

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis

Teil I: Validierung von Pedotransferfunktionen

Thomas Vorderbrügge* und Joachim Brunotte**

Zusammenfassung

Ein wichtiges Thema der nationalen und internationalen Diskussion zur Bodenschutzstrategie der EU ist die Erstellung von fachlichen Grundlagen und Kriterien zur Ausweisung so genannter „Risikogebiete“. In diesen Gebieten sollen Gefährdungen der Böden bspw. durch Erosion, Verlust an organischer Substanz oder Verdichtung in einer kritischen Größenordnung auftreten.

Mangels einer ausreichend validen und plausiblen Datengrundlage zum Status der Bodenverdichtung bzw. zur Verdichtungsanfälligkeit der Böden in Deutschland, insbesondere der Unterböden, kommt es zu einer vermehrten Anwendung von Regressionsmodellen (Pedotransferfunktionen) zur Berechnung der Gefährdung durch Verdichtung. Auswertungen hierzu finden sich für die unterschiedlichsten Maßstabsebenen, von „parzellenscharf“ bis hin zu einer bundesweit flächendeckenden Auswertung im Maßstab 1:1.000.000. Der Einsatz dieser Pedotransferfunktionen ist allerdings nicht unproblematisch, zum einen aufgrund ihres umfassenden Bedarfs an Eingangsdaten, zum anderen aber auch aufgrund der aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes noch unzureichenden Überprüfung der Ergebnisse im Hinblick auf Repräsentativität, Reproduzierbarkeit, Plausibilität und Validität. Es mangelt zudem an Untersuchungen in denen Ergebnisse einer Prognose den entsprechenden Messwerten gegenübergestellt werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie wichtig es ist, modellierte mit gemessenen Werten zu vergleichen, Pedotransferfunktionen im Hinblick auf ihre Gültigkeit und ihren Gültigkeitsbereich zu hinterfragen und flächendeckende Aussagen in Form einer Karte kritisch zu begleiten, nicht zuletzt unter dem Aspekt der aktuellen Vorschläge zur Definition von Vorsorgewerten im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes.

Schlüsselwörter: Bodenschutz, Bodenverdichtung, Unterbodenverdichtung, Bodenschutzstrategie, Bodenschutzrahmenrichtlinie, Risikogebiete, Verdichtungsgefährdung, Vorsorgewerte, Vorbelastung, Bodenschadverdichtung, Pedotransferfunktionen, Validierung, Bodengefüge

* Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dezernat Bodenschutz und Bodeninformationen, Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden; E-Mail: thomas.vorderbruegge@hlug.hessen.de

** Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: joachim.brunotte@vti.bund.de

Abstract

Vulnerability to compaction of agricultural subsoils – validation of pedotransfer function for identification of risk areas in Europe and a practicable solution for good farming practice that avoids subsoil compaction

Part I: Validation of pedotransfer function

An essential part of the European soil strategy is the development of criteria and basic information for threats to soil quality in Europe. The characterisation of soil degradation risk by erosion, the loss of organic carbon or subsoil compaction is an important aspect in developing that strategy.

But there is still a lack of valid data on the status of subsoil compaction and the susceptibility of subsoils to compaction respectively. Therefore, a lot of models (pedotransferfunctions) have been developed to estimate the susceptibility of subsoils to compaction. These functions are applied in precision agriculture (farm level) up to a scale of 1:1.000.000. The use of these functions seems to be problematic. On the one hand there is a great need of data, on the other hand there is only a poor validity of the models. The comparison of measured data with modeled data is rare as well and often shows a weak correlation between.

This paper shows the significance of comparing modeled data with measured data, of defining the validity of the models and of checking the proposals regarding new definitions of values for assessment of subsoil compaction.

Keywords: Soil conservation strategy, soil compaction, soil framework, risk areas, subsoil compaction, pre compression stress, pedotransferfunction, soil structure, validation, pedotransfer rules

1 Einleitung

In ihrem „Zweiten Bodenschutzbericht“ veröffentlichte die Bundesregierung eine Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete“ (Bt.-Drs. 16/12658, 2009). Diese Karte ist Ergebnis einer Studie, die im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführt wurde (Lebert, 2008; Glante et al., 2009; Lebert & Marahrens, 2009; Marahrens & Lebert, 2009). Sie kann als ein erster Versuch gesehen werden, eine Methode zur Ausweisung von „risk areas“ (Eckelmann et al., 2006; van den Akker & Simota, 2007) im Sinne der Bodenschutzstrategie der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KOM(2002)179 end. 2002, KOM(2006)232 end. 2006; Bas et al., 2008) vorzustellen. Aufgrund der z. Zt. vorherrschend kritischen Haltung gegenüber einer Bodenschutz-Rahmenrichtlinie (BSRRL) der Kommission sollte die methodische Grundlage der Karte unbedingt valide sein. Ansonsten wären Schlussfolgerungen, die sich aus dieser Karte ziehen lassen, sowie mögliche Konsequenzen für den vorsorgenden Bodenschutz bzw. für die Beratung und Praxis kaum von einem breiten fachlichen Konsens gestützt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die in den Karten ausgewiesenen Gebiete unterschiedlicher „Verdichtungsempfindlichkeit“ nicht automatisch gleichzusetzen sind mit dem dort vorzufindenden tatsächlichen Gefügezustand der Unterböden (Brunotte et al., 2008).

Bodenkundliche Grundlage der Karte ist die „Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000, Version 2.3“ (BÜK 1000 N) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Richter et al., 2007). Methodische Grundlage sind die im Rahmen der erwähnten UBA-Studie verifizierten und modifizierten Pedotransferfunktionen zur Ableitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit nach DVWK (1995, 1997), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002). Die UBA-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass über 50 % der ackerbaulich genutzten Flächen im Unterboden bei einer der Feldkapazität (pF 1,8) entsprechenden Bodenfeuchte eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen. Besonders betroffen sind danach die Böden der Jungmoränenlandschaften, des Lössgürtels, des Tertiärhügellandes sowie der Marschen im Küstenbereich (Bt.-Drs. 16/12658, 2009). Nach dieser Karte ist z. B. für Hessen der Anteil an Böden mit einer hohen Verdichtungsempfindlichkeit äußerst groß, u. a. aufgrund des großen Anteils lössbürtiger Böden. Auch für Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Bayern werden großräumig Flächen mit Böden hoher Verdichtungsempfindlichkeit ausgewiesen.

