra-01	B	58	1,72	55	2,21	Ld5
Ref-02	Ap	13	1,33	37,5	1,66	Ld3
Ref-02	Ap	21	1,62	37,5	1,96	Ld4
Ref-02	B	42	1,61	55	2,10	Ld5

5.1.3 Ergebnisse der Eindringwiderstandsmessungen

Die Untersuchungen mit dem Penetrologger ergaben ebenso wie die Profilaufnahmen ein sehr differenziertes Bild von der Untersuchungsfläche. In Abb. 12 werden 4 unterschiedliche Messplots vorgestellt. Der Vergleich mit den Schürfgruben ist wichtig, um die Eindringwiderstandswerte einschätzen zu können, insbesondere hinsichtlich der Tiefenlage von Auffälligkeiten und im Vergleich mit Änderungen im Profilaufbau. An 7 von 15 Profilen konnte die Auffüllmächtigkeit anhand einer Änderung des Eindringwiderstands (durchweg ein Anstieg) ermittelt werden (Abb. 9). Nach einem Vergleich der nicht direkt bei einem Profil liegenden Messplots mit den jeweils umliegenden Profilen, wurde bei 6 dieser Messplots ein Anstieg des EW im Bereich des Übergangs von jY zu fAp angenommen.

Auf dieser Grundlage kann insbesondere im Süden der Fläche ein Bereich ausgewiesen werden, in dem sich die Auffüllmächtigkeit gut durch den EW abgrenzen lässt. Diese Gegend liegt im Bereich des Kolluviums um die Profile D-03 und E-01. Hier ist auch das Niveau einer ehemaligen Pflugsohlenverdichtung durch einen EW-Anstieg und darauf folgenden Rückgang gekennzeichnet, wenn auch nicht in allen Messplots sehr deutlich. Auf flachgründigen Standorten (um C-01, B-03) ist bei 30-35 cm ein Anstieg um rund 1 MPa zu verzeichnen, bei ca. 40 cm dann ein steiler Anstieg auf 4-5 MPa, wobei die Messungen abgebrochen werden mussten. In diesen Tiefen stehen nach den Profilen Gipskeupergesteine an.

Bei vielen Messplots (24 von 30 auf der Auffüllfläche, vgl. Abb. 9) ist in rund 40-55 cm Tiefe ein deutlicher Anstieg des EW um mindestens 0,5 MPa zu verzeichnen. Hier werden nahezu durchweg mindestens 2 MPa erreicht, meist mehr. In mehreren Fällen werden auch 3 und mehr MPa gemessen. Teilweise nehmen die Werte mit zunehmender Tiefe wieder ab um danach wieder anzusteigen. In geringerer Tiefe liegen die EW-Werte selten so hoch, sie schwanken meist zwischen 1 und 2 MPa, nur vereinzelt darunter.

Die Referenzmessungen in der Umgebung weisen alle eine Pflugsohle (vgl. 5) auf. Bei rund 20 cm erfolgte zwar ein abrupter Anstieg des EW innerhalb weniger cm von ~0,5 MPa auf ~2 MPa. Die exakte Tiefenlage dieser Pflugsohle variiert bei den einzelnen Messungen um bis zu 10 cm, was auf die große Oberflächenrauigkeit auf den gepflügten Flächen und damit unterschiedlich hoch gelegenen Bezugsflächen der Tiefenmessung (Lage der Metallplatte, siehe Abb. 7) zurückgeführt werden kann.

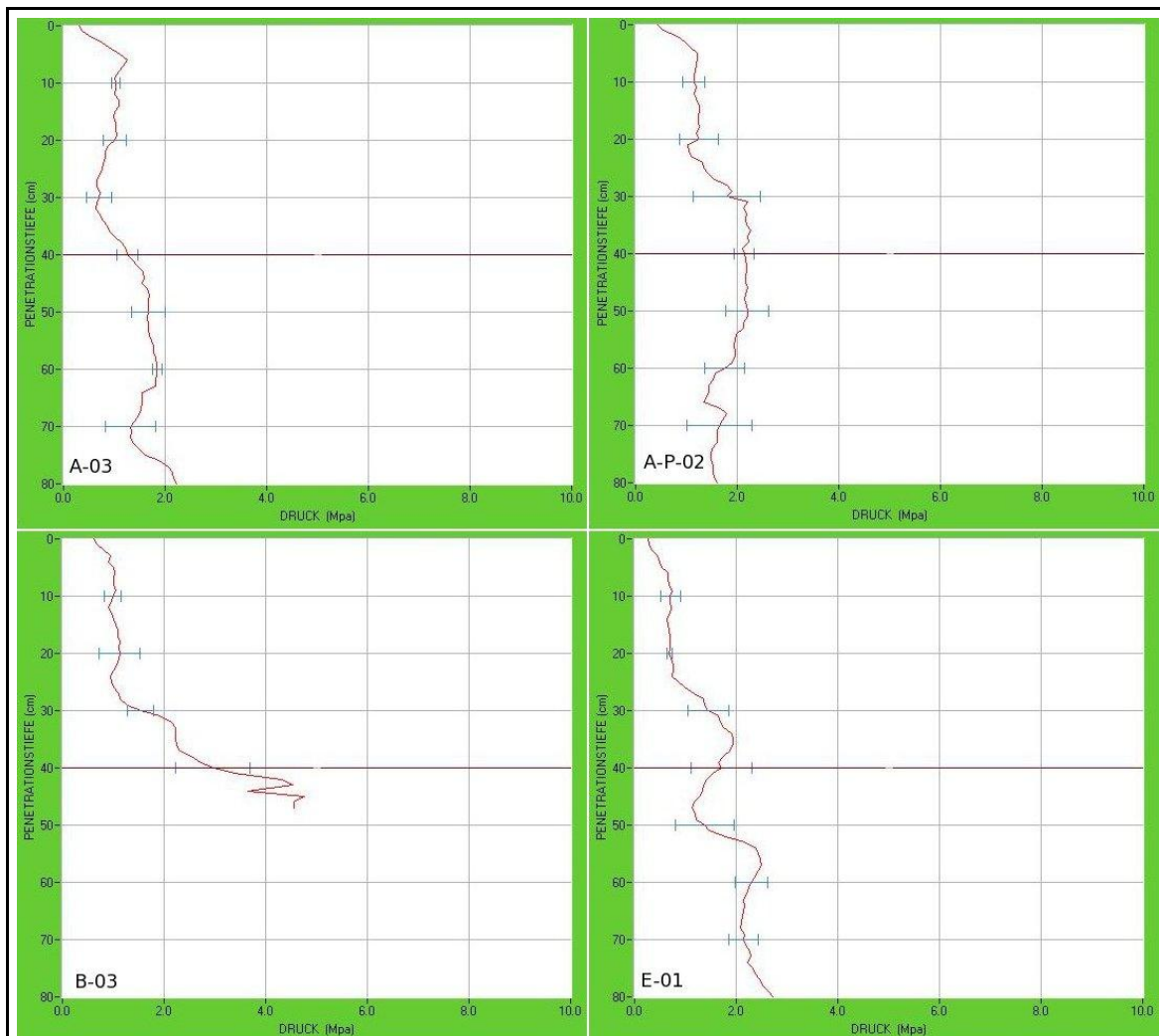


Abbildung 12: Verschiedene EW-Messkurven. Es werden jeweils die Mittelwerte der Messungen eines Messplots dargestellt, die waagerechten Balken stellen die Standardabweichung dar. Während der Anstieg in A-03 zwischen 35 und 45 cm auf die frühere Pflugsohle hindeutet (Auffüllmächtigkeit 23-30 cm), liegt der Anstieg in A-P-02 (nur EW-Messung, kein Profil) mit um 25 cm gerade im vermuteten Übergang zwischen jY und fAp. In B-03 liegt die Auffüllmächtigkeit nur bei rund 17 cm, der Anstieg bei ca. 31 cm deutet wieder auf die ehemalige Pflugsohle hin. Es stehen aber schon ab 37 cm die Gipskeupergesteine des Cv an, hier steigt der EW schnell an, bis eine tieferreichende Messung nicht mehr möglich ist. E-01 zeigt sowohl den Übergang von jY zu fAp bei 31 cm, als auch eine ehemalige Pflugsohlenverdichtung, die ca 20 cm tiefer liegt.

Die gemessenen Werte liegen noch unter den wenigen in der Literatur zu findenden Grenzwerten, oder zumindest nicht in den kritischen Bereichen. Zwei Quellen geben konkrete Grenzwerte für den EW an, die aber immer im Zusammenhang mit den Böden

betrachtet werden müssen. EHLERS (2000a:328f) berichtet vom Ap-Horizont gepflügter Löss-Parabraunerden, dass sich ein EW von ungefähr 3,6 MPa als Wachstumshindernis erwiesen habe, auf unbearbeiteten Flächen liege dieser Grenzwert bei etwa 4,9 MPa. FRIEDRICH et al. (2001:117+120f) sehen bei Untersuchungen auf Parabraunerden und Braunerden aus feinsandigen bis schluffigen Lehmen 1,8 MPa als Grenze an, wobei die Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa in bestimmten Tiefenbereichen den Verdichtungsgrad ergeben. Bei 2,3-2,8 MPa werden Wachstums- und Infiltrationsstörungen erwartet. Die höchste Kategorie ist „ $>3,3$ MPa“, allerdings wird nicht erläutert, welche Folgen zu erwarten sind. Dieser Wert passt jedoch zu den ca. 3,6 MPa, die EHLERS als Wachstumshindernis ansieht. Insgesamt bieten solche Angaben zwar Anhaltspunkte, aufgrund der Abhängigkeit der Messwerte von Bodenart und Feuchte aber keine allgemeine Gültigkeit (LEBERT et al. 2004:28f).

5.1.4 Wurzeluntersuchung

In den Profilen A-03 und A-04 wurden Proben zur genaueren Untersuchung der Durchwurzelung entnommen (siehe 4.3). Die Proben liegen jeweils im oberen Bereich der Auffüllung (A-03 1 und A-04 1), in der Auffüllung ganz knapp oberhalb des Übergangs zum fAp (A-03 2 und A-04 2) sowie im fAp knapp unterhalb des jY (A-03 3 und A-04 3). Die ermittelten Wurzeltrockenmassen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Trockenmassen der Wurzeluntersuchungen. Zum Vergleich wurde die Lagerungsdichte der entsprechenden Tiefenlagen mit angegeben. Die Abnahme entspricht der Abnahme der Wurzeltrockenmasse gegenüber der jeweils darüber liegenden Probe.

Probe	Tiefe	Wurzeltrockenmasse	Abnahme in %	eff. Lagerungsdichte
A-03 1	3-10,5cm	2,2208	-	1,54
A-03 2	20,5-28cm	0,1931	91,30	1,59
A-03 3	31-38,5cm	0,1141	40,91	1,90
A-04 1	7-14,5cm	1,1786	-	1,68
A-04 2	19-26,5cm	0,4042	65,71	-
A-04 3	30-37,5cm	0,1356	66,45	1,98



Abbildung 13: Gewaschene, frische Wurzeln der Profile A-03 (oben) und A-04 (unten). Links liegen die oberen Proben, rechts die unteren. Es ist gut erkennbar, dass die Wurzeln in A-04 deutlich verwinkelter sind als in A-03. (DENGLE 2008)

Die größte Wurzelmasse ist erwartungsgemäß in den oberen Bereichen zu finden, nach unten hin nimmt die Wurzelmasse schnell ab. Die Profile zeigen dabei aber deutliche Unterschiede. In A-03, einem Profil mit offensichtlich gutem Anschluss des jY an den fAp, ist die Abnahme nach den ersten cm sehr stark und schwächt sich über die Horizontgrenze hinweg noch deutlich ab. Dagegen ist in A-04, einem Profil mit scharfem, durch organisches Material gekennzeichnetem Übergang, die Abnahme in den oberen Bereichen geringer, dafür ist sie über die Horizontgrenze hinweg deutlich stärker als in A-03.

Die Betrachtung der Wurzeln selbst (Abb. 13) zeigt, dass diese in A-03 deutlich geradliniger gewachsen sind als in A-04, wo wesentlich häufiger Abzweigungen und Knicke im Wurzelverlauf zu erkennen sind. Dies bestätigt den Eindruck in den Schürfgruben, wo gerade in A-04 einige Wurzeln mit horizontalem Verlauf zu erkennen waren.

5.2 Ergebnisse auf den Vergleichsflächen

5.2.1 Vaihingen-Riet (VGL-A)

Die Vergleichsfläche Vaihingen-Riet (Abb. 14) liegt westlich von Hochdorf in einer leichten Hanglage. Informationen über Planung und Vorgehen bei den Auffüllarbeiten und dabei eingesetzte Maschinen sind nicht bekannt. Die Oberbodenauffüllung sollte eine Verbesserung der flachgründigen Böden und eine Bewirtschaftungserleichterung bewirken.