Die Entwicklung des Verfahrens zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit resp. mechanischen Verdich-

tungsempfindlichkeit wird in der UBA-Studie ausführlich dargestellt (Lebert, 2008). Als bodenphysikalischer Kennwert für die mechanische Belastbarkeit dient die so genannte Vorbelastung (Pv). Sie ist ein summarischer Ausdruck für die „Festigkeit“, die „Widerstandskraft“ des Bodengefüges gegenüber einer (zusätzlichen) mechanischen Belastung. Die Definition gemäß DIN (1998) lautet: **Vorbelastung** (Kehrwert der Verdichtungsempfindlichkeit) – „höchstmöglicher Belastungswert, bis zu dem der ungesättigte, strukturierte Boden nicht zusätzlich irreversibel bzw. bleibend verformt wird“. Die metrischen Angaben dieser Größe erfolgen in kPa.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden zunächst die methodischen Grundlagen und die wichtigsten Ergebnisse der UBA-Studie (Lebert, 2008) dargestellt. Darauf aufbauend werden die im Rahmen der UBA-Studie entwickelten Pedotransferfunktionen im Hinblick auf Validität und Übertragbarkeit überprüft. Im zweiten Teil der Arbeit wird aufgezeigt, ob die von Horn et al. (2009) publizierten Grenzwerte der Vorbelastung eine Grundlage für das Wertesystem des Vorsorgenden Bodenschutzes i. S. des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) bzw. der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) sein können. Weiterhin wird dargelegt, ob die Ergebnisse der UBA-Studie, insbesondere die dort verifizierten bzw. neu formulierten Transferfunktionen, geeignet sind, „risk areas“ im Sinne der BSRRL auszuweisen. Der dritte Teil dieser Arbeit beschreibt den aktuell in der Fachliteratur beschriebenen Status der Unterbodenverdichtung in Europa, sowie die z. Zt. diskutierten Verfahren zur Ausweisung von Risikogebieten gemäß BSRRL. Im vierten Teil wird ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis aus anwendungsorientierten Versuchen entwickelt. Er soll den Betrieben bei der Planung von Investitionen und vom Maschineneinsatz helfen und eine Erfolgskontrolle ermöglichen.

Ziel dieser Beiträge ist es, die aktuelle Diskussion zur Flächenbezogenen Bewertung und Darstellung der mechanischen Bodenbelastbarkeit sowie zu Vorschlägen von Grenzwerten der Vorbelastung durch die Ergebnisse einer Validierung der Transferfunktionen kritisch zu begleiten und mögliche Fehlentwicklungen aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes aufzuzeigen.

2 Methodik und Ergebnisse der UBA-Studie „Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ (Lebert, 2008)

Für die Herleitung des neuen Ansatzes standen Lebert (2008) „Messwerte“ der Vorbelastung von 180 Unterbodenhorizonten aus ca. 90 Profilen unter ackerbaulicher Nutzung zur Verfügung. Eine wesentliche Grundlage wa-

ren die Werte, die bereits für die Herleitung der Pedotransferfunktionen (PTF) nach DVWK (1995, 1997), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002) genutzt wurden. Streng genommen handelt es sich bei den „Messwerten“ nicht um eine tatsächliche Messung der Vorbelastung, sondern um „auf Messungen beruhenden Drucksetzungskurven mit Ableitung der Vorbelastung nach Casagrande“ (Brandhuber, 2010). Sie werden aber als „Messwerte“ bezeichnet, um sie im Folgenden sprachlich eindeutig von den Schätzwerten nach DVWK (1995) bzw. der DIN-V-19688 (1998) unterscheiden zu können.

Die 180 Datensätze wurden in Anlehnung an die vier Bodenartenhauptgruppen (Sand, Schluff, Lehm und Ton) der Bodenkundlichen Kartieranleitung, (5. Auflage – KA5) (Ad-hoc-AG Boden, 2005) in fünf Gruppen unterteilt: „Hochprozentige“ Sande, Sande mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff (Sandlehme, Schluffsande und der S13), Schluffe, Lehme sowie Tone (Tabelle 1). Dies wird damit begründet, dass im Vergleich zu den lehmigen und tonigen Bodenartengruppen bei den Bodenartenuntergruppen dieser neuen Gruppe die Trockenrohdichte und nicht das Gefüge, definiert über die Parameter „Kohäsion“ oder den „Winkel der inneren Reibung“, einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Vorbelastung habe.

Mit den Daten wurde nun für die fünf Gruppen der Zusammenhang zwischen Rohdichte und Vorbelastung

berechnet. Die entsprechenden Regressionen sowie die zugehörigen Bestimmtheitsmaße sind in der Tabelle 2 angeführt.

Die vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaße von 7 bis 54 % sind Ausdruck einer sehr weiten Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade. Es fällt auf, dass neben der Steigung auch das für die Gruppe „Sande (II)“ ermittelte Bestimmtheitsmaß von ca. 26 % deutlich geringer ist, als das für die Gruppe der Schluffe mit ca. 48 %. Dies Ergebnis entspricht nicht ganz der Erwartung, da gemäß Begründung zur Stratifizierung der Bodenarten in der UBA-Studie (Lebert, 2008) bei dieser Gruppe der Einfluss der Trockenrohdichte auf die Vorbelastung eindeutiger und größer sein soll als für die tonreicheren Bodenartenuntergruppen.

Mangels einer ausreichend großen Grundlage an tatsächlich gemessenen Daten der Vorbelastung, die zudem repräsentativ für die in Deutschland vorkommenden Bodenformen sein soll, wurde im Rahmen der UBA-Studie eine erweiterte Schätzdatengrundlage geschaffen. Hierzu dienten bodenphysikalische Daten der Umweltbehörden, vor allem aus den Monitoringprogrammen wie z. B. der Bodendauerbeobachtung. Die von den Bundesländern zur Verfügung gestellten Daten stammen von ca. 1.300 Standorten mit insgesamt ca. 3.400 beprobten Horizonten. Für diese Proben gibt es, wie bereits erwähnt, keine Mess-

Tabelle 1:

Aufteilung der Bodenarten und Anzahl der verwendeten Datensätze für die Schätzung der Vorbelastung (Lebert, 2008) sowie die entsprechende Gruppierung nach „Bodenkundlicher Kartieranleitung – KA5“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Bodenartengruppe	Anzahl Datensätze
„Hochprozentige“ Sande	
Sande mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff (Sandlehme, Schluffsande und der S13)	
Schluffe	
Lehme	
Tone	

Tabelle 2:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte (x) und gemessener Vorbelastung (y) bei pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen (Lebert, 2008)

Bodenartengruppe	Regressionsgerade	Bestimmtheitsmaß
„Hochprozentige“ Sande		
Sande mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff (Sandlehme, Schluffsande und der S13)		
Schluffe		
Lehme		
Tone		

daten der Vorbelastung. Sie wurde deshalb nach den drei Verfahren DVWK 234 (1995), ATV-DVWK 901 (2002) und DIN-V-19688 (1998) geschätzt. Für jeden Horizont lagen als Grundlage für das weitere Vorgehen in der UBA-Studie somit die bodenphysikalischen Messwerte und jeweils drei zugehörige Schätzwerte der Vorbelastung vor.

Analog zum Vorgehen bei den 180 Messdaten wurde der Zusammenhang zwischen der Trockenrohdichte_(gemessen) und der Vorbelastung_(geschätzt) jeweils für die Schätzwerte nach DVWK 234 (1995), ATV-DVWK 901 (2002) und DIN V19688 (1998) ermittelt. Die entsprechenden Regressionen zeigt Tabelle 3. Für die Ableitung der Regressionsgeraden zwischen Trockenrohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) wurden die gleichen Daten der Trockenrohdichte genutzt, die vorher für die Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung eingesetzt wurden. Dies ist bei der Beurteilung der Regressionen in Tabelle 3 zu berücksichtigen, da die Trockenrohdichte, vor allem bei den tonärmeren Bodenarten, gleichzeitig ein sehr sensibler Parameter in den PTF nach DVWK (1995), ATV-DVWK (2002) und DIN (1998) ist, die Frage einer Autokorrelation somit durchaus ein wichtiger Aspekt sein könnte.

Tabelle 3:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte (x) und *geschätzter* Vorbelastung (y) nach DVWK 234 (1995), ATV-DVWK-901 (2002) und DIN-V-19688 (1998) bei pF 1,8, getrennt nach den fünf Bodenartenhauptgruppen sowie nochmals die Angaben für die Regressionsgeraden auf Basis der *Messdaten* (s. Tabelle 2) („**fett**“ dargestellt sind die in der UBA-Studie als „geeignet“ ausgewählten Regressionen).

Aus der grafischen Gegenüberstellung der Streudiagramme der **messwert**basierten Trends mit den Streudiagrammen der **schätzwert**basierten Trends schließt die UBA-Studie, dass für die „hochprozentigen“ Sande die plausibelsten Ergebnisse mittels PTF nach DVWK 234 (1995), für alle anderen Bodenartenhauptgruppen hingegen mittels PTF nach DIN-V-19688 (1998) erreicht werden. Die Auswahl der geeigneten Transferfunktion erfolgte somit nicht anhand des „besten“ Bestimmtheitsmaßes, wie am Beispiel der Schluffe deutlich zu erkennen ist. Hier ergibt der Ansatz nach DVWK 234 (1995) ein Bestimmtheitsmaß von 74 %, der Ansatz nach DIN-V-19688 (1998) hingegen nur von 45 %. Da aber der visuelle Abgleich der Schätzwerte nach DVWK 234 (1995) mit den gemessenen Werten eine deutliche systematische Überschätzung ergab, hingegen die Schätzwerte nach DIN-V-19688 (1998) nur eine Überschätzung im Bereich geringer Trockenrohdichten, wurde die Schätzung nach DIN-V-19688 (1998) als plausibel und für das weitere Verfahren als am besten geeignet angesehen.

Die Auswahl der am besten geeigneten PTF zur Ableitung der Vorbelastung_(geschätzt) erfolgte somit nicht mittels eines statistisch gestützten Methodenvergleichs, z. B. anhand eines Fehlermaßes wie dem RMSE (Root Mean

Square Error, Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler; Willmott, 1981). Sie erfolgte visuell nach der grafisch geringsten Abweichung, also der Abschätzung einer systematischen Unter- oder Überschreitung der Schätzwerte der auf der Basis der Messwerte abgeleiteten Regressionsgeraden.

Ein Ziel der UBA-Studie ist es, den Leitprofilen der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007) für den Bereich des Unterbodens Werte der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit zuordnen zu können. Darüber lassen sich die Ergebnisse regionalisieren und „empfindliche“ Gebiete in Form einer Karte darstellen bzw. ausweisen. Da in den Legenden bzw. den Flächendaten der Leit- und Begleitprofile von Bodenkarten häufig die effektive Lagerungsdichte (Ld) angeführt wird und diese auch eine Vergleichbarkeit über alle Bodenartenuntergruppen erlaubt (Lebert, 2008), wurden die entsprechenden Regressionen für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung_(geschätzt) abgeleitet. So kann man, in Abhängigkeit von der Ld, die entsprechenden Schätzwerte der Vorbelastung den Leitprofilen der Legendeneinheiten zuordnen. Für die Gruppe der „hochprozentigen“ Sande erfolgte dies auf Basis der Vorbelastungswerte, die mit der Regression „**Schätzwerte** nach DVWK 234“ (1995) abgeleitet wurden. Für die übrigen Gruppen waren die Vorbelastungswerte Grundlage, die mit der entsprechenden Regression „**Schätzwerte** nach DIN-V-19688“ (1998) abgeleitet wurden.

In den Flächendaten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007; Adler, 2008) wird allerdings nicht die Ld angeführt sondern die Trockenrohddichte. Wie die jeweilige Ld für die Unterbodenhorizonte der Leitprofile der „BÜK 1000 N“ (Richter et al., 2007) festgelegt wurde, ist der UBA-Studie nicht eindeutig zu entnehmen.

Da für die Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ nicht die Bodenartenhauptgruppen, sondern die Bodenartenuntergruppen angeführt werden und der Ansatz auch für die Methodenbanken der einzelnen Bundesländer anwendbar sein soll, wurden in der UBA-Studie die Zusammenhänge nun für die Bodenartengruppen berechnet. Allerdings auch hier mit einer Änderung im Vergleich zur Systematik der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Als Ergebnis einer weiteren Plausibilitätsprüfung wurden die Daten mit der Bodenart SI3 nicht der Gruppe der Lehmsande, sondern der Gruppe der Sandlehme zugeordnet.

Die Tabelle 4 zitiert die 11 Regressionen für den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN V 19688 (1998) aus der UBA-Studie.

Die relativ geringen Bestimmtheitsmaße von 23 – 68 % der sandarmen Texturgruppen sind Ausdruck der sehr großen Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade, obwohl die der Ld zugrunde liegende Trockenrohddichte als äußerst sensibler Parameter bereits in die Schätzung der Vorbelastung nach DVWK (1995), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002) mit eingeflossen ist. Für die Reinsande und Lehmsande ergeben die Regressionen erst ab einer Ld von 1,22 bzw. 1,32 positive Werte der Vorbelastung, d. h. bei Werten der Ld von < 1,22 bzw. 1,32 errechnen sich negative, und damit nicht plausible Werte der Vorbelastung.

Schließlich wurde aus den Messwerten der Daten der Ld aus den Bundesländern eine Matrix mit den Mittelwerten für die fünf Klassen der Ld, jeweils für die einzelnen Bodenartenuntergruppen, erstellt. Damit wurde überprüft, ob die tatsächlichen Mittelwerte der Daten aus den Bundesländern mit den Klassen-Mittelwerten der KA5 übereinstimmen. Da diese Übereinstimmung vorlag, konnten mit Hilfe der Regressionsgeraden der Tabelle 4 für die einzelnen Bodenartengruppen

Tabelle 4:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte_(errechnet) (x) und Vorbelastung_(geschätzt) (y) nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) bei einer Wasserspannung von pF 1,8 für die 11 Bodenartengruppen (Lebert, 2008).

Tabelle 5:

Beispielhafte Ableitung der Werte der Vorbelastung (Pv) mittels Transferfunktion in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (Ld) für die Bodenartengruppe „II“ als Grundlage für eine Zuordnung mittlerer Vorbelastungswerte von einzelnen Horizonten mit den Bodenarten Lt2, Ls2, Ls3 oder Ls4 der Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007).

	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
Anzahl	9	10	109	242	52
Ø Ld -Messwerte	1,36	1,51	1,71	1,91	2,04
Ø Ld nach KA5	1,30	1,50	1,70	1,90	2,05
Transferfunktion	$y = 128,64 \times (\text{Ld nach KA5}) - 131,75$				
Ø Pv in kPa	35	61	87	113	132

die zugehörigen Werte der Vorbelastung für die jeweiligen fünf Klassenmittelwerte der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) berechnet werden. In der Tabelle 5 ist dies beispielhaft für die Bodenartengruppe der Normallehme (II) dargestellt.