Tabelle 9: Ergebnisse der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet

Mess-plot	Auffüll-mächtigkeit	Auffüll-material	Verdichtung jY - fAp	Verdichtung in Pflugtiefe	Verdichtung alte Pflugtiefe	sonstiges
VGL-A1	25 cm	kalkhaltiger als fAp, gelbbraun	von ~2 auf ~3,5 MPa	von ~2 auf ~3,5 MPa, bei 25 cm	von ~3,5 MPa steigend, allerdings keine weitere Messung >45 cm möglich	jY z.T mit fAp vermischt, ab 55 cm deutlicher Grusanteil
VGL-A2	35 cm	kalkhaltiger als fAp, gelbbraun	-	von ~1,8 auf ~3,8 MPa, bei 20 cm	von 4 MPa ansteigend, allerdings keine weitere Messung >45 cm möglich	deutlicher Grusanteil ab 51 cm, stellenweise stark kalkhaltig
VGL-A3	20 cm	kalkhaltiger als fAp, braun	von ~1,5 auf ~2,3 MPa, bei ~23 cm	von ~1,5 auf ~2,3 MPa, bei ~23 cm	-	bei 60 cm Anstieg des EW auf ~4 MPa stark humoses Material bei 20-30 cm

In Tabelle 9 werden die Befunde dargestellt. Die Auffüllmächtigkeit liegt in VGL-A2 deutlich über den genehmigten 20 cm. Das Auffüllmaterial ist durchweg schluffiger und deutlich kalkhaltiger als das des fAp-Horizontes und meist deutlich gelblicher. Es ist als

lösshaltiges Unterbodenmaterial anzusehen. Das stark humose Material im fAp von VGL-A3 wurde wahrscheinlich ebenfalls anthropogen aufgebracht.

Die Eindringwiderstandswerte steigen in VGL-A1 und VGL-A2 früh auf hohe Werte von 3,5 und 3,8 Mpa. Nach den in 5.1.3 genannten Grenzwerten werden hier kritische Werte erreicht. Da die Verdichtungen durchweg ungefähr in Pflugtiefe eintreten, muss die Bearbeitung nach der Auffüllung oder aber eine mangelhafte Ausführung der Auffüllarbeiten dafür verantwortlich gemacht werden. In VGL-A1 und VGL-A3 decken sich Pflugtiefe und Übergang von jY zu fAp in etwa. Die Werte stiegen ab 45 cm, bzw. ab 60 cm in VGL-A3, stark an, so dass tiefere Messungen nicht mehr möglich waren. Diese Tiefen liegen in VGL-A1 und VGL-A2 noch im Bereich des fAp, in VGL-A3 schon im Cv-Horizonts.



Abbildung 14:
Karte der Vergleichsfläche Vaihingen-Riet

Legende

- Messpunkte mit Penetrologger und Bohrstock
- Auffüllfläche
- Anbau von Wintergetreide (März 2008)
- Flurstücke

0 25 50 100 Meter

Maßstab: 1:1.500

Datum: 20.08.2008

Kartengrundlage:
LV BW (Orthophotos),
LRA LB (Flurstücke und Abgrenzungen),
eigene Erhebungen



Diplomarbeit:
Oberbodenauftrag als naturschutz-
rechtliche Ausgleichsmaßnahme

Christoph Dengler
Lauchheimer Weg 14
71229 Leonberg

Kontakt:
Mobil: 0178/1498126
christoph.dengler@web.de

5.2.2 Enzweihingen (VGL-B)

Die Vergleichsfläche Enzweihingen (Abb. 16) liegt nördlich von Hochdorf und weist erodierte und tonige Böden auf, die durch die Oberbodenauffüllung verbessert werden sollten. Wie schon in Vaihingen-Riet ist über die genaue Durchführung der Arbeiten nichts bekannt. Diese wurden ohne Fachplanung alleine von Landwirt und Bauunternehmen durchgeführt.



Abbildung 15: Geländestufe am Rand der Auffüllung Enzweihingen. Im Vordergrund zwischen den Hochspannungsmasten kann der Niveauunterschied im Feld erkannt werden (rote Linie). (DENGLER 2008)

Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen, dass die Auffüllmächtigkeit überall deutlich zu hoch ist. Dies ist auch an einer deutlichen Geländestufe am Rand der Auffüllung (Abb. 15) gut zu erkennen. Eine Auffüllung mit den genehmigten 20 cm würde sich in Gelände kaum abzeichnen. Beim Auffüllmaterial handelt es sich um Oberbodenmaterial, das auf einem verdichteten fAp aufliegt und durch die Bearbeitung nach der Auffüllung und eine möglicherweise mangelhafte Durchführung der Auffüllarbeiten selbst Verdichtungen aufweist. In VGL-B1 und VGL-B3 reichen die Werte des Eindringwiderstands nach den in 5.1.3 genannten Werten am Übergang von jY nach fAp in kritische Bereiche. Schon innerhalb des jY werden mit 2,5 und 3 MPa vergleichsweise hohe Werte erreicht. Der graue, steif-plastische Ton in VGL-B2 wurde bei einer Probebohrung auch in der Nähe von VGL-

B1, in etwa 80 cm Tiefe angetroffen. Wahrscheinlich handelt es sich um verwitterte Gesteine des unteren Keuper. Dagegen wurde in VGL-B3 Dolomitstein angetroffen.

Tabelle 10: Ergebnisse der Vergleichsfläche Enzweihingen

Mess-plot	Auffüll-mächtigkeit	Auffüll-material	Verdichtung jY - fAp	Verdichtung in Pflugtiefe	Verdichtung alte Pflugtiefe	sonstiges
VGL-B1	50 cm	geringer Kalkgehalt, braun	von ~2,5 auf >4 MPa	von ~1 auf ~2,5 MPa, bei 22 cm	- könnte sich mit Verdichtung jY-fAp decken	Kernverlust ab ~50 cm
VGL-B2	39 cm	mäßiger Kalkgehalt, wie fAp, braun	von ~1,5 auf >2,5 MPa	-	2 Messungen deuten einen Anstieg ab 55 cm an	grauer Ton ab 57 cm, mit kalkhaltigem gelblichem Grobsand. abnehmender EW im Ton in 3 Messungen
VGL-B3	46 cm	mäßiger Kalkgehalt, wie fAp, braun	ab ~40 cm bei >3 MPa keine Messungen mehr möglich	von ~1,5 auf ~3 MPa, bei ~25 cm	-	ab 63 cm gelblicher Dolomitgestein

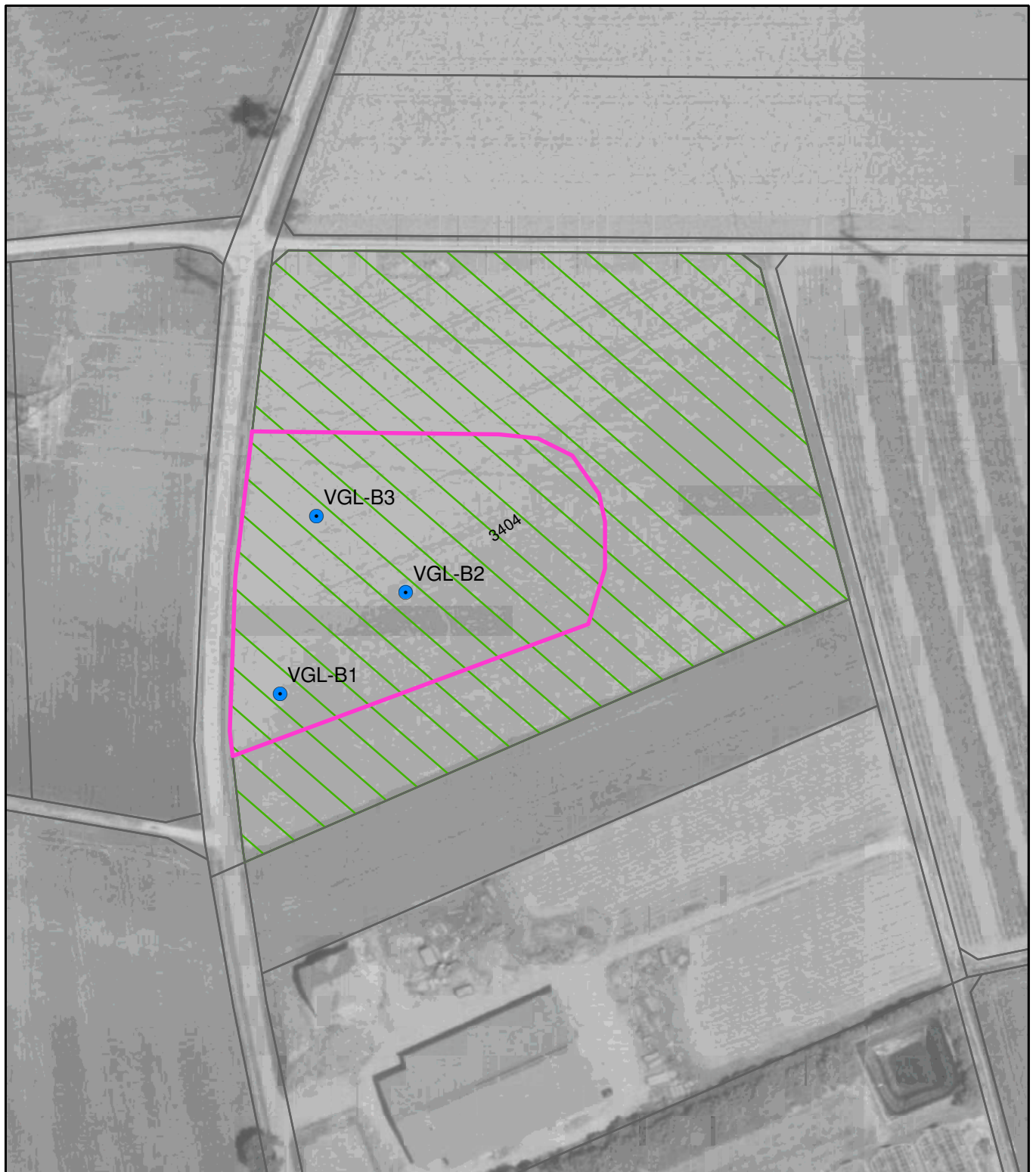


Abbildung 16:
Karte der Vergleichsfläche Enzweihingen

Legende

- Messpunkte mit Penetrologger und Bohrstock
- Auffüllfläche
- Anbau von Winterripps (März 2008)
- Flurstücke

0 25 50 100 Meter

Maßstab: 1:1.500

Datum: 20.08.2008

Kartengrundlage:
LV BW (Orthophotos),
LRA LB (Flurstücke und Abgrenzungen),
eigene Erhebungen



Diplomarbeit:

**Oberbodenauftrag als naturschutz-
rechtliche Ausgleichsmaßnahme**

Christoph Dengler
Lauchheimer Weg 14
71229 Leonberg

Kontakt:
Mobil: 0178/1498126
christoph.dengler@web.de

5.2.3 Ludwigsburg-Poppenweiler (VGL-C)

Auf der südlich von Ludwigsburg-Poppenweiler gelegenen Vergleichsfläche mit ihren steinigen, schnell austrocknenden Äckern sollte durch den Oberbodenauftrag eine Bearbeitungsverbesserung sowie eine Verbesserung des Wasserhaushaltes erzielt werden. Wie auch in Vaihingen-Riet und Enzweihingen ist nicht bekannt, wie die Auffüllung genau durchgeführt wurde. Die beiden Bewirtschafter gehen bezüglich der Nachsorge getrennte Wege. Der westliche Teil wurde nach Aussagen des Bewirtschafters nach der Auffüllung umgehend gelockert und mit Luzerne bebaut. Auf dem östlichen Teil wurde keine Luzerne angebaut und war zum Untersuchungszeitpunkt gepflügt (Abb. 17).

Tabelle 11 zeigt die in Ludwigsburg-Poppenweiler aufgenommenen Werte. Die Auffüllmächtigkeit ist, abgesehen von VGL-C2, zu hoch. Das hellbraune bis gelbbraune schluffige Auffüllmaterial ist durchweg kalkhaltiger als der fAp-Horizont, der selbst einen deutlichen Kalkgehalt aufweist. Vermutlich wurde Unterbodenmaterial aufgefüllt. In VGL-C2 wurden jY und fAp grob vermischt, an der Oberfläche sind rund 15 cm Auffüllmaterial zu finden, in ca. 40 cm Tiefe weitere 5 cm. In VGL-C3 reicht die Auffüllung scharf abgegrenzt bis in 46 cm Tiefe und weist nur einzelne fAp-Brocken auf. Der Bewirtschafter dieser Teilfläche gab an, die Fläche nach der Auffüllung tiefgründig gelockert zu haben. VGL-C1 liegt auf der gepflügten Teilfläche. Die Auffüllung ist hier einige cm mächtiger als die Pflugreichweite. Die Werte des Eindringwiderstand steigen in VGL-C1 weniger stark an als in den anderen Profilen. 3 MPa werden erst in 45 cm Tiefe erreicht, wohingegen in VGL-C2 und VGL-C3 schon in unter 20 cm 3MPa erreicht werden. Die mit Luzerne bebaute Fläche wurde davor vermutlich gepflügt, was die starken Verdichtungen innerhalb der Auffüllung erklären würde.