Eine Legendeneinheit der „BÜK 1000 N“ mit einer Bodenartuntergruppe der Bodenartengruppe „II“, einer Ld der Klasse 3 und damit einer durchschnittlichen Vorbelastung von 87 kPa kann somit die entsprechende Stufe (hier: Stufe 3 = hoch) der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit zugeordnet werden. Mit Hilfe solch einer Matrix wird nun, in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte, allen Bodenartengruppen bzw. -untergruppen die entsprechende Klasse der Vorbelastung zugeschrieben.

Die im Rahmen der UBA-Studie entwickelten Transferfunktionen zur Ableitung der Vorbelastung auf Basis der Trockenrohdichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld) basieren somit auf:

1. 180 Messwerten der Vorbelastung für 90 Profile,
2. der Berechnung des Zusammenhanges zwischen Rohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(gemessen) für die 180 Werte, gruppiert gemäß den fünf definierten Bodenartenhauptgruppen,
3. Schätzung der Vorbelastung für ca. 3400 Horizontdaten von 1300 Standorten aus den Datenbeständen der Bundesländer nach den Methoden DVWK 234 (1995), DIN-V-19688 (1998) sowie ATV-DVWK 901 (2002),
4. Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens zur Schätzung der Vorbelastung,
5. Berechnung des Zusammenhanges zwischen Trockenrohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) für die 3400 Horizontdatensätze, getrennt nach Bodenartengruppen,
6. Berechnung der Regressionsgeraden zwischen effektiver Lagerungsdichte_(errechnet) und Vorbelastung_(geschätzt) für die 3400 Horizontdatensätze, getrennt nach den fünf Bodenartenhauptgruppen,
7. Ermittlung der jeweils fünf Klassenmittelwerte der effektiven Lagerungsdichte der einzelnen Bodenartengruppen für die ca. 3400 Datensätze der Bundesländer,

8. Erstellung der Matrix Vorbelastung_(geschätzt) in Abhängigkeit von den fünf Klassen der effektiven Lagerungsdichte auf Basis der Regressionsgeraden (s. Tabelle 4) und der mittleren Ld der jeweils fünf Klassen für alle Bodenartengruppen,
9. Zuordnung der Vorbelastung in Abhängigkeit von den Klassen der Ld und den Bodenartengruppen (s. bspw. Tabelle 5) für die einzelnen Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007) als Grundlage für die Darstellung in Form einer Karte.

3 Validierung der Pedotransferfunktionen (PTF) zur Schätzung der Vorbelastung anhand international publizierter Messdaten der Vorbelastung

Mit der Studie des UBA wurden seit 1981 insgesamt sieben Vorschläge von Transferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung publiziert. Eine ausführliche Übersicht der bisher publizierten Ansätze sowie die entsprechenden Quellen befinden sich in Tabelle 25 im 2. Teil dieser Arbeit. Durch die Publikation der Ergebnisse als „Karte der Verdichtungsempfindlichkeit“ im 2. Bodenschutzbericht der Bundesregierung bekommt dieser neue Ansatz naturgemäß einen anderen Stellenwert als ähnliche Auswertungen in Form von Karten mit dem Anspruch einer bundesweiten Gültigkeit aus dem Bereich der Forschung (Horn et al., 2001; 2002; 2005) oder aus Studien der EU wie ENVASSO, RAMSOIL, SIDASS oder SoCo (Kibblewhite et al., 2008; Horn et al., o.J.; Van den Akker & Simota, 2007; SoCo-Project Team, 2009). Zwar ist das UBA kein normsetzendes Gremium, von ihm publizierte Aussagen gelten allgemein aber als wissenschaftlich fundiert, validiert und reproduzierbar. Häufig entsteht zudem eine gewisse Eigendynamik in Verbreitung und Anwendung der zugrunde gelegten Methoden. Aus Sicht einer Fachbehörde des vorsorgenden Bodenschutzes eines Bundeslandes ist es deshalb durchaus geboten zu überprüfen, wie valide dieser Ansatz ist und ob die damit getroffenen Aussagen tatsächlich Grundlage für die Fragestellungen des vorsorgenden Bodenschutzes, insbesondere der Fragen der „Gu-

ten fachlichen Praxis“ (gemäß §17 BBodSchG) sowie des Vollzuges (§12 BBodSchV) sein können.

Aus diesem Grund wurde auf Basis von Literaturdaten das Verfahren des UBA und die dort postulierten Zusammenhänge zwischen Trockenrohichte bzw. effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung hinsichtlich ihrer statistischen Aussageschärfe und ihrer Reproduzierbarkeit überprüft.

3.1 Erstellung der Datengrundlage zur Validierung der Pedotransferfunktionen

Die Datengrundlage zur Validierung der Methode „Ableitung der Vorbelastung auf Grundlage der Trockenrohichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld)“ stammt aus 55 Publikationen des Zeitraums 1981 bis 2009 von 32 Erstautoren (s. h. Tabelle 6 sowie die dazugehörige „Literaturliste II – Datengrundlage“). Unveröffentlichte Daten für die Schweiz wurden freundlicherweise von Tobias (Tobias, 2005) zur Verfügung gestellt. Insgesamt handelt es sich um 1494 Angaben zur Vorbelastung (Pv), zu einem sehr großen Teil fanden sich Angaben zur Körnung und Rohdichte. Die effektive Lagerungsdichte (Ld) wurde nach KA5 (Ad-hoc-AG-Boden, 2005) gemäß der Formel $Ld = dB + 0,009 \cdot \text{Ton-\%}$ für alle Proben einheitlich errechnet. Die Anzahl der Datensätze in den Publikationen reicht von 2 bis 166. Es wurde darauf geachtet, dass Daten, die wiederholt publiziert wurden, nur einmal in die Auswertungsgrundlagen aufgenommen wurden. Trotz größter Sorgfalt kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass sehr wenige Daten von Autoren, die ihre Ergebnisse wiederholt publiziert haben, doppelt aufgenommen wurden.

Die Gruppierung der Daten erfolgte in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe in den Stufen „0 bis 30 cm“, „30 bis 60 cm“, „60 bis 90 cm“ und „> 90 cm“. Lag die aktuelle Bearbeitungstiefe (Ap) aber bei 30 bis 35 cm, wurden die Werte der Gruppe „0 bis 30 cm“ zugeordnet. Gab es Hinweise in der Profilbeschreibung, dass der Boden in 30 bis 35 cm Tiefe bereits einmal mechanisch umgelagert worden war (verlassene Krume), wurden diese Werte ebenfalls der Tiefe „0 bis 30 cm“ zugeordnet.

Zudem müsste bei einer ausgeprägten „verlassenen Krume“ als Krumbasis bei der Berechnung der Vorbelastung nach DVWK (1995) oder DIN (1998) eher von einem Plattengefüge als einer anderen Gefügeform ausgegangen werden. Für Plattengefüge werden im DVWK-Merkblatt 234 (1995) für die Kohäsion Werte von 80 bis 100 kPa und für die Winkel der inneren Reibung Werte von 0 bis 700 angeführt. Diese Werte sind, je nach Bodenart, im Vergleich zu den Angaben für die restlichen Gefügeformen um den Faktor 2 bis 10 höher. Aufgrund der hohen Sensitivität dieser beiden Parameter in den PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) könnte somit allein das Gefüge (Plattengefüge ja/nein), d. h. die richtige bzw. ausführliche Beschreibung der Gefügeform, die Klasse der Vorbelastung bestimmen. Da aber die Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens und nicht die mechanische Belastbarkeit der Krumbasis abgeschätzt werden soll, wurden diese Daten bei der Validierung nicht berücksichtigt. Falls der Ap nur als 25 cm mächtig beschrieben wurde und unterhalb des bearbeiteten Horizontes ein „B“-Horizont mit entsprechendem Gefüge aufgezeigt wurde, erfolgte eine Zuordnung der Werte aus einer Entnahmetiefe von 25 bis 30 cm in die Gruppe „30 bis 60 cm“.

Tabelle 6:

Liste der Publikationen (s. Literaturliste „Datengrundlage“) mit Daten zur Vorbelastung, die zur Validierung genutzt wurden sowie Angaben zur Häufigkeit (n), Mittelwert \bar{x} und Extrema (min., max.) in Abhängigkeit von den Entnahmebereichen „0 bis 30 cm“, „30 bis 60 cm“, „60 bis 90 cm“ und „> 90 cm“; Werte, die eine Vorbelastung von 800 kPa überschritten wurden auf 300 kPa „gesetzt“.

		Entnahmebereich der Proben und Angaben zur Vorbelastung in kPa																
		„0 bis 30 cm“				„30 bis 60 cm“				„60 bis 90 cm“				„> 90 cm“				
Autor	Jahr	Σ	n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.
Anken	2003	8	4	56	32	72	4	77	68	91								
Arvidsson	2001	10	5	85	53	120	5	90	56	135								
Anonym	2003	7	4	43	30	58	3	81	67	97								
Arvidsson & Keller	2004	166	46	113	30	287	54	116	35	233	66	142	37	300				
Arvidsson et al.	2001a	3	1	76	-----	-----	1	82	-----	-----	1	108	-----	-----				
Arvidsson et al.	2001b	15	5	81	60	123	5	103	68	165	5	116	69	202				

Fortsetzung Tabelle 6

Autor	Jahr	Σ	Entnahmebereich der Proben und Angaben zur Vorbelastung in kPa															
			„0 bis 30 cm“				„30 bis 60 cm“				„60 bis 90 cm“				„> 90 cm“			
			n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.	n	\bar{x}	min.	max.
Richter	2005	34	16	59	43	83	9	78	31	212	9	95	46	139				
Rücknagel	2007a	32	22	70	9	159	10	86	46	138								
Rücknagel	2007b	2	2	110	65	155												
Rücknagel et al.	2009	12	6	111	41	200	2	115	43	186	4	106	15	295				
Rüter et al.	1993	12	4	35	21	51	4	90	38	139	4	83	36	130				
Schäfer et al.	2007a	6	3	44	43	46	3	45	42	50								
Schäfer et al.	2007b	12	4	35	33	39					4	35	19	67	4	34	21	54
Schneider	1997	14	6	40	25	55	4	88	44	125	4	100	72	160				
Schwab et al.	2006	4	2	36	29	43	2	69	61	77								
Semmel	1993	123	31	96	15	300	83	131	25	300	9	131	60	200				
Stahl et al.	2005	57	26	83	33	133	31	89	27	157								
Stahl et al.	2009	43	43	63	28	124												
Stock	2005	4	2	42	41	42									2	115	70	160
Tobias	2005	21	12	77	13	200	9	77	17	140								
Trautner & Arvidsson	2003	3					2	160	136	183	1	178	-----	-----				
Voßbrink	2005	2	1	38	-----	-----	1	45	-----	-----								
Weyers	1993	17	6	33	20	49	6	77	23	131	5	67	16	140				
Weyers & Schröder	1991	12	4	49	37	66	4	81	32	126	4	99	27	172				
Wiemann & Warnecke	2003	57	29	51	22	122	28	66	24	150								
Wiermann	1998	136	88	100	20	200	48	129	70	300								
Zink	2009	15	6	46	30	62	7	58	45	75	2	58	53	62				
Zink et al.	2009	6	2	62	58	65	2	104	78	130	2	89	73	104				
Gesamtergebnis		1494	594	78	6	300	673	107	7	300	190	111	10	300	37	48	10	160

Eine ausführliche Übersicht der publizierten Daten, Anzahl für die einzelnen Entnahmebereiche, die jeweiligen Mittelwerte sowie die zugehörigen Extrema (x_{\min} , x_{\max}) sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

In der Literatur fanden sich Daten für Acker, Grünland und Wald, es wurde zudem unterschieden zwischen Proben aus „gewachsenen“ Böden (g = Boden_(gewachsen)) sowie Proben aus geschütteten, anthropogenen Böden (a = Böden_(anthropogen)) (s. Tabelle 7).

Tabelle 7:

Datengrundlage zur Validierung der Methoden aus der Literatur der Jahre 1981 bis 2009, differenziert nach Bedeckung, Entnahmebereich und der Genese

Entnahmebereich	Anzahl der Datensätze, differenziert nach Bedeckung, Tiefe sowie Genese [anthropogen = aufgetragen („a“) bzw. gewachsen („g“)]							
	Acker		Grünland		Wald		Summe	
	a	g	a	g	a	g	a	g
„0 bis 30 cm“	55	473	2	62	2	57	537	
„30 bis 60 cm“	57	576		27	13	57	616	
„60 bis 90 cm“	48	138		3	1	48	142	
„> 90 cm“	18	17		2		18	19	

Die Spannweite der Werte für die Vorbelastung reicht in der Literatur von 6 bis 800 kPa, für die Auswertung wurden aber alle Daten mit Messwerten größer als 300 kPa auf 300 kPa „gesetzt“. Dies betrifft 26 Datensätze aus 5 Publikationen.

Eine Differenzierung der Werte nach der Methodik der Bestimmung erfolgte nicht. Auch in den neueren Publikationen (Horn et al., 2005), in denen Bodenformen oder Bodenlandschaften Vorbelastungswerte auf Basis von Pedotransferfunktionen zugeordnet werden, war kein Hinweis zu finden, dass hierfür nur Werte zugrunde gelegt wurden, die ausschließlich nach einem Verfahren bestimmt wurden.