Tabelle 11: Ergebnisse der Vergleichsfläche Ludwigsburg-Poppenweiler

Mess-plot	Auffüll-mächtigkeit	Auffüll-material	Verdichtung jY - fAp	Verdichtung in Pflugtiefe	Verdichtung alte Pflugtiefe	sonstiges
VGL-C1	30 cm	leicht erhöhter Kalkgehalt zu fAp, gelbbraun	-	von ~1 auf ~2 MPa, bei 25 cm	von ~2 auf ~3 MPa, bei 45 cm	viele Steine in jY (Muschelkalkschotter), gepflügt
VGL-C2	20 cm	leicht erhöhter Kalkgehalt zu fAp, hellbraun	-	von ~1,2 auf ~3 MPa, bei 18 cm	- leichter Rückgang der EW-Werte ab 45 cm	jY mit fAp grob vermischt, Gesamtmächtigkeit Auffüllmaterial ~20 cm
VGL-C3	46 cm	leicht erhöhter Kalkgehalt zu fAp, hellbraun	- leichter Rückgang der EW-Werte ab 30 cm	von ~1 auf ~3 MPa, bei rund 17 cm	-	ab 40 cm häufiger Steine



Abbildung 17:
Karte der Vergleichsfläche
Ludwigsburg-Poppenweiler

Legende

- Messpunkte mit Penetrologger und Bohrstock
- Auffüllfläche
- Anbau von Luzerne (März 2008)
- gepflügt (März 2008)
- Flurstücke

0 25 50 100 Meter

Maßstab: 1:1.500

Datum: 20.08.2008

Kartengrundlage:
 LV BW (Orthophotos),
 LRA LB (Flurstücke und Abgrenzungen),
 eigene Erhebungen



Diplomarbeit:
 Oberbodenauftrag als naturschutz-
 rechtliche Ausgleichsmaßnahme

Christoph Dengler
 Lauchheimer Weg 14
 71229 Leonberg

Kontakt:
 Mobil: 0178/1498126
 christoph.dengler@web.de

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Beurteilung der Auffüllung Bühl und Vergleich mit anderen Flächen

Die Profile auf der Fläche Bühl, aber auch auf den Vergleichsflächen, zeigen eine große Vielfalt an Möglichkeiten, wie der Bodenaufbau nach einer Oberbodenauffüllung von genehmigten 20 cm aussehen kann. Dabei reicht die Spannweite von flachgründigen Auffüllungen auf ohnehin flachgründigen Böden mit guter Durchwurzelung bis an den Cv-Horizont über wenig zu mächtige Auffüllungen mit leichten Verdichtungserscheinungen an der ehemaligen Oberfläche bis hin zu deutlich zu mächtigen Auffüllungen mit Verdichtungserscheinungen innerhalb der Auffüllung oder Auffüllungen, bei denen eindeutig Unterbodenmaterial verwendet worden war.



Abbildung 18: Beispielprofile für eine gelungene Oberbodenauffüllung. Im Profil B-03 wurde auf einen geringmächtigen Boden ca. 12-21 cm Oberboden aufgebracht. Im Profil sind keine Dichteunterschiede im Bereich des Übergangs erkennbar, die Durchwurzelung reicht gleichmäßig bis an den Cv-Horizont. C-01 sieht sehr ähnlich aus. In A-03 wurden 23-30 cm Oberboden auf ein mächtigeres Bodenprofil aufgebracht. Auch hier sind keinerlei Verdichtungen in der Auffüllung oder im Übergang zu erkennen. Die Luzernewurzeln sind gerade gewachsen und reichen bis über 75 cm hinab. (Fotos: DENGLER 2008, ganz rechts: JAENSCH 2008)

Mehrere Beispiele, wie eine Oberbodenauffüllung funktionieren kann und nach den Vorgaben der Behörden und Planer auch funktionieren soll, konnten auf der Fläche Bühl betrachtet werden (Abb. 18). Als Anzeichen für eine gute Verbindung von Auftrags-

boden mit dem gewachsenen Boden können mehrere Faktoren herangezogen werden. Übergänge, die keine scharfe Kante zeigen, nicht von organischem Material geprägt sind, eine unscharfe Horizontgrenze sowie keinen Dichtesprung aufweisen sind ein guter Hinweis auf eine gute Verbindung. Des Weiteren zeigt auch eine über Horizontgrenzen hinweg hindernisfreie Durchwurzelung das Zusammenwachsen der Horizonte an. Die Luzerne ist aufgrund ihrer tief reichenden Wurzeln prädestiniert, hier zu Lockerungszwecken zum Einsatz zu kommen. Gerade in A-03 (Abb. 18, rechts) zeigt sich, dass dieses seit längerem übliche Nachsorgeverfahren tatsächlich Erfolg versprechend ist.

Auch in Profilen, die entlang einer Horizontgrenze Durchwurzelungshindernisse aufweisen, beispielsweise A-05 (Abb. 10), reichen die Luzernewurzeln teilweise schon darüber hinaus, was auch von den Wurzeluntersuchungen in A-04 bestätigt wurde (vgl. 5.1.4). Ein Rückgang der Durchwurzelungsintensität nach unten hin ist aber ohnehin zu erwarten, was es erschwert, diesen Rückgang als diagnostisches Merkmal für ein Durchwurzelungshindernis heranzuziehen. Dazu müsste zunächst eine „normale“ Verteilung der Wurzeln im Profil ermittelt werden, da diese stark von den Pflanzen und dem Boden abhängig ist. Die durchgeführten Wurzeluntersuchungen können diesen Anspruch nicht erfüllen und bieten deshalb nur zusätzliche Hinweise. Die Aufnahme der Durchwurzelungsintensität in der Profilwand bietet aber einen ausreichenden Anhaltspunkt. Dabei muss beachtet werden, dass die Luzerne in Reihen gesät wurde. Wenn die Profilwand nun direkt in der Saatreihe zu liegen kommt, kann ein Bild wie in Abb. 18 rechts aufgenommen werden. Die Profilaufnahmen erfolgten jedoch bei Profilwandlagen zwischen den Saatreihen. Im Zweifel konnte in den seitlichen, quer zu den Saatreihen verlaufenden Wänden, ein zweiter Eindruck gewonnen werden.

Ein im September 2007 gegrabenes Profil (Abb. 19) zeigte nicht nur die mit 35 cm im Vergleich zu den genehmigten 20 cm deutlich zu hohe Auftragsmächtigkeit, sondern auch auffällig verdichtete und scharf voneinander abgegrenzte Auftrags- und alte Ap-Horizonte, ein Wurzelwachstum, das nur entlang von Rissen stattfand und sogar einen Wurzelfilz entlang der Horizontgrenze. Von einer Verzahnung der Horizonte kann hier nicht gesprochen werden. Vorab waren im Juni 2007 bei einer flacheren Grabung ebenfalls Verdichtungsmerkmale mit Luftmangel und Rostflecken aufgefallen. Diese Befunde sprachen gegen eine erfolgreiche Auffüllung. Es muss aber bedacht werden, dass diese nur auf einer kleinen, in Gemeindeeigentum befindlichen Teilfläche durchgeführt wurden. Da zudem nicht klar war, ob sich diese Stelle im Bereich einer Baustraße befand, konnte keine repräsentative Aussage über die gesamte Auffüllfläche abgeleitet werden. Von die-

sem Profil standen für diese Arbeit Fotos und mündliche Mitteilungen von Herrn KÖSEL, Herrn JAENSCH und Herrn GÜTHLER zur Verfügung.

Ein Wurzelfilz, wie er im Profil vom September 2007 zu sehen war, konnte auf der Untersuchungsfläche nur an einer Stelle in A-05 (Abb. 10) gefunden werden. Meist waren im entsprechenden Tiefenniveau einige Wurzeln horizontal abgelenkt, während sich weitere Wurzeln nach unten hin ausbreiteten. Ein sicherer Zusammenhang zwischen diesen im Profil erkennbaren Durchwurzelungshindernissen und im Eindringwiderstand erkennbaren Übergängen jY-fAp konnte nicht festgestellt werden. In E-01 konnte bei einem deutlichen EW-Anstieg (siehe Abb. 12) zwischen jY und fAp in der Durchwurzelung kein Unterschied ausgemacht werden, der von einer



Abbildung 19: Profil vom September 2007. Erkennbar sind der scharfe Übergang jY-fAp mit Wurzelfilz und die dicht gelagerten jY- und Ap-Horizonte. (KÖSEL 2007)

höheren Lagerungsdichte hätte abhängig gemacht werden können. In mehreren Fällen wurden entweder ohne EW-Anstieg eine starke Verringerung der Durchwurzelungsintensität gefunden, oder aber bei deutlichem EW-Anstieg keine entsprechend starke Verringerung der Durchwurzelungsintensität.

Ein von unverrottetem organischem Material geprägter Übergang, der sich im Profil als scharfe Kante (Abb. 20) zeigt, ist eher als Wurzelhindernis zu betrachten als die angetroffenen fAp-Verdichtungen. A-04, D-02, D-03 sowie ein Teilbereich von A-05 können so gesehen werden, wohingegen in E-01, das ebenfalls diese scharfe Kante aufweist, anscheinend kein Wurzelhindernis auftritt. Auf den Vergleichsflächen konnten solche Übergänge nicht gefunden werden, was aber an den durchgeführten Untersuchungen liegt. Im Bohrstock kann solch eine dünne Schicht organischen Materials nicht unbedingt erkannt werden. Es stellt sich die Frage, ob eine unterschiedliche Vorbereitung dieser Flä-

chen vor den Auffüllarbeiten eine solche Kante verursacht. Ein Abgleich mit dem Landratsamt vorliegenden Informationen zur Flächennutzung (mündliche Mitteilung, SCHMALZRIED) sowie den Unterlagen des Planungsbüros (ÖPF 2006a:11f) ergab für Flächen, auf denen die genannten Kanten gefunden wurden, unterschiedliche Voraussetzungen: Vertreten waren Flächen mit Sommerweizenanbau, Winterweizenanbau sowie Stilllegungsflächen. Die Stilllegungsflächen waren vor der Auffüllung gemulcht worden, die anderen Flächen konnten ohne weitere Vorbereitung aufgefüllt werden, da dies nach der Ernte im Herbst durchgeführt wurde. Die Gründe für unverrottetes organisches Material im Übergang können nicht einer bestimmten Flächenvorbereitung zugeordnet werden. Da die Untersuchungen zu Beginn der zweiten Vegetationsperiode stattfanden, ist insgesamt zu erwarten, dass die Wurzeln bis zum Ende des vorgesehenen 3-jährigen Anbaus von Luzerne noch weiter wachsen werden und Horizontgrenzen weiter auflockern können.



Abbildung 20: Profil A-04 mit scharfer Kante im Übergang jY-fAp. Die Kante wird nach der Auffüllung durch unverrottetes organisches Material gebildet. (DENGLER 2008)

Auffällig ist, dass nur bei 13 von 30 Messplots überhaupt ein EW-Anstieg im Bereich des Übergangs jY-fAp festgestellt werden konnte, was sowohl auf eine gelungene Durchführung der Auffüllung als auch auf eine wirksame Nachsorge mit Luzerne zurückgeführt werden kann. Dagegen zeigten 24 von 30 Messplots einen deutlichen EW-Anstieg bei rund 40 bis 55 cm Tiefe. In diese Tiefe reichen die nach dem Bodenauftrag zur Lockerung eingesetzten 50 cm langen Aufreißerzinken. Da deren Reichweite in der Praxis aber

eher geringer ist, was in unebenem Terrain oder höherem Zugkraftbedarf begründet werden kann (siehe auch 6.3), scheint es unwahrscheinlich, dass dieser EW-Anstieg auf diese Bearbeitung zurückzuführen ist. Zudem liegt der EW-Anstieg durchweg rund 15-20 cm unterhalb der Auffüllgrenze. Die Referenzprofile zeigen alle eine Pflugsohle in etwa 20 cm Tiefe, so dass der Verdacht naheliegt, dass diese auch noch im Bereich der aufgefüllten Flächen erkennbar ist. Außerdem ergaben die Lagerungsdichtemessungen in den fAp-Horizonten Werte, die gut mit den Werten aus der in REF-02 beprobten Pflugsohle übereinstimmen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die alte Pflugsohle der fAp-Horizonte in den Profilen nicht erkennbar war. Es ist daher möglich, dass an manchen Stellen die alte Pflugsohle mit den Stechzylindern angeschnitten wurde, an anderen Stellen nicht. Hinsichtlich des Auftretens alter Pflugsohlen konnte, ebenso wie bei den Übergängen mit organischem Material, kein Zusammenhang mit der vorherigen Nutzung und Vorbereitung festgestellt werden. Die wenigen Messplots, die keine Verdichtung in alter Pflugsohlentiefe anzeigen, liegen über verschiedene Nutzungsarten verteilt: 4 liegen auf Flächen mit vorherigem Anbau von Wintergetreide, wovon 2 gemulcht werden mussten, 1 auf einer Fläche mit vorherigem Anbau von Sommerweizen, 1 auf einer brach liegenden Fläche, die ebenfalls gemulcht werden musste. Da aber auf Wintergetreideflächen weitere 6 Messplots die ehemalige Pflugsohle anzeigen, bei den anderen Nutzungsarten noch mehr, lassen sich aus der Vornutzung keine Zusammenhänge für das Vorkommen der ehemaligen Pflugsohle ableiten.

Auf den Vergleichsflächen Enzweihingen und Poppenweiler wurden für Oberbodenauffüllungen sehr große Auffüllmächtigkeiten von 30-40 cm gefunden. Ebenso wie die Vergleichsfläche Vaihingen-Riet diese Flächen zeigen jedoch einen starken EW-Anstieg schon bei 20-25 cm. Möglich ist, dass während der Bauarbeiten nicht entsprechend DIN 19731 vorgegangen wurde, wonach der Boden in einem Durchgang und ohne Zwischenbefahrung aufgebracht werden muss. Wahrscheinlicher ist aber, dass die Flächen nach dem Bodenauftrag gepflügt wurden, wobei in Pflugtiefe von 20-25 cm eine Pflugsohle entstand. Die dazugehörigen EW-Kurven ähneln denen der Referenzprofile der Möglinger Fläche von ihrer Ausprägung her zwar sehr, weisen jedoch häufig insgesamt höhere EW-Werte auf. Diese erreichen unterhalb der Pflugsohle, noch innerhalb der Auffüllung häufig Werte von 3 MPa oder mehr. (Abb. 21) Damit werden mehrfach die in 4.2 vorgestellten Werte zweier Autoren erreicht oder überschritten, nach denen Wachstumsstörungen oder Durchwurzelungshindernisse zu erwarten sind. Derart hohe Werte wurden auf der Möglinger Fläche kaum gefunden. Nur in flachgründigen Bereichen um C-01, B-03 und einge-

schränkt B-04 wurden im Cv-Horizont ähnliche Werte gemessen, sowie in einzelnen weiteren Profilen ab der ehemaligen Pflugsohle abwärts. Eine ehemalige Pflugsohle, wie auf der Möglinger Fläche häufig zu finden, war dagegen auf den Vergleichsflächen nur selten und weniger deutlich zu identifizieren. Grund dafür dürfte sein, dass aufgrund von Verdichtung der oberen Horizonte schon in vergleichsweise geringen Tiefen Eindringwiderstände erreicht werden, die auf dem Niveau liegen, das auf der Möglinger Fläche erst im Bereich der ehemaligen Pflugsohle erreicht wird.

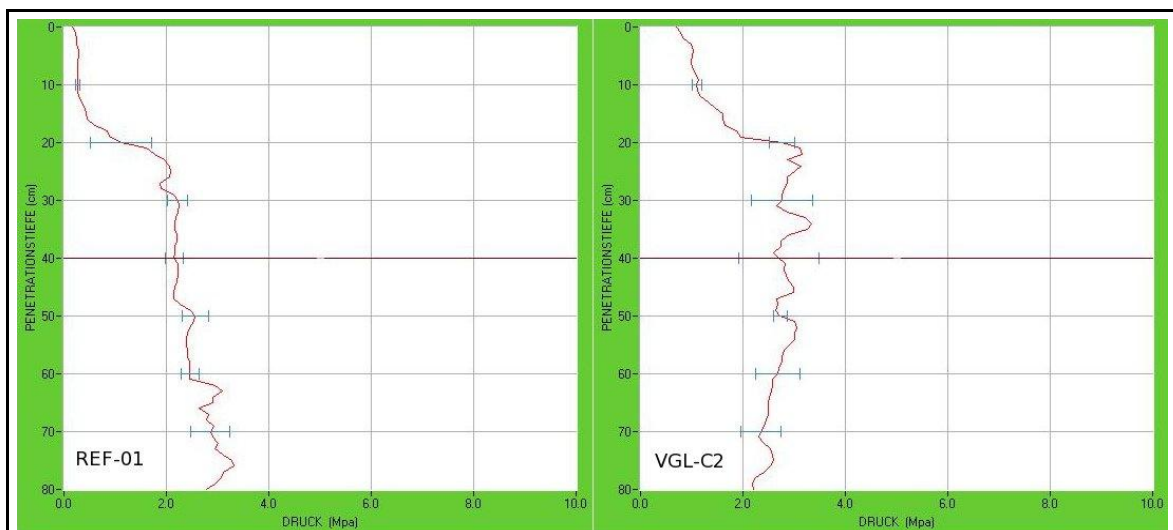


Abbildung 21: Eindringwiderstände in Referenzflächen (Umgebung der Auffüllfläche Bühl) und Vergleichsflächen. Die Pflugsohle bei ca. 20 cm ist in beiden Fällen gut zu erkennen, in VGL-C2 (Ludwigsburg-Poppenweiler) sind jedoch bei einer Auffüllmächtigkeit von ca. 40 cm sowohl Auftragsboden als auch der ehemalige Oberboden wesentlich dichter.

Die hohe Auffüllmächtigkeit ist aber an sich schon ein nicht zu vernachlässigendes Problem. In den bestehenden Richtlinien ist vorgesehen, dass bei Auftragsmächtigkeiten von über 20 cm der Oberboden abgeschoben und danach wieder aufgebracht werden soll (siehe 2.3). Wird diese Regel streng ausgelegt, hätte auf allen Vergleichsflächen sowie fast durchgehend auch auf der Möglinger Fläche der Oberboden abgeschoben und im Anschluss wieder aufgetragen werden müssen. In Poppenweiler lagen die Auffüllmächtigkeiten bei zwischen 30 und 40 cm, in Enzweihingen bei 40-45 cm und in Vaihingen-Riet bei um 25 cm. In Möglingen lag die Auffüllmächtigkeit in 12 von 15 Profilen bei über 20 cm, davon in 10 Profilen bei 25 cm oder mehr. Im Durchschnitt wurden über 25 cm aufgefüllt, bei einer Spannweite zwischen 10 cm und 38 cm. Der Ausreißerwert von 52 cm aus D-01 bleibt hierbei unberücksichtigt, da außer auf der Baustraße kein vergleichbares Profil aufgenommen wurde. Innerhalb der genannten Spannweite sind die

Auffüllmächtigkeiten meist zu hoch. Dass sich dies nicht unbedingt nachteilig auswirken muss, zeigten A-03 und E-01, die bei einer Auffüllmächtigkeit von 23-30 cm bzw. 31 cm eine gute Durchwurzelung bis in den fAp und teilweise auch darunter aufweisen. Allerdings ist in häufigeren Fällen eine deutliche Verschlechterung der Durchwurzelung erkennbar. Die 3 Profile mit geringmächtigen Auffüllungen zeigen dagegen alle eine gute Durchwurzelung bis weit in den fAp-Horizont hinein. Da es sich hier um sehr flachgründige Standorte handelt, kann schon die geringmächtige Auffüllung den Wurzelraum deutlich vergrößern. Eine volle Ausschöpfung der zulässigen Auftragsmächtigkeit wäre an solchen Standorten durchaus angebracht.

Die in den Richtlinien vorgegebenen 20 cm scheinen folglich auch nach diesen Untersuchungen eine sinnvolle Größe zu sein, wobei auch ein wenig mächtigere Auffüllungen nicht zwangsläufig problematisch sind. Nachteilig ist auf der Möglinger Fläche insbesondere die große Spannweite der Auffüllmächtigkeiten zu sehen. Da aber auch Profile mit nur rund 25 cm (z.B. A-04, A-05, D-03) schon Wurzelhindernisse und von organischem Material geprägte Übergänge aufweisen, muss auch die zu hohe Auftragsmächtigkeit negativ angesehen werden, wenn diese auch im Vergleich mit den Poppenweiler und Enzweihinger Flächen noch sehr nah an den Vorgaben liegt. Zu mächtige Auffüllungen verhindern eine Einarbeitung des aufgefüllten Oberbodens in den anstehenden Oberboden, wie in LABO (2002:11) genannt. Bei einer Pflugreichweite von 20 cm wäre aber schon eine Auffüllmächtigkeit von 20 cm kaum geeignet, eine Einarbeitung zu gewährleisten. Dazu müssten andere Maschinen herangezogen werden (siehe 6.3).

Neben der Auffüllmächtigkeit muss auch die Beschaffenheit des Auffüllmaterials betrachtet werden. Die Verwendung von komplett ungeeignetem Material konnte auf der Möglinger Fläche aufgrund der detailliert geplanten Herkunft und der intensiven Bauüberwachung ausgeschlossen werden. Auf allen vier Auffüllungen war ausschließlich Oberbodenmaterial genehmigt. Dieses sollte einen an der Farbe erkennbaren merklichen Humusgehalt und geringeren Tongehalt aufweisen und, sofern er nicht von einer Pararendzina stammt, kalkfrei sein. Solches Material wurde aber nicht immer aufgetragen. Insbesondere auf den Flächen Vaihingen-Riet und Poppenweiler unterschied sich das Auffüllmaterial teilweise deutlich von den anstehenden Böden und wies auch meist hohe Kalkgehalte auf. In diesen Fällen scheint Unterbodenmaterial aus Lösslehm verbaut worden zu sein. Auch an einigen Stellen auf der Möglinger Fläche hebt sich der Auftragsboden durch seine gelbliche Farbe und den höheren Kalkgehalt vom anstehenden Boden ab. Dies ist wahrscheinlich in einem nicht immer sehr sorgfältigen Ausbau in den Liefergebieten begründet.

Der höhere Schluffgehalt des Auftragsmaterials war aufgrund dessen Herkunft aber zu erwarten und entspricht den Kombinationsmöglichkeiten, die nach den bestehenden Richtlinien zulässig sind.

Das reine Vorgehen nach den Werten der Bodenschätzung bietet Unsicherheiten. Die Fläche um E-01 und D-03 hat Bodenzahlen von nur knapp unter 60, sie liegt im Bereich des Kolluviums. Sofern die Bodenzahl über 60 liegt, wird üblicherweise davon ausgegangen, dass ein Bodenauftrag keine Verbesserung mehr bringen kann. Gerade in E-01 kann im Hinblick auf den scharfen, von organischem Material geprägten Übergang zwischen jY und fAp und den vergleichsweise lockeren fAp-Horizont keine wirkliche Verbesserung festgestellt werden. Andererseits wurde der Boden hier auch nicht verschlechtert, was an der guten Durchwurzelung bis deutlich in den fAp gesehen werden kann. In solchen grenzwertigen Fällen sollte in Zukunft besonders auf eine Verbesserungsfähigkeit geachtet werden, um keine Verschlechterung zu riskieren.

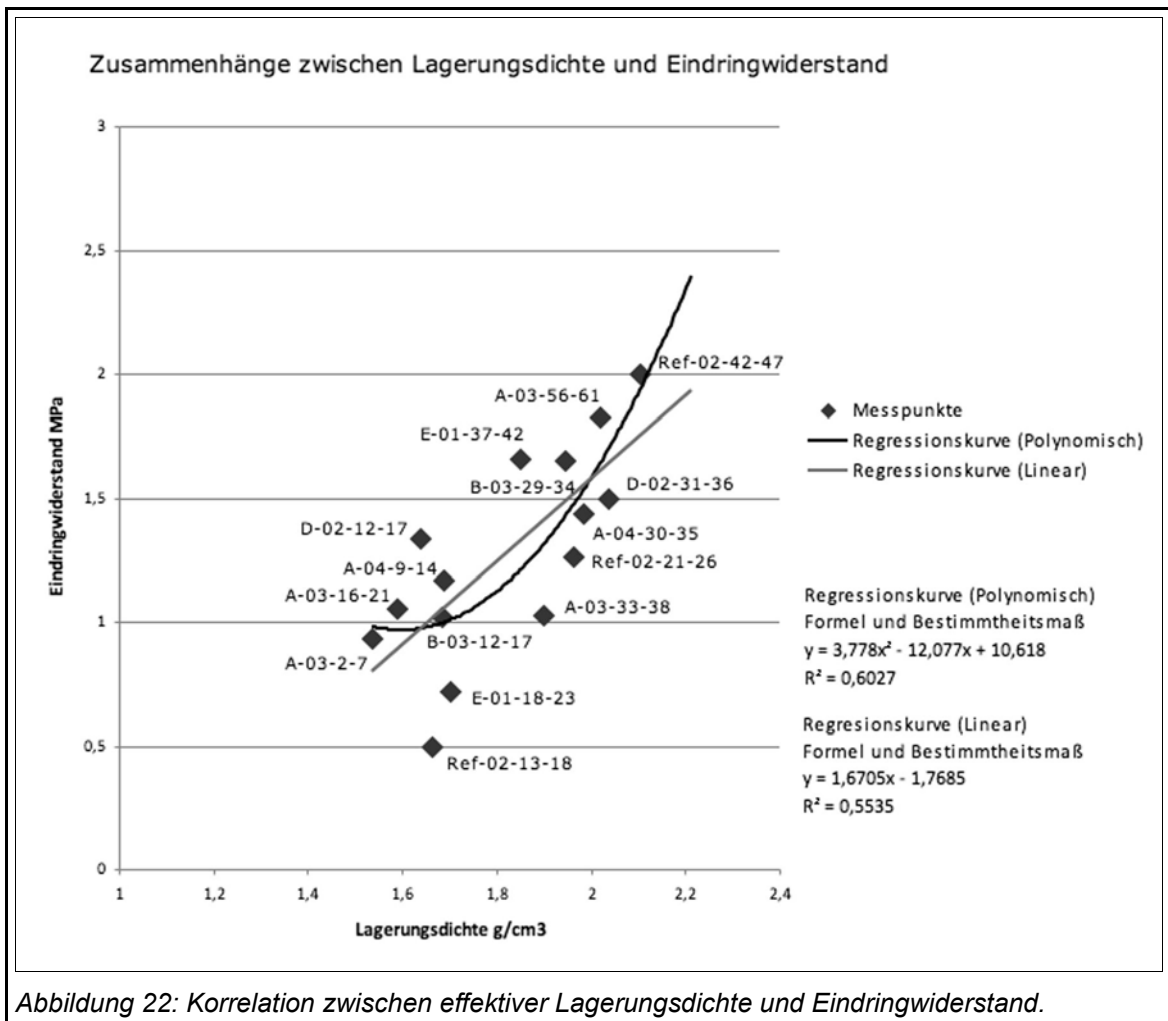
Verglichen mit dem Profil vom September 2007 (siehe Abb. 19) ist der Gesamteindruck der Möglinger Fläche gut. Ähnlich scharfe Grenzen und ähnlich hohe Auffüllmächtigkeiten sind auf der Fläche eher die Ausnahme. Wenn auch tatsächlich immer wieder Durchwurzelungshindernisse vorhanden sind, gibt es meist auch Wurzeln, die diese überwinden. Ob das Profil tatsächlich auf einer ehemaligen Baustraße zu liegen kam, lässt sich nicht mehr zweifelsfrei rekonstruieren. Es erscheint jedoch unwahrscheinlich, da der alte Ap-Horizont noch erhalten ist und sich darauf auch organisches Material befindet. Auf den Baustraßen war der Oberboden entfernt worden. Dennoch kann aufgrund der Lage zumindest von einer großen Nähe zu einer Baustraße ausgegangen werden. Den Baustellenprotokollen (ÖPF 2006b) nach zu urteilen, wurde der südliche Bereich der Teilfläche A als eine der ersten Teilflächen aufgefüllt. Da es zu Beginn der Arbeiten Probleme mit dem seitlichen Abkippen des Bodenmaterials gab, ist es möglich, dass dadurch notwendige zusätzliche Transporte mittels einer Laderaupen für die höhere Verdichtung verantwortlich sind. Andere Profile in der Umgebung, A-04 und A-05 zeigen teilweise ebenfalls scharf abgegrenzte Horizonte, die allerdings schon durch einige hindurchreichende Wurzeln verbunden werden. Zudem ist ein direkter Vergleich der Profile vom September 2007 mit den Profilen im März 2008 auch aufgrund der unterschiedlichen Feuchteverhältnisse schwierig. Während zu Beginn der Vegetationsperiode im März 2008 frische bis feuchte Verhältnisse herrschten, zeigt das September-Profil eine deutliche Austrocknung, wodurch Risse in dichteren Bereichen und damit eine entlang von Rissen verlaufende Durchwurzelung stärker betont werden.