Die Spannweite der Daten, differenziert nach der Nutzung zeigt Abbildung 1. Der Median liegt bei ca. 40 kPa für die Standorte unter Wald (n = 16), bei ca. 65 kPa für Böden unter Grünlandnutzung (n = 96) und bei 85 kPa unter ackerbaulicher Nutzung (n = 1382). Die Skalierung der Y-Achse (Vorbelastung (Pv) in kPa) dieser und aller folgenden Abbildungen orientiert sich an den Klassengrenzen, die Lebert & Schäfer (2005) für die Auswertung der Daten für Niedersachsen vorgeschlagen haben und die in der UBA-Studie ebenfalls zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 8:

Anzahl der Datensätze, differenziert nach Bodenartenhauptgruppen gemäß KA5 (Ad hoc AG Boden, 2005) sowie Nutzung und Genese der Böden

Bodenartenhauptgruppen	Anzahl der Datensätze je nach Bodenartenhauptgruppen gewachsen („g“) und anthropogen aufgetragen („a“)								Σ
	Acker		Grünland		Wald		Summe		
	„a“	„g“	„a“	„g“	„a“	„g“	„a“	„g“	
Sande	2	186		8		2	2	196	198
Schluffe	125	483		25		6	125	514	639
Lehme	50	255	2	50		3	52	308	360
Tone	1	279		11		5	1	295	296
Σ	178	1203	2	94		16	180	1313	1493

Für 27 der 31 Bodenartenuntergruppen gemäß Körnungsdreieck nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) liegen Daten vor, es fehlen Daten für den St3 sowie für die sandigen Tone (Ts2, Ts3 und Ts4). Die Anteile an Sand reichen von 1 bis 99 %, für Schluff von 0,1 bis 90 % und für Ton von 0 bis 86 %. Die Werte für die Trockenrohdichte liegen zwischen 0,45 und 1,95 g/cm³, die Werte für die effektive Lagerungsdichte zwischen 0,64 und 2,258.

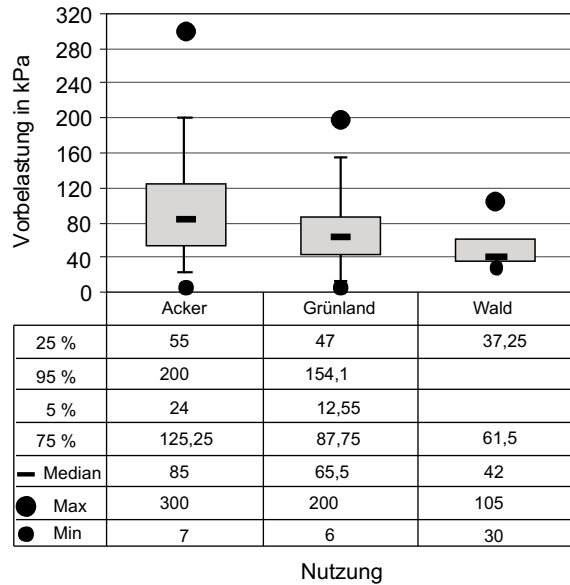


Abbildung 1:

Box Whisker Plot der Daten der Vorbelastung (in kPa), differenziert nach der Art der Nutzung

Die Aufteilung der Daten nach Bodenartenhauptgruppen der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) zeigt Tabelle 8.

Mit mehr als 40 % der Proben ist die Gruppe der Schluffe im Vergleich zu den anderen Gruppen sehr stark vertreten, die Sande mit nur 13 % hingegen sehr schwach. Von den ca. 1200 Proben der Gruppe „Acker_(gewachsen)“ gehören 570

Tabelle 9:

Anzahl der Datensätze (n) sowie die durchschnittliche Vorbelastung (Pv) für den Bereich „30 bis 60 cm“ unter ackerbaulicher Nutzung für 11 Bodenartengruppen bzw. 26 Bodenartenuntergruppen.

Anzahl und Mittelwert der Vorbelastung (Pv)			
Bodenartengruppen	Bodenartenuntergruppen	n	Ø Pv in kPa
ss - Reinsande	Ss	19	195
	Σ	19	195
ls - Lehmsande	Sl2	32	95
	Sl3	15	109
	St2	2	125
	Su2	11	89
	Σ	60	98
us - Schluffsande	Su3	3	100
	Su4	2	170
	Σ	5	128
su - Sandschluffe	Uu	3	100
	Σ	3	100
lu - Lehmschluffe	Uls	8	134
	Ut2	38	127
	Ut3	83	137
	Σ	129	134
tu - Tonschluffe	Lu	25	99
	Ut4	82	101
	Σ	107	100
sl - Sandlehme	Sl4	43	89
	Slu	5	106
	Σ	48	91
ll - Normallehme	Ls2	7	81
	Ls3	23	86
	Ls4	10	82
	Lt2	39	89
	Σ	79	87
tl - Tonlehme	Lts	4	78
	Σ	4	78
ut - Schlufftone	Lt3	23	97
	Tu3	33	114
	Tu4	9	95
	Σ	65	105
lt - Lehmtone	Tl	13	99
	Tt	12	114
	Tu2	32	127
	Σ	57	118

zu nur sieben im Körnungsdreieck der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) zudem direkt benachbarten Bodenartenuntergruppen. Es handelt sich um den Uls, Lu, Tu3, Tu4, Ut2, Ut3 und den Ut4. Allein 154 gehören davon wiederum zum Ut3. Jeweils mehr als 50 Datensätze gibt es noch für den Lt2, Sl4, Sl2 und den Tu2. Mit insgesamt 865 von 1200 Datensätzen gehören mehr als 70 % der Daten zu nur 11 der insgesamt 27 beprobten Bodenartenuntergruppen bzw.

der 31 möglichen Bodenartenuntergruppen nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Somit liegen für den größten Teil der bundesweit vorzufindenden Bodenartenuntergruppen, nämlich 20 von 31, viel zu wenig Messwerte vor. Dies ist im Hinblick auf die Repräsentativität bzw. Aussagekraft einer bundesweiten Darstellung unbedingt zu berücksichtigen.

Die Karte der Verdichtungsempfindlichkeit gilt nur für den Bereich des Unterbodens von Standorten unter ackerbaulicher Nutzung. Auf die Verdichtungswirkung durch die (landwirtschaftliche) Bodennutzung bis in eine Tiefe von 60 cm (Unterboden), aber auch darüber hinaus, wird schon seit Jahren in einer Vielzahl von Publikationen hingewiesen (zB. Kuntze, 1986; Hakansson et al., 1987; Fenner, 1997; Horn & Hartge, 2001). Für die Validierung der Methoden wird die Grundgesamtheit der Daten deshalb reduziert auf „Acker_(gewachsen)“ (Gültigkeitsbereich der Karte) und eine „kritische“ Tiefe von „30 bis 60 cm“. Dadurch verringert sich die Zahl der Datensätze mit Angaben zur Vorbelastung auf 576 (s. Tabelle 9).

Analog zur Grundgesamtheit der Daten sind auch hier wieder einige Bodenartenuntergruppen sehr stark vertreten, das gilt für Ut2, Ut3, Ut4, Tu2, Tu3 und Lt2, die mit 339 Datensätzen fast 60 % der Datengrundlage bilden. Im Vergleich zu den 180 Datensätzen der UBA-Studie konnte die zur Verfügung stehende *Messdatengrundlage* verdreifacht werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die für die UBA-Studie genutzten Daten zu einem großen Teil aus den gleichen Quellen stammen wie die hier ausgewerteten Daten.

3.2 Validierung der Pedotransferfunktionen

In Anlehnung an die oben dargestellte schrittweise Herleitung der Transferfunktionen erfolgt die Validierung entsprechend in fünf Schritten:

- 1.) Darstellung des Zusammenhanges zwischen Trockenrohdichte (dB) bzw. effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung_{(gemessen)^r} getrennt für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen,
- 2.) Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung nach den von Lebert (2008) verifizierten Regressionen aus DVWK 234 (1995) und DIN-V-19688 (1998),
- 3.) Darstellung des Zusammenhanges zwischen effektiver Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) geschätzten Werte der Vorbelastung getrennt für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen,
- 4.) Darstellung des Zusammenhanges zwischen Ld und Vorbelastung auf Basis der Regressionen der Tabelle 4 für die 11 Bodenartengruppen,
- 5.) Berechnung der Gütekriterien zur Beurteilung der Qualität der mittels PTF berechneten Schätzdaten.

3.2.1 Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte (dB) bzw. effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung_(gemessen)

Die folgende Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte (dB) und Vorbelastung. Die Gruppierung der Bodenartenhauptgruppen erfolgt nach den Vorgaben der UBA-Studie (Lebert, 2008). Nicht für alle Horizonte mit Angaben zur Vorbelastung wurden auch die Werte der Rohdichte, resp. der effektiven Lagerungsdichte publiziert, deshalb reduzierte sich die Anzahl der Wertepaare für die Regressionsberechnungen von 576 auf 487.

In der folgenden Tabelle 10 finden sich die statistischen Angaben der zugehörigen Ausgleichsgeraden.

Die geringen Bestimmtheitsmaße sind Ausdruck der großen Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade. Ein statistisch belegbarer Zusammenhang ist nicht zu erkennen. Letztendlich handelt es sich nur um Trends einer Zunahme der Vorbelastung mit zunehmender Trockenrohdichte. Belastbare Transferfunktionen lassen sich bei einem Bestimmtheitsmaß von 1 bis 11 % nicht ableiten.

Tabelle 10:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte (x) und Vorbelastung_(gemessen) (y) bei einer Wasser-spannung von pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß Lebert (2008) (n = 487)

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hochprozentig“	42	R ² = 0,1119	y = 216,54 x - 177,17
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	66	R ² = 0,0267	y = 47,87 x + 25,01
Schluffe	236	R ² = 0,1067	y = 271,02 x - 291,42
Lehme	64	R ² = 0,0134	y = 17,54 x + 62,53
Tone	79	R ² = 0,1027	y = 91,31 x - 21,19

In Abbildung 3 wird der Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung dargestellt. Hier werden alle Daten gemeinsam betrachtet, da die Ld definitionsgemäß einen Vergleich über alle Bodenartenuntergruppen hinweg erlauben soll, was für die Trockenrohdichte bekanntermaßen nicht möglich ist. Auch in diesem Fall ist ein statistisch absicherbarer Zusammenhang (R² = 0,0063) nicht zu erkennen.

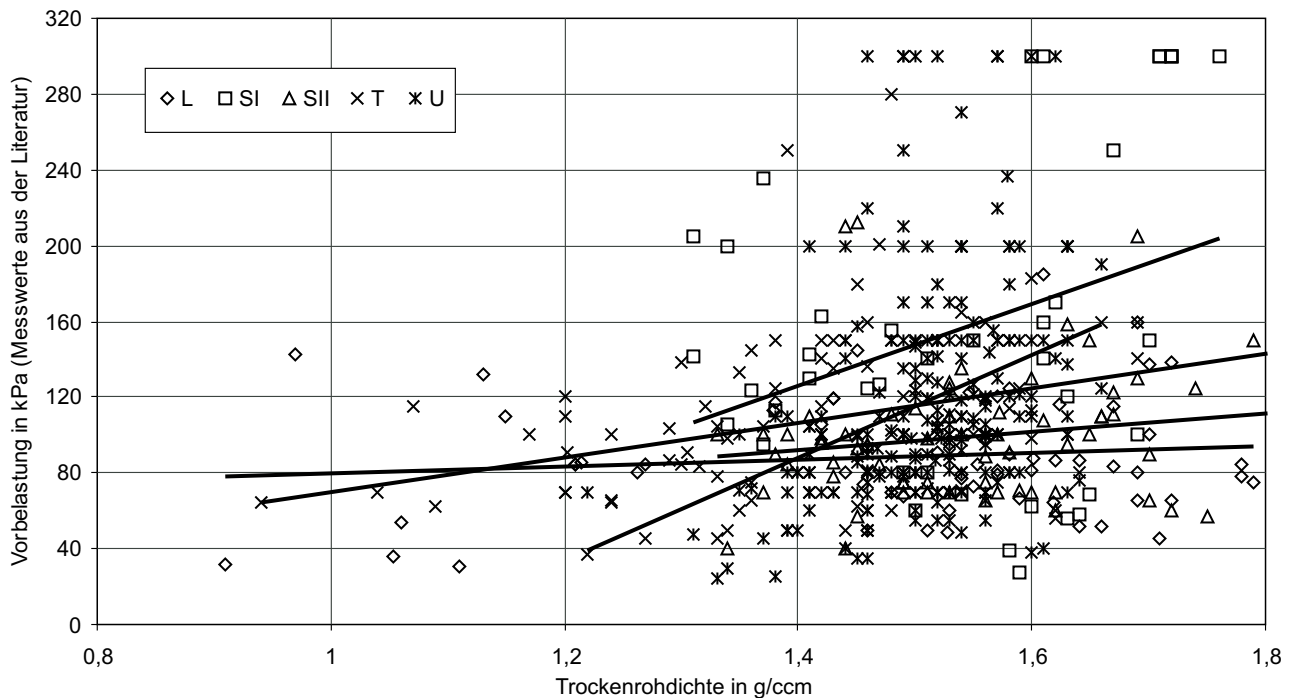


Abbildung 2:

Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung, differenziert in die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) für Messdaten aus der Literatur (ingesamt = 487)

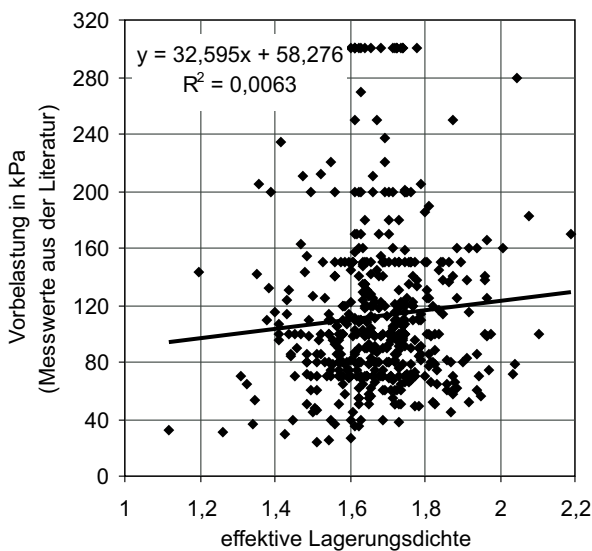


Abbildung 3:
Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung für die Messdaten aus der Literatur (n = 487)

Auch eine Gruppierung in die fünf Bodenartenhauptgruppen ergibt keinen statistisch absicherbaren Zusammenhang zwischen Ld und den Messwerten der Vorbelastung (s. Tabelle 11), im Vergleich zu den Ergebnissen der Tabelle 10 sind die Bestimmtheitsmaße sogar noch geringer.