6.2 Verwendung eines Penetrometer zur Untersuchung von Auffüllungen

Die Messung des Eindringwiderstands bietet die Möglichkeit, mit wenig Aufwand eine bodenphysikalische Größe zu erheben, die das Erkennen von verdichteten Horizonten ermöglicht. Messkurven wie von Profil E-01 (Abb. 12) zeigen, dass verschiedene Verdichtungsgebiete bei entsprechender Ausprägung gut erkannt werden können. An anderen Stellen, z. B. A-03 oder B-03, konnten die Übergänge von jY zu fAp nicht im EW erkannt werden (Abb. 9), was insofern den Befunden aus den Profilaufnahmen entspricht, als dass nur geringe Dichteunterschiede geschätzt wurden und eine gute Verbindung von Auffüllmaterial mit gewachsenem Boden vorlag. Die zugehörigen Laborwerte zur Lagerungsdichte (Tab. 7) sprechen allerdings eine andere Sprache, demnach sind die Dichteunterschiede deutlich größer. Diese Unstimmigkeit kann verschiedene Ursachen haben. Dazu zählen neben den Messungenauigkeiten in den eingesetzten Verfahren nicht zuletzt auch die starke Beeinflussung des EW durch Bodenfeuchte und Bodenart, die sich nicht nur in Auffüllungen in unterschiedlichen Horizonten ändern.

Der große Einfluss von Bodenart und Feuchte auf den Eindringwiderstand wurde besonders in VGL-B2 (Enzweihingen) deutlich. Während der EW durch die tonigen Schluffe von jY und fAp bis auf etwa 3 MPa anstieg, fiel er in größerer Tiefe im Ton wieder stark ab, obwohl dieser nach den Befunden aus dem Bohrstock dicht gelagert erscheint. Aufgrund der Feuchte ist dieser dennoch weich und bietet einen geringen Reibungswiderstand. Auf Flächen mit deutlich unterschiedlichen Bodenarten sind die Ergebnisse der Eindringwiderstandsmessungen folglich nur eingeschränkt vergleichbar. Dies betrifft aber auch unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte. Bei Beschränkung auf Böden mit ähnlichen Bodenarten, wie sie bei den untersuchten Auffüllungen im Auftragsboden sowie dem alten Oberboden vorliegen, kann eine Vergleichbarkeit erreicht werden, wenn bei vergleichbaren Feuchtebedingungen gemessen wird. Dies ist nicht immer leicht zu realisieren, da die Feuchte allein innerhalb einer Fläche schon stark variieren kann, z. B. in Enzweihingen zwischen 22 % und 36 %, beides unter Winterraps in den oberen cm. Eine Messung von absolut vergleichbaren Werten ist daher mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

Es bleibt die Möglichkeit des relativen Vergleichs innerhalb eines Profils oder möglicherweise einer Fläche. Hierzu scheint der Eindringwiderstand sehr gut geeignet zu sein, denn mit ihm können stärker verdichtete Bereiche sehr gut lokalisiert werden. Die positive Korrelation des Eindringwiderstandes mit der effektiven Lagerungsdichte (Abb. 22) erlaubt einen solchen Einsatz.



Verdichtete Horizonte können jedoch an verschiedenen Stellen im Profil auftreten. Innerhalb des Auffüllhorizonts, im fAp an der ehemaligen Oberfläche oder auf dem Niveau der ehemaligen Pflugsohle wurden mehrfach stärker verdichtete Bereiche gefunden, die sich im EW-Profil kaum unterscheiden. Eine sichere Beurteilung, welche Ursache für einen Anstieg des EW maßgeblich ist, erfordert den Vergleich mit einem Bodenprofil. Dazu kann schon ein Bohrstockprofil wertvolle Dienste leisten. An VGL-C3 (Poppenweiler) wird dies besonders deutlich. Während das EW-Profil einen deutlichen Anstieg bei ca. 20 cm anzeigt, was die Auffüllmächtigkeit anzeigen könnte, ist im Bohrstock aufgrund des andersartigen Auffüllmaterials deutlich sichtbar, dass die Auffüllung bis in 46 cm Tiefe reicht. Der Anstieg im EW muss also andere Gründe haben, wahrscheinlich wurde in der Auffüllung gepflügt und dadurch Ansätze einer neuen Pflugsohle geschaffen.

Typische angetroffene Tiefenlagen von EW-Anstiegen waren auf gepflügten Flächen ~20 cm als Pflugtiefe sowie auf aufgefüllten Flächen im Gewinn Bühl Tiefen um 45-

50 cm als Tiefenlage der ehemaligen Pflugsohle. Die letzte Zahl entspricht dabei einer Auffüllmächtigkeit von etwa 25-30 cm plus 20 cm ehemaliger Pflugtiefe, wobei der ehemalige Ap-Horizont meist etwas komprimiert war. Übergänge zwischen jY und fAp liegen selbstverständlich in von der Auffüllmächtigkeit abhängigen unterschiedlichen Tiefen, sollten aber theoretisch bei ~20 cm liegen, wenn entsprechend der Genehmigungen aufgefüllt wurde. Allerdings kommen auch Auffüllungen von ~40 cm vor. Zudem ist nicht immer der Übergang auch durch einen EW-Anstieg gekennzeichnet. Eben diese Unsicherheit macht es schwierig, allein aus einem EW-Profil abzulesen, welche Ursache nun genau für den Anstieg verantwortlich ist.

Die Interpretation von Messkurven aus Mittelwerten kann teilweise problematisch sein. Wenn mehrere Messungen sprunghafte EW-Anstiege in leicht unterschiedlichen Tiefen ergeben, wird ein solcher Anstieg in der Mittelwertskurve „abgeflacht“, er erscheint weniger abrupt, als er in den einzelnen Messungen tatsächlich ist. Ein Hinweis auf eine solche Situation bietet die Standardabweichung der Werte in der entsprechenden Tiefenlage. Liegt im Bereich eines mäßig steilen EW-Anstiegs eine vergleichsweise hohe Standardabweichung vor, kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Messungen jeweils einen abrupten Anstieg zu verzeichnen haben. Aussagekräftiger, auf den ersten Blick aber verwirrender ist ein Diagramm mit den einzelnen Messungen. Hier können auch Ausreißer erkannt werden. Beim Erstellen von Mittelwertskurven sollten möglicherweise einzelne Ausreißer unbeachtet bleiben. Bei nur 5 Messungen pro Messplot muss dabei jedoch behutsam vorgegangen werden.

Das Fehlen von verbindlichen Grenzwerten – Werte wie die in 5.1.3 vorgestellten sind als rein empirisch und ohne Allgemeingültigkeit anzusehen (LEBERT et al. 2004:29) – führt dazu, dass die Messung von Eindringwiderständen kein absolutes Urteil darüber ermöglicht, ob eine Schadverdichtung vorliegt oder nicht. Möglich ist aber eine vergleichende Beurteilung unter vergleichbaren Rahmenbedingungen. So können Bereiche mit starken Verdichtungen gut abgegrenzt werden. Wenn beispielsweise vor einer Auffüllung Messungen vorgenommen werden, können auch, sofern die Rahmenbedingungen bzgl. Feuchtegehalt eingehalten werden, Rückschlüsse auf eine Veränderung der Dichteverhältnisse gezogen werden. Um die Ursache von EW-Anstiegen im einzelnen Profil benennen zu können, ist der Vergleich mit einem Profil, im einfachsten Fall einem Bohrstockprofil, unbedingt notwendig.

6.3 Verbesserungsmöglichkeiten für das Vorgehen bei zukünftigen Auffüllungen

Beim Einsatz von neuartigen Methoden und Vorgehensweisen ist es wichtig, die Pilotprojekte dazu heranzuziehen, Verbesserungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Nur so können bisherige Fehler in Zukunft vermieden werden, kann der Erfolg ähnlicher Maßnahmen gesichert werden. Hinsichtlich Oberbodenauffüllungen als naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen hat die Auffüllung in Möglingen den Charakter eines Pilotprojekts. Auf Grundlage der in 6.1 aufgeführten Probleme, die in Möglingen, aber auch auf den Vergleichsflächen auftraten, können Verbesserungsmöglichkeiten für zukünftige Maßnahmen vorgeschlagen werden.

Eines der auffälligsten Probleme, die besonders auf den Vergleichsflächen, aber auch auf der Möglinger Fläche deutlich wurden, betrifft die **Auftragsmächtigkeit**. Meist ist diese zu hoch. Zwei Vergleichsflächen weisen an allen Messpunkten 30 bis 40 cm auf, die dritte immer noch rund 25 cm. Auch die durchschnittlichen 25 cm in Möglingen liegen über den genehmigten 20 cm. Hier wurden aber auch drei Stellen mit deutlich unter 20 cm gefunden, was durchaus der Genehmigung entspricht. Beide Abweichungen von der Genehmigung können aber nachteilige Folgen haben: Zu mächtige Auffüllungen verhindern eine effektive Einarbeitung in den anstehenden Oberboden und erschweren eine ausreichend tiefe Lockerung direkt nach der Auffüllung. Hier sind eher ausgeprägte Unterschiede im Eindringwiderstand zwischen aufgetragenem und anstehendem Boden oder scharfe von unverrottetem Material geprägte Übergänge zu finden. Zu geringmächtige Auffüllungen können zwar auch eine Verbesserung bewirken, jedoch nicht immer das Optimum. Bei voller Ausschöpfung der zulässigen Auftragsmächtigkeit und korrekter Ausführung besteht besonders auf flachgründigen Standorten die Aussicht auf ein optimales Ergebnis. Es erscheint daher außerordentlich wichtig, in Zukunft mehr auf eine möglichst exakte Einhaltung der Auftragsmächtigkeit zu achten. Besonders deutlich zu mächtige Auffüllungen sind unter allen Umständen zu vermeiden, da hier aufgrund von verschlechterten Abbauprozessen im alten Oberboden ein Durchwurzelungshindernis entstehen kann und möglicherweise verdichtete Bereiche im fAp nur noch mit erhöhtem Aufwand gelockert werden können.

Die **Kontrolle der Auftragsmächtigkeit** wirft aber einige Probleme auf. Auf der Möglinger Fläche wurden sie anhand von flachen Schürfgruben überprüft. Dies bringt sichere Ergebnisse, ist aber sehr aufwändig, insbesondere wenn größere Flächen untersucht werden müssen. Auch der Einsatz eines Bohrstocks stellt einen hohen Aufwand

dar, wenn auch geringer als mit Schürfgruben. Nach den Erfahrungen mit dem Penetrologger zur Messung des Eindringwiderstands könnte dies eine etwas schnellere Methode sein. Wenn die Auftragsfläche vor dem Bodenauftrag nicht gelockert wird, ist zu erwarten, dass der Auftragsboden leicht, der anstehende Boden schwerer zu durchdringen ist. Dazu muss aber zunächst erprobt werden, ob diese Annahme tatsächlich zutrifft. Sollte dies der Fall sein, kann mit wenig aufwändigen Einstichen schnell auf einer großen Fläche die Auffüllmächtigkeit ermittelt werden. Mit ein wenig Erfahrung des Untersuchenden kann diese Arbeit, sofern keine genauen Zahlen ermittelt werden müssen, auch mit einer so genannten „Bodensonde“ ausgeführt werden. Diese bestehend lediglich aus einem Metallstab mit Spitze und einem meist kugelförmigem Handgriff. Bestehen Zweifel an dieser Messung, kann diese immer noch an einzelnen Stellen durch Bohrstockprofile oder Schürfgruben überprüft werden.

Wichtiger als die Kontrolle ist aber schon die **Einhaltung der Auftragsmächtigkeit**. Beim Bau von Straßen oder ähnlichem werden zur exakten Einhaltung von Höhen häufig technische Lösungen auf Grundlage von GPS oder Lasern eingesetzt, das Material sollte also vorhanden und bewährt sein. Verschiedene auf GPS und Vermessungstechnik spezialisierte Firmen haben entsprechende Geräte im Programm, ebenso wie Hersteller von Baumaschinen. Ob der Einsatz bei Oberbodenauffüllungen möglich ist, muss abgeklärt werden, da beim Straßenbau eine möglichst gleichförmige Fläche gewünscht ist, bei der Oberbodenauffüllung dagegen eine gleichmäßige Auffüllmächtigkeit auf weniger gleichmäßigem Untergrund. Möglicherweise finden sich auch im Umfeld des Precision Farming, einem Verfahren zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen mit Hilfe von geodätischen Methoden, Verfahren, die bei Oberbodenauffüllungen zum Einsatz kommen können. Inwiefern der Einsatz solcher hochtechnischer Geräte für Bodenauffüllungen Sinn macht, muss nicht zuletzt hinsichtlich der Kostenfrage noch geklärt werden. Die eher geringe Größe vieler Auffüllflächen kann aber gegen den technisch aufwändigen Einsatz der eben geschilderten Methoden sprechen. Wesentlich einfacher ist es, die Auftragshöhe mit klassischen Methoden wie Pflöcken oder Fluchtschnüren zu markieren. Diese können dann auch ohne weiteren Aufwand zur Kontrolle der Auftragsmächtigkeit herangezogen werden. Nachteilig ist gerade bei auf der Fläche verteilten Pflöcken, dass sie die Bearbeitung insofern erschweren, als dass der Maschinenführer sie umfahren muss. Zudem kann ein Pflock von einer Baumaschine leicht versehentlich heraus gedrückt werden. Die Tauglichkeit solcher Maßnahmen muss sich in der Praxis erweisen.

Weitere häufig festgestellte Probleme betreffen **Wurzelhindernisse** aufgrund von **verdichteten Horizonten** oder **unverrottetem organischem Material**, das an der Oberfläche des alten Oberbodens liegt und eine scharfe Grenze ausbildet. Dabei weisen die Vergleichsflächen häufig verdichtete Horizonte im unteren Bereich der Auffüllung auf, die sich in den alten Oberboden fortsetzen. Die Möglinger Fläche zeigt Dichteunterschiede zwischen Auffüllung und altem Oberboden eher selten, und Verdichtungen innerhalb der Auffüllung nie. Dafür sind von organischem Material geprägte scharfe Übergänge nur in Möglingen zu finden, was aber auch auf die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zurückgeführt werden kann. Wurzelhindernisse erschweren es, dass sich Auftragsboden und ehemaliger Oberboden verbinden können, da dies zu einem großen Teil durch das Wurzelwachstum und die damit einhergehende Lockerung geschieht. Wenn also schon beim Bodenauftrag darauf geachtet wird, möglichst keine Wurzelhindernisse zu produzieren, so kann die Verbindung zwischen den Horizonten schneller erreicht werden, die erstrebte Verbesserung tritt früher ein. Eine gute Verbindung und Verzahnung der Horizonte verhindert auch die Akkumulation von Stauwasser innerhalb des Auftragsbodens. Solche Befunde wurden zwar auf den untersuchten Flächen nicht gefunden, können aber laut LfU (2000b:61) bei geschichteten Bodenarten vorkommen.

Die **Verhinderung der Entstehung von organischen Trennschichten** muss teilweise in der Flächenvorbereitung berücksichtigt werden. Wenn große Mengen an Biomasse anstehen, muss diese vorher entfernt werden. Geringere Mengen sollten gut abtrocknen, um Fäulnis der feuchten Pflanzenteile unter dem Auftragsboden zu verhindern. Bei Pflanzenarten, die nach dem Abtrocknen nur wenig Trockenmasse aufweisen, die auch leicht zerfällt, kann auf das Entfernen der Biomasse verzichtet werden – unter der Voraussetzung, dass diese vor Beginn des Bodenauftrags gut abtrocknen kann. Eine solche Pflanzenart stellt zum Beispiel die Luzerne dar, wohingegen die Reste von Maispflanzen oder Stroh nur sehr schwer verrotten. Die Vorbereitung der Fläche muss unbedingt der vorherigen Nutzung angepasst werden. Dazu muss unmittelbar vor der Auffüllung der Zustand der Flächen hinsichtlich des Vegetationsaufwuchses und des Bearbeitungszustandes kartiert werden, wie es in Möglingen gemacht wurde. Je nach Art der Pflanzen kann darauf basierend eine teilflächenspezifische Flächenvorbereitung konzipiert werden. Auch die bereits erwähnte Einhaltung der zulässigen Auftragsmächtigkeit dürfte bei der Verhinderung von organischen Trennschichten eine wichtige Rolle spielen. Da sich das meiste Bodenleben in den oberen cm abspielt, gehen die Abbauprozesse in geringeren Tiefen schneller vonstatten. Zudem soll die direkt nach dem Bodenauftrag durchgeführte

Lockerung die meist ebene Grenze aufreißen, um so Wurzelwege zu schaffen, was die Durchwurzelung insgesamt und damit die Durchlüftung und den Abbau organischer Reste fördert. Bei wiesenartiger Vegetation mit sehr dichter Durchwurzelung in den oberen cm kann es sinnvoll sein, diese noch vor dem Bodenauftrag aufzureißen. Dabei sollte aber bedacht werden, dass dieser Boden eine vergleichsweise hohe Tragfähigkeit besitzt, die für das Befahren der Fläche im Rahmen des Bodenauftrags von Vorteil ist. Eine zu tiefe Lockerung verringert jedoch die Tragfähigkeit und erhöht die Verdichtungsgefahr beim Bodenauftrag.

Zur **Verhinderung von Verdichtungen** kann sowohl eine schonende Vorgehensweise beim Bodenauftrag, als auch eine effektive **Lockerung der Auffüllung** beitragen. In Möglingen wurde die Auffüllung mit einem Aufreißer mit drei 50 cm langen Zinken durchgeführt, der an der Raupe installiert war. Die praktische Reichweite liegt nach Aussagen der baubegleitenden Sachverständigen jedoch häufig geringer, bei ca. 40-45 cm. Der höhere Zugkraftbedarf beim Einsatz der vollen Länge der Zinken dürfte einen Grund darstellen, dass die maximal erreichbare Tiefe nicht

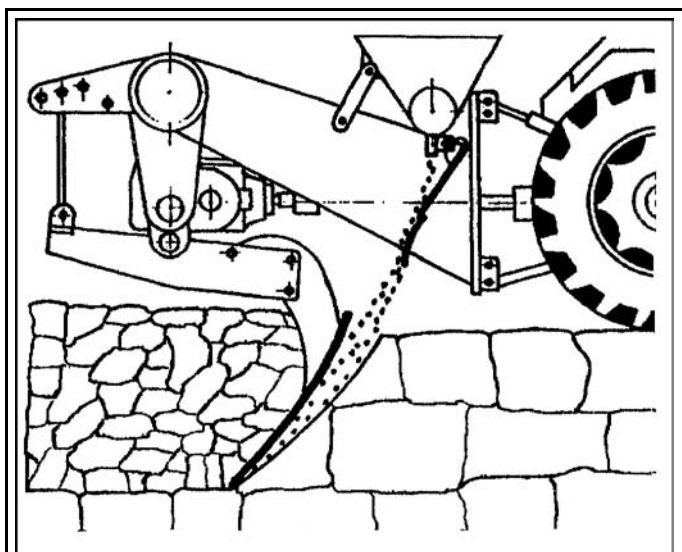


Abbildung 23: Abbruchlockerungsgerät MM100. Die spatenartigen Werkzeuge brechen den dichten Boden zur gelockerten Seite hin ab. Es findet eine leichte Durchmischung statt. Während der Bearbeitung können Düngemittel eingebracht werden. (SCHULTE-KARRING 1999:9)

ausgeschöpft wird. Zudem können Bodenunebenheiten Schwankungen in der Reichweite verursachen. Die theoretisch erreichbaren 50 cm erfassen unterhalb der genehmigten 20 cm Auffüllung noch gerade den gesamten auf den Referenzflächen rund 30 cm mächtigen Oberboden, inklusive des unterhalb der Pflugreichweite liegenden dichteren Bereiches. Bei geringerer Reichweite des Aufreißers wird der dichtere Bereich nicht mehr erfasst. Da zudem große Flächen in Möglingen eine zu mächtige Auffüllung aufweisen (25 cm und mehr bei 10 von 15 Profilen, bis zu 38 cm), reicht der Aufreißer noch weniger in den alten Oberboden hinein. Die Einhaltung der Auffüllmächtigkeit erleichtert daher eine ausreichend tiefe Lockerung deutlich.

Wenn die Auffüllung aber zu mächtig wird, muss ein tiefer reichendes Lockerungsgerät eingesetzt werden. Aufreißer mit größerer Reichweite sind erhältlich, haben aber einen sehr hohen Zugkraftbedarf und arbeiten oft nur mit einer Zinke, was eine häufige Befahrung der Fläche erfordert. Zapfwellengetriebene Lockerungsgeräte haben einen geringeren Zugkraftbedarf, was eine geringere Belastung der Bodenoberfläche bewirkt. Insbesondere Abbruchlockerer (Abb. 23) bieten sich in diesem Fall an, da sie im Vergleich zu Hublockerungsmethoden (z. B. Wipp-Schar-Lockerer oder Stech-Hub-Lockerer) auch bei weniger trockenen Bedingungen noch eingesetzt werden können. Außerdem wirken sie breitflächiger und hinterlassen weniger breite „ungelockerte Dämme“ (SCHULTE-KARRING 1999:37) zwischen den einzelnen Werkzeugen. Nach der Bearbeitung bleibt eine vergleichsweise ebene, krümelige Bodenoberfläche zurück. Die leichte Vermischung zerstört zudem eine eventuell vorhandene organische Trennschicht (siehe oben) und vermischt die oberen Horizonte ein wenig, was nach SCHULTE-KARRING (1999:133) Vorteile für das vertikale Wurzelwachstum bringt. Wenn zur Nachsorge auf der Fläche Luzerne eingesetzt wird, die abhängig von den lokalen Bedingungen mehrere Meter tief wurzeln kann, scheint eine solche Lockerung ein sinnvoller Ansatzpunkt zu sein.

Diese teilweise aufwändigen Lockerungsmethoden können zumindest teilweise eingespart werden, wenn bereits das **Vorgehen beim Bodenauftrag** sorgfältig ausgewählt wird. In Möglingen wurde nach der in DIN 19731 beschriebenen Methode vorgegangen, nach der das Bodenmaterial von Raupen mit geringer Kettenpressung verschoben werden soll. Ein solches Vorgehen wird für geringmächtige Bodenauffüllungen bereits in UM 1991 (S. 19) empfohlen. Dabei wird das Material am Rand der Auffüllfläche oder in eigens angelegten Baustraßen von den LKWs abgeladen und mit den Raupen auf maximal 20 m langen Verschiebewegen verteilt. Der Auftrag des Bodens sollte dabei in einem Arbeitsgang erfolgen, so dass möglichst wenig Befahrungen notwendig sind. Am Ende wird die Fläche eingeebnet und mit dem Aufreißer gelockert, um eine Verzahnung zu erreichen. Insgesamt sind dabei immer mindestens 2-3 Befahrungen notwendig. Da jede Befahrung eine weitere Druckbelastung auf den Boden mit sich bringt, sollte die Anzahl der Befahrungen soweit möglich minimiert werden, Befahrungen der Fläche mit LKWs werden vollständig vermieden, abgesehen von den Baustraßen, die rückgebaut und intensiv gelockert werden. Die grundsätzliche Tauglichkeit dieser Vorgehensweise wird durch die Tatsache bestätigt, dass in Möglingen kaum Verdichtungen im Auftragsboden und im ehemaligen Oberboden auftraten.

Als Problem stellte sich die Verfügbarkeit von Raupen mit den in DIN 19731 geforderten maximal 15 kPa Kettenpressung dar (mündliche Mitteilung, GÜTHLER), da diese normalerweise hauptsächlich auf Mooren zum Einsatz kommen und daher in der Region Ludwigsburg kaum vorhanden sind. Vorstellbar wäre auch, sofern verfügbar, der Einsatz von Pistenbullys, die sehr geringe Kettenpressungen von nur 5 kPa aufweisen. Zumindest ein Hersteller (Kässbohrer Geländefahrzeug AG, www.pistenbully.com) bewirbt auch den Einsatz dieser Maschinen für Erdarbeiten, beispielsweise auf Deponien oder in Feuchtgebieten.

Eine andere in UM 1991 (S. 21) empfohlene Methode, eher für mächtigere Auffüllungen gedacht, betrifft den Einsatz von Förderbändern, ähnlich wie in Braunkohleabbaugebieten. Da aber Geräte im kleinen, für landwirtschaftliche Flächen tauglichen Maßstab fehlen, entstehen hier neue Probleme. Bei kurzen Wegstrecken zwischen Herkunftsflächen und Auftragsfläche sind so genannte Kübelraupen denkbar. Diese werden zum Abbau von Mooren eingesetzt und können mehrere m³ Bodenmaterial aufnehmen. Wie schon am Beispiel von Moorraupen mit besonders geringer Kettenpressung kommt bei solchem Spezialgerät wieder die Frage nach der Verfügbarkeit auf. Häufiger verfügbar, da auch im Straßenbau regelmäßig eingesetzt, sind Bagger, möglichst mit einer so genannten „Long-Reach“-Ausrüstung, also besonders langem Baggerarm, die beim Böschungsbau oder zum Ausbaggern von Gewässern eingesetzt werden. Diese Bagger würden das angelieferte Bodenmaterial in ihrer gesamten Reichweite verteilen, so dass die Fläche nur noch eingeebnet werden muss. Die Anzahl der notwendigen Überfahrten mit der Raupe könnte so verringert werden. Dabei muss allerdings abgeklärt werden, ob der Bagger das Bodenmaterial tatsächlich so gleichmäßig schütten kann, dass nur eine Raupenüberfahrt zum Einebnen notwendig ist. Bagger weisen in der Regel auch eine wesentlich höhere Kettenpressung auf, weshalb dem Ausbau der Baustraßen bzw der Baggerstandorte eine noch höhere Bedeutung beigemessen werden muss.

Schon jetzt zeigen sich im Unterboden der **ehemaligen Baustraßen**, von denen die Lkws das Bodenmaterial abgekippt haben, erwartungsgemäß die höchsten Dichtewerte. Dies erwies sich als Wurzelhindernis. Wenn es sich auch nur um ein Profil handelt, das im Bereich dieser einfachen Erdstraßen angelegt wurde, kann dies zumindest als Hinweis dienen. Die Lockerung des Unterbodens erfolgte in Möglingen mit dem bereits erwähnten 50 cm-Aufreißer, bevor mit Oberbodenmaterial wieder aufgefüllt wurde. Den Baustellenprotokollen (ÖPF 2006b, Protokoll-Nr: 85_86/009) ist zu entnehmen, das ursprünglich

eine Lockerung per „z. B. Wippscharlockerer“ geplant war, dann aber durch das mehrfache Aufreißen ersetzt wurde.

Die Lockerung der Baustraßen mit einem wirkungsvolleren Lockerungsgerät wie Wippscharlockerer oder Abbruchlockerer scheint angemessen, da das mehrfache Befahren mit schweren Lkws einen erheblichen Einfluss auf den Untergrund hat. Wenn nach Auffüllung der Baustraße mit Oberbodenmaterial noch einmal gelockert wird, ist ein 50 cm-Aufreißer in jedem Fall zu kurz. Schon im Idealfall ist eine Auffüllung von 50 cm (30 cm Ersatz des anstehenden Oberbodens, 20 cm Auffüllung) durchzuarbeiten, was mit den maximal 50 cm langen Zinken nicht erreicht werden kann. In den genannten Baustellenprotokollen war eine Lockerungstiefe von 60-80 cm geplant, die auch notwendig ist. Wenn die Auffüllung auf der Baustraße mächtiger ausfällt, in TRA-01 war sie insgesamt 64 cm mächtig, sind eher die 80 cm Lockerungstiefe anzustreben. Sollten zum Verteilen des Bodenmaterials tatsächlich Bagger mit höherer Kettenpressung zum Einsatz kommen, wird eine wirkungsvolle Lockerung noch wichtiger.

Wie schon bei möglichen Verdichtungen in der Fläche beschrieben, verringert sich der Lockerungsaufwand auch im Bereich der Baustraßen, wenn eine sorgfältige Vorbereitung zur **Vermeidung von Verdichtungen** erfolgt. Der Einsatz von Baggermatten könnte sich zumindest auf vergleichsweise viel befahrenen Baustraßen lohnen. Zudem ist die Beachtung der Witterung unbedingt erforderlich. Denn gerade bei Erdstraßen, ob mit Kalk stabilisiert oder nicht, hat die Befahrung bei nassen Verhältnissen ungleich höhere schädliche Wirkungen als bei trockenen Verhältnissen. Wie sich die Verhältnisse im Bereich der mit Kalk stabilisierten Hauptfahrstraßen, die nach den Arbeiten 0,8 bis 1 m ausgekoffert und mit angeliefertem Bodenmaterial aufgefüllt wurden, entwickelt haben, wurde nicht untersucht.

Die **Planung und Begleitung** der Baustelle in Möglingen durch ein **Sachverständigenbüro** war mit Sicherheit dafür verantwortlich, dass einige Fehler, die auf den Vergleichsflächen begangen wurden, beispielsweise zu hohe Auftragsmächtigkeit, falsche Nachsorge, Verdichtungen im Profilaufbau, in Möglingen nicht oder in wesentlich geringerem Umfang auftraten. Zur Fachplanung muss daher dringend geraten werden, da an einen Oberbodenauftrag, der den naturschutzrechtlichen Ausgleich für einen Eingriff bringen soll, höchste Ansprüche hinsichtlich der Qualität und des Erfolges zu stellen sind. Eine detaillierte Planung muss auch die Untersuchung der Verbesserungsfähigkeit des Bodens umfassen. Besonders in grenzwertigen Fällen, bei Bodenzahlen knapp unter 60,

die theoretisch einen Bodenauftrag zur Verbesserung erlauben, sollten vergleichsweise detaillierte Untersuchungen vorgenommen werden. Die Baustellenüberwachung durch den Sachverständigen bietet ebenfalls eine bestmögliche Sicherheit für einen ordnungsgemäßen Bodenauftrag.

Noch wirkungsvoller ist nur die einwandfreie Kooperation der ausführenden Bau-firmen und Maschinenführer, was deren Verständnis für die Belange des Bodenschutzes erfordert. Nur die Bauleute sind während der gesamten Bauzeit vor Ort und bestimmen durch ihr Verhalten letztlich über Erfolg und Misserfolg der Maßnahme. Ein möglichst großes Verständnis und die Einsicht der Bauleute für die Belange des Bodenschutzes minimieren also den Aufwand für die Baustellenüberwachung und Kontrolle der Auffüllung. Ob reine Informationsveranstaltungen zum Ziel führen ist fraglich, sollte sich aber der Oberbodenauftrag als naturschutzrechtliche Ausgleichmaßnahme etablieren und häufiger zur Anwendung kommen, könnte die Nachfrage nach spezialisierten Unternehmen steigen und so das Interesse an Belangen des Bodenschutzes zunehmen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Die fachgutachterlich geplante und betreute **Auffüllfläche Bühl bei Möglingen** zeigt zwar einen meist etwas zu mächtigen Auffüllhorizont, der aber nicht von Verdichtungen betroffen ist. Auch der Übergang zum alten Oberboden ist nur teilweise durch einen Anstieg des Eindringwiderstands zu erkennen, wohingegen sich die alte Pflugsohle noch deutlich abzeichnet. Der alte Oberboden wurde im Zuge der Auffüllarbeiten folglich kaum zusätzlich verdichtet. Die Durchwurzelung in den Profilen bestätigt dies Ergebnisse. Häufig reichen die Luzernewurzeln in den alten Oberboden hinein, an einzelnen Profilen sogar noch tiefer. Dennoch ist der Übergang an einigen Profilen noch durch eine Trennschicht aus unverrottetem organischem Material geprägt. Besonders (aber nicht nur) an solchen Profilen stoßen die Wurzeln auf ein Hindernis. Wenn auch auf einem Großteil der Fläche eine Verbindung von Auffüllboden und gewachsenem Boden entstanden ist, ist diese noch nicht auf der gesamten Fläche erreicht. Die noch andauernde Nachsorge durch den Anbau von tiefwurzelnder Luzerne auf der Fläche ist aber geeignet, auch an den übrigen Stellen noch eine Verbindung zu schaffen, denn auch im Falle von Wurzelhindernissen waren schon Wurzeln in den gewachsenen Boden vorgedrungen. Die meist gute Durchwurzelung und das Fehlen von Verdichtungen in Auffüllung und gewachsenem Boden lassen zu dem Schluss kommen, dass das **Ziel einer Bodenverbesserung erreicht** wurde. Insbesondere auf geringmächtigen Standorten macht der Auftragsboden etwa ein Drittel des verfügbaren Wurzelraumes aus und verbessert so Wasserhaushalt und Fruchtbarkeit. Einzig auf den Flächen des Kolluviums mit ohnehin vergleichsweise tiefgründigen und schluffigen Böden ist eine Bodenverbesserung nicht zu sehen. Die Durchwurzelung reicht aber auch hier deutlich über den Auffüllhorizont hinaus, eine Verschlechterung kann daher ebenfalls ausgeschlossen werden. Der Unterboden im Bereich einer als Erdweg angelegten Baustraße zeigt die höchsten Lagerungsdichtewerte. Hier wären eine noch intensivere Lockerung nach dem Rückbau oder Maßnahmen zur Vermeidung von Verdichtungen notwendig gewesen.

Dagegen zeigen die nicht fachgutachterlich betreuten **Vergleichsflächen Vaihingen-Riet, Enzweihingen und Ludwigsburg-Poppenweiler** ein anderes Bild. In Vaihingen-Riet und Ludwigsburg-Poppenweiler kam wahrscheinlich Unterbodenmaterial zum Einsatz. Enzweihingen und Ludwigsburg-Poppenweiler zeigen deutlich zu hohe Auffüllmächtigkeiten. Innerhalb dieser sind meist Pflughorizonte zu finden, an deren Unterkante

häufig Eindringwiderstände gemessen wurden, die in Möglingen selbst in Pflugsohlen von gepflügten Referenzflächen der Umgebung nicht erreicht wurden. In Vaihingen-Riet und Enzweihingen wurde zudem, entgegen den Auflagen für die Auffüllungen, keine Luzerne angebaut oder höchstens im ersten Jahr. In Poppenweiler wird auf einer Teilfläche Luzerne angebaut, eine andere Teilfläche war zum Zeitpunkt der Untersuchung gepflügt. Doch selbst auf der mit Luzerne bebauten Fläche war innerhalb der deutlich zu mächtigen Auffüllung eine Pflugsohle auszumachen. Auf allen Vergleichsflächen muss nach den vorliegenden Daten eine **Bodenverschlechterung** befürchtet werden. Da über das genaue technische Vorgehen auf diesen Flächen keine Details bekannt waren kann nur vermutet werden, dass schon dabei Fehler gemacht wurden.

Der **Einsatz des Penetrologger** ermöglicht mit geringem Aufwand das Erkennen und Lokalisieren von verdichteten Horizonten und erlaubt aufgrund der guten Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Lagerungsdichte eine Einschätzung der Intensität der Verdichtung. Eine Messung von absoluten, möglicherweise gar gerichtsfesten Werten zur Identifikation von Schadverdichtungen ist nicht möglich, da Faktoren wie Bodenfeuchte und Bodenart das Ergebnis stark beeinflussen. Wichtig ist daher, dass bei Messungen an verschiedenen Tagen auf eine vergleichbare Bodenfeuchte geachtet wird und dass Werte von verschiedenen Flächen nicht miteinander verglichen werden, ohne die Bodenart zu berücksichtigen. Idealerweise wird auf einer Fläche schon vor der Auffüllung bei bestimmten Feuchtebedingungen gemessen, um bei Messungen nach der Auffüllung Vergleichswerte zu haben. **Das Erkennen und Lokalisieren von Verdichtungen mit dem Penetrologger kann auf Oberbodenauffüllungen gut eingesetzt werden.** Der Grund für einen Anstieg des Eindringwiderstands muss aber durch ein Profil, zweckmäßigerweise ein Bohrstockprofil, überprüft werden. Bei der reinen Untersuchung von Flächen auf Verdichtungen kann zunächst der Penetrologger hergenommen werden, erst wenn während der Arbeit Anstiege des EW angetroffen werden, sollten diese möglichst umgehend überprüft werden. Sollen gerichts feste Werte zur Feststellung von Schadverdichtungen ermittelt werden, müssen andere Methoden eingesetzt werden.

Eine der wichtigsten **Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige Oberbodenauffüllungen** im Rahmen von naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen ist die **konsequente Planung und Begleitung durch Fachgutachter**. Der Vergleich der entsprechend geplanten und begleiteten Fläche in Möglingen mit 3 nicht fachgutachterlich betreuten Maßnahmen, die ebenfalls als Ausgleichsmaßnahmen anerkannt wurden, zeigt, dass durch die fachliche Betreuung ein wesentlich besseres Ergebnis erreicht werden kann.

Die Planung und Begleitung durch Sachverständige hat sich offensichtlich bewährt und hat einen großen Einfluss auf die Erfolgssicherung bei Oberbodenauffüllungen. Die Planung von Oberbodenauffüllungen muss weiterhin konsequent darauf abzielen, schädliche Einflüsse, insbesondere Verdichtungen, zu verhindern. Dazu sollten auch andere Methoden, beispielsweise der Bodenauftrag mit Baggern statt mit Raupen, durchdacht und möglicherweise auch eingesetzt werden. Die Lockerung des Bodens muss ausreichend tief sein, um möglicherweise entstandene Verdichtungen sicher zu beseitigen. Die notwendige Technik, beispielsweise die Abbruchlockerung, hat sich bereits bewährt und muss nur eingesetzt werden. Äußerst wichtig ist aber die Einhaltung der zulässigen Auftragsmächtigkeit. Damit lassen sich zahlreiche Probleme bereits begrenzen oder deren Lösung vereinfachen. Ein Patentrezept für die Einhaltung der Auffüllmächtigkeit gibt es nicht. Der beste Kompromiss muss noch gefunden werden. Technische Lösungen aus dem Tiefbau wie auch einfache Lösungen wie der Einsatz von markierten Pflöcken haben alle ihre Vor- und Nachteile.

Die Auffüllung Bühl in Möglingen zeigt, dass die bisherige Vorgehensweise beim Auftrag von Oberboden grundsätzlich geeignet ist, eine Bodenverbesserung zu erzielen. Nichtsdestotrotz bleiben einige Probleme, an denen es Verbesserungsmöglichkeiten gibt. Diese sollten, wenn die lokalen Verhältnisse es nicht verbieten, bei weiteren Oberbodenauffüllungen in naher Zukunft ausprobiert werden, um Erfahrungen damit zu sammeln und so das Wissen um die optimale Vorgehensweise zu erweitern. Weitere Untersuchungen auf der Auffüllfläche Bühl gegen Ende des Luzerneanbaus und möglicherweise noch später können weitere Erkenntnisse über die Entwicklung einer Auffüllfläche bringen.

Insgesamt können **Oberbodenauffüllungen auch in Zukunft als naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahme empfohlen** werden, unter der Bedingung, dass sie fachgerecht geplant und durchgeführt werden. Mit der fachgerechten Durchführung steht und fällt die Qualität der Auffüllung, die gerade beim Einsatz als Ausgleichsmaßnahme entscheidend ist. Wenn an einer Stelle durch eine Neuerschließung ein schwerwiegender Eingriff in den Boden geschieht, ist es kontraproduktiv, zum vermeintlichen Ausgleich den Boden an anderer Stelle zusätzlich zu Schädigen. Denn letztendlich ist der Boden mit seinen Funktionen nicht nur die Lebensgrundlage von uns Menschen, sondern die aller Lebewesen, und diese Lebensgrundlage muss geschützt werden.

8 Quellennachweise

Gesetze, Verordnungen, Normen, Karten

- BK: Bodenkarte 1:25.000; Blätter: 7021 Marbach am Neckar (1997), 7119 Rutesheim (1994), 7120 Stuttgart-Nordwest (1993), 7121 Stuttgart-Nordost (1993); Geologisches Landesamt Baden-Württemberg
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214).
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758).
- BundesNaturschutzGesetz (BNatSchG) vom 25. März 2002 (BGBl. I S. 1193), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666).
- DIN 19731 (1998): Bodenbeschaffenheit – Verwertung von Bodenmaterial. - 13 S., Berlin
- DIN ISO 11272 (2001): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohdichte. - 10 S., Berlin
- GK: Geologische Karte 1:50.000; Stuttgart und Umgebung (1998); Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden Württemberg
- NaturschutzGesetz (NatSchG) BW, vom 13. Dezember 2005, GVBl S. 745, ber. GVBl 2006 S. 319.
- TOP 25 Baden-Württemberg Nord; CD-Rom Version 2, 2004; Landesvermessungsamt Baden-Württemberg

Literatur und Internet

- ATKINSON D. & L. A. DAWSON (2000): Root Growth: Methods of Measurement. - S. 435-497, in: SMITH K. A. & C. E. MULLINS (2000): Soil and Environmental Analysis – Physical methods. - 2nd edition, 656 S., New York
- BESTE A. (2002): Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. - 128, Mainz
URL: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2003/892/> [2008-03-02]
- BLUME H.-P. (Hrsg.) (2004): Handbuch des Bodenschutzes. - 3. Auflage, 913 S., Landsberg
- BÖHM W. (1979): Methods of studying root systems. - Ecological Studies 33, Springer Verlag, 188 S., Berlin
- BORCHERT H. & R. GRAF (1988): Zum Vergleich von Penetrometermessungen, durchgeführt bei unterschiedlichem Wassergehalt. - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 151, S. 69-71.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hrsg.) (2000): Wiederherstellungsmöglichkeiten von Bodenfunktionen im Rahmen der Eingriffsregelung. - Angewandte Landschaftsökologie 31, 206 S., Bonn

- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (Hrsg.) 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. - 5. Auflage, 438 S., Hannover
- DEXTER A.R., E.A. CZYZ & O.P. GATE (2007): A Method for prediction of soil penetration resistance. - Soil & Tillage Research 93, S. 412-419.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2006): Mittelwerte des Niederschlags für den Zeitraum 1961-1990.
URL: http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download__mw__nieder,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download_mw_nieder.zip [2008-07-03]
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2007): Mittelwerte der Temperatur für den Zeitraum 1961-1990.
URL: http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download__mw__temp,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download_mw_temp.zip [2008-07-03]
- EIJKELKAMP (2007): Gebrauchsanweisung – 06.15.SA Penetrologger-Set. - 37 S., Giesbeek
URL: <http://www.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/M1-0615SAd%20Penetrologger.pdf> [2008-01-25]
- FABO (Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich) (2005): Ergebnisse von Qualitätskontrollen bei Bodenrekultivierungen. - 4 S., Zürich
URL: <http://www.fabo.zh.ch/etc/medialib/bd/aln/fabo/bauen/pdf.Par.0030.File.dat/Kurzbericht.pdf> [2008-06-19]
- FELDWISCH N. (2002): Bodenfunktionen in der Eingriffsregelung. - NNA-Berichte 15 (2002/1) „Neue Wege im Boden- und Gewässerschutz“, S. 93-100
URL: http://www.ingenieurbuero-feldwisch.de/pdf/feldwisch_nna_1_2002.pdf [2008-06-18]
- FRIEDRICH G., S. SADOWSKI, B. CRAMER & H. FRANKEN (2001): Penetrometermessungen zur Erfassung von Bodenverdichtungen, Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz in ausgewählten Regionen in NRW. - Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr.92b, S. 114 – 124.
URL: <http://www.usl.uni-bonn.de/pdf/Forschungsbericht%2092b.pdf> [2007-12-13]
- GLA (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg) (Hrsg) (1995): Symbolschlüssel Bodenkunde. - In: Informationen 5/95, S. 37-67.
- HARTGE K. H. & J. BACHMANN (2004): Ermittlung des Spannungszustandes von Böden aus Werten des Eindringwiderstandes von Sonden. - Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences 167, S. 303-308.
- KOCH H.-J. & S. KROHN (2008): Das Naturschutzrecht im Umweltgesetzbuch – Den Auftrag der Föderalismusreform erfüllen. - Forum Umweltgesetzbuch 7, 36 S., Dessau-Roßlau
- LABO (Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (Hrsg) (2002): Vollzugshilfe zu §12 BBodSchV - Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung). - 41 S.
URL: http://www.labo-deutschland.de/pdf/12-Vollzugshilfe_110902.pdf [2007-11-30]

- LEBERT M., J. BRUNOTTE & C. SOMMER (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. - Umweltbundesamt Texte 46/04, 128 S., Berlin
- LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg) (Hrsg) (2000a): Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung in der Bauleitplanung - Arbeitshilfe für die Naturschutzbehörden und die Naturschutzbeauftragten. - Naturschutz – Praxis, Eingriffsregelung 3, 96 S., Karlsruhe
- LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg) (Hrsg) (2000b): Erhebungsuntersuchungen zur Qualität von Geländeauffüllungen – Bewertung von Auftragsböden nach ihrer Leistungsfähigkeit. - Bodenschutz, 93 S., Karlsruhe.
URL: <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/print/bs04.pdf> [2007-11-05]
- LRA LB (Landratsamt Ludwigsburg) (2006): Akten zu den Auffüllungen auf den Vergleichsflächen. (interne Unterlagen)
- LRA LB (Landratsamt Ludwigsburg) (Februar 2006): Auffüllungen auf Landwirtschaftlichen Flächen. - Faltblatt, Ludwigsburg.
URL: <http://www.landkreis-ludwigsburg.de/fileadmin/kreis-lb.de/pdf-dateien/buerger-info/umwelt-und-verbraucher/naturschutz/service-genehmigungen-infos/merckblatt-auffuellungen.pdf> [2007-12-03]
- ÖPF (Ökologie•Planung•Forschung) (2006a): Bodenmanagement für den Bodenauftrag im Gewann „Bühl“, Gemeinde Möglingen – als Ausgleichsmaßnahme für Eingriffe in das Schutgut Boden im Zusammenhang mit den Bebauungsplänen „Beim Bierkeller“ und „Hasenkreuz“ in Möglingen. - Projektbericht des Büros Ökologie•Planung•Forschung vom 25.07.2006, (interne Unterlagen)
- ÖPF (Ökologie•Planung•Forschung) (2006b): Baustellenprotokolle – Bodenmanagement für den Bodenauftrag im Gewann „Bühl“. (interne Unterlagen)
- ÖPF (Ökologie•Planung•Forschung) (2006c): Abschlussdokumentation – Bodenmanagement für den Bodenauftrag im Gewann „Bühl“. (interne Unterlagen)
- OKOPNIK F. (2005): Terrainveränderungen mit Aushubmaterial – mehr Natur oder Schaden? - Umwelt Aargau (30), S. 11-14
URL: http://www.ag.ch/umwelt-aargau/pdf/UAG_30_11.pdf [2008-06-26]
- PETRASEK M. & A. PAZELLER (2003): Beurteilen der Qualität von Geländeauffüllungen mit der Bodengefügeanalyse nach FAL. - 15 S., Ingenieurbüro für Agrarökologie Pazeller, Richterswil
URL: <http://www.pazeller.ch/downloads/gelaendeauffuellungen.pdf> [2008-03-03]
- REESKE-MANTHEY A. (2005): Die Umsetzung der Eingriffsregelung in Nordrhein-Westfalen: Wege zu einer flächenschonenden Ausgestaltung unter Beteiligung der Landwirtschaft. - Bonner Studien zur Wirtschaftssoziologie 25, 247 S., Bad-Neuenahr – Ahrweiler
- ROWELL D. L. (1997): Bodenkunde – Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. - Springer Verlag, 614 S., Berlin
- SCHEFFER F. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde – Scheffer/Schachtschabel. - 15. Auflage neu bearbeitet und erweitert, Spektrum Akademischer Verlag, 593 S., Heidelberg
- SCHRÖDER D. & R. SCHNEIDER (2004): Beurteilung und Vermeidung von anthropogenen Boden(schad)verdichtungen. - Berichte über Landwirtschaft 82 (2), S. 173 – 187

- SCHULTE-KARRING M. (1999): Auswirkungen von Tieflockerungsmaßnahmen erstaufgeforsteter flachgründiger Ackerstandorte in Eifel und Hunsrück auf Bodeneigenschaften und Wuchsleistung. - Berichte aus der Geowissenschaft, Shaker Verlag, 146 S., Aachen
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2002a): Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes. Sondergutachten. - Bundestagsdrucksache 14/9852, 211 S., Berlin
URL: http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/sonderg/SG_Naturschutz_2002.pdf [2008-06-18]
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2002b): Umweltgutachten 2002 – Für eine neue Vorreiterrolle. - Bundestagsdrucksache 14/8792, 550 S., Berlin
URL: http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/umweltg/UG_2002.pdf [2008-06-19]
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2008): Umweltgutachten 2008 – Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. - 1040 S., Berlin
URL: http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/umweltg/UG_2008.pdf [2008-06-19]
- Stadt Leonberg (2008): Bebauungsplan „Blosenbergr“ - 1. Änderung des Bebauungsplans. - Beschlussvorschlag an den Gemeinderat. Drucksache 2008 Nr. P 6/1 ö, Anlage 10 „Umweltbericht zum Bebauungsplan mit integrierter grünordnerischer Fachbeitrag“, Stand 17.07.2008
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (Hrsg) (1991): Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. - Luft Boden Abfall Heft 10, 40 S., Stuttgart.
URL: <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/print/lba10.pdf> [2007-11-30]
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (Hrsg) (1994): Leitfaden zum Schutz der Böden beim Auftrag von kultivierbarem Bodenaushub. - Luft Boden Abfall Heft 28, 27 S., Stuttgart.
URL: <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/print/heft28.pdf> [2007-11-30]
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (Hrsg) (1995): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit – Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren. - Luft Boden Abfall Heft 31, 57S., Stuttgart
URL: <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/print/lba31.pdf> [2007-11-30]
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (Hrsg) (2006): Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung – Arbeitshilfe. - 23 S., Stuttgart.
URL: http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/25015/Arbeitshilfe_Schutzgut_Boden.pdf?command=downloadContent&filename=Arbeitshilfe_Schutzgut_Boden.pdf [2007-11-26]
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (2008a): Pressemitteilung 14.07.2008
URL: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/47009/> [2008-07-15]
- UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) (2008b): Umweltinformationssystem Themenpark Umwelt
URL: <http://www.themenpark-umwelt.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14383/?path=4422;6114;&> [2008-07-02]