Tabelle 11:
Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und gemessener Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß Lebert (2008) (n = 487).

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hochprozentig“	42	R ² = 0,0889	y = 213,22 x - 178,91
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	66	R ² = 0,0073	y = 24,17 x + 59,01
Schluffe	236	R ² = 0,0277	y = 121,61 x - 83,44
Lehme	64	R ² = 0,0092	y = 15,01 x + 62,99
Tone	79	R ² = 0,1560	y = 122,08 x - 10,35

Theoretische und rechnerische Grundlage für die Ableitung der Pedotransferfunktionen in der UBA-Studie ist der dort formulierte Zusammenhang zwischen Trockenroh-dichte und Vorbelastung. Der Versuch, diesen Sachverhalt mittels einer Auswertung der Daten aus der Fachliteratur zu reproduzieren, hat gezeigt, dass der den Pedotransferfunktionen der UBA-Studie zugrunde gelegte Zusammenhang nicht vorhanden bzw. nicht mit der für die Ableitung einer Pedotransferfunktion nötigen statistischen Sicherheit verifizierbar ist.

3.2.2 Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung nach den von Lebert (2008) verifizierten Regressionen aus DVWK 234 (1995) und DIN-V-19688 (1998).

Im Rahmen der Studie für das UBA verifizierte Lebert (2008) die vom DVWK (1995) sowie DIN (1998) publizierten Pedotransferfunktionen (PTF), um die Datenbasis an Werten der Vorbelastung zu erweitern und damit eine Grundlage für eine bundesweit gültige Aussage zu schaffen.

Die als plausibel beurteilten PTF für die Texturgruppe der „hochprozentigen Sande“ stammen aus dem DVWK Merkblatt 234 (1995), für die vier übrigen Texturgruppen werden die PTF der DIN-V-19688 (1998) als geeignet bewertet. Die PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) benötigen zwischen vier und acht Parameter, wie z. B. die Luftkapazität (LK), die nutzbare Feldkapazität (nFK). Für 394 der bisher genutzten Datensätze waren Angaben zur LK und nFK den Publikationen zu entnehmen. Die Parameter „Kohäsion“ („C“) und „Winkel der inneren Reibung“ („phi“) fehlten z. T. in den Publikationen. Da die publizierten Werte für „C“ und „phi“ teilweise deutlich von den Tabellenwerten der DIN (1998) bzw. des DVWK (1995) abwichen, wurden für alle zur Validierung genutzten Datensätze dem beschriebenen Gefüge entsprechende Tabellenwerte der DIN (1998) in die PTF eingesetzt. Fehlten in der jeweiligen Publikation die Angaben zum Gefüge wurden die Tabellenwerte für ein Subpolyedergefüge eingesetzt. Fehlten in der Literatur hingegen die Angaben zur LK oder nFK wurden diese nicht ergänzt, auf diese Datensätze wurde bei der Ableitung der Schätzwerte verzichtet.

Die Tabelle 12 zeigt die Mittelwerte der Vorbelastung, geschätzt nach den PTF aus DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die nunmehr 394 verfügbaren Datensätze.

Aus ihr wird deutlich, dass der größte Teil der Mittelwerte für die Vorbelastung_(geschätzt) unabhängig von der Hauptbodenart, den Bodenartgruppen bzw. -untergruppen, zwischen 80 und 120 kPa liegt. Eine bodenartspezifische Differenzierung ist somit nicht zu erkennen.

Tabelle 12:

Mittelwerte der nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) geschätzten Vorbelastungen für die Bodenartengruppen sowie die 26 Bodenartenuntergruppen auf Basis der Daten aus der Literatur (1981 bis 2009)

Bodenarten- gruppen	Bodenarten- untergruppen	n	Ø Pv in kPa geschätzt nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998)
ss - Reinsande	Ss	19	182
	Σ	19	182
ls - Lehmsande	Sl2	13	58
	Sl3	9	100
	St2	2	121
	Su2	8	105
	Σ	32	86
us – Schluffsande	Su3	3	88
	Su4	1	142
	Σ	4	102
su - Sandschluffe	Uu	-	---
	Σ	-	---
lu - Lehmschluffe	Uls	8	150
	Ut2	26	105
	Ut3	66	107
	Σ	100	110
tu - Tonschluffe	Lu	25	84
	Ut4	54	81
	Σ	79	82
sl - Sandlehme	Sl4	39	98
	Slu	5	116
	Σ	44	100
ll - Normallehme	Ls2	5	64
	Ls3	13	105
	Ls4	5	105
	Lt2	20	74
	Σ	43	86
tl - Tonlehme	Lts	4	85
	Σ	4	85
ut - Schlufftone	Lt3	17	87
	Tu3	23	81
	Tu4	9	101
	Σ	49	87
lt - Lehmtone	Tl	5	94
	Tt	1	91
	Tu2	14	109
	Σ	20	104

3.3.3 Darstellung des Zusammenhanges zwischen effektiver Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) geschätzten Werten der Vorbelastung differenziert für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen

Analog zu der Vorgehensweise von Lebert (2008) wird im Folgenden zunächst der statistische Zusammenhang zwischen der effektiven Lagerungsdichte bzw. der Rohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) im vorherigen Abschnitt abgeleiteten Schätzwerten der Vorbelastung ermittelt.

Der Zusammenhang zwischen der effektiven Lagerungsdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung, differenziert für die fünf Bodenartenhauptgruppen, wird in Abbildung 4 dargestellt.

In der Tabelle 13 finden sich die zugehörigen statistischen Angaben der Ausgleichsgeraden.

Tabelle 13:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte und geschätzter Vorbelastung bei einer Wasserspannung von pF 1,8 gemäß DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die fünf Bodenartenhauptgruppen

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hochprozentig“	42	R ² = 0,8258	y = 583,02 x - 792,25
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	57	R ² = 0,4031	y = 108,74 x - 77,75
Schluffe	179	R ² = 0,0519	y = 81,73 x - 38,19
Lehme	47	R ² = 0,6483	y = 122,77 x - 123,43
Tone	69	R ² = 0,1337	y = 56,31 x - 8,56

Vergleicht man die Angaben in Tabelle 13 mit den Angaben in der Tabelle 11, dann ergeben sich für die Bodenartenhauptgruppen Sande (I) und Sande (II) sowie Lehme deutlich bessere Bestimmtheitsmaße für die Schätzdaten als für die gemessenen Werte. Ursache hierfür dürfte vor allem die große Sensitivität der Trockenrohdichte und damit natürlich auch der Ld in den PTF sein. So sind die Bestimmtheitsmaße für die Regressionsgeraden zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt) im Vergleich zu den Regressionsgeraden der gemessenen Werte deutlich besser (s. Abbildung 5 und Tabelle 14).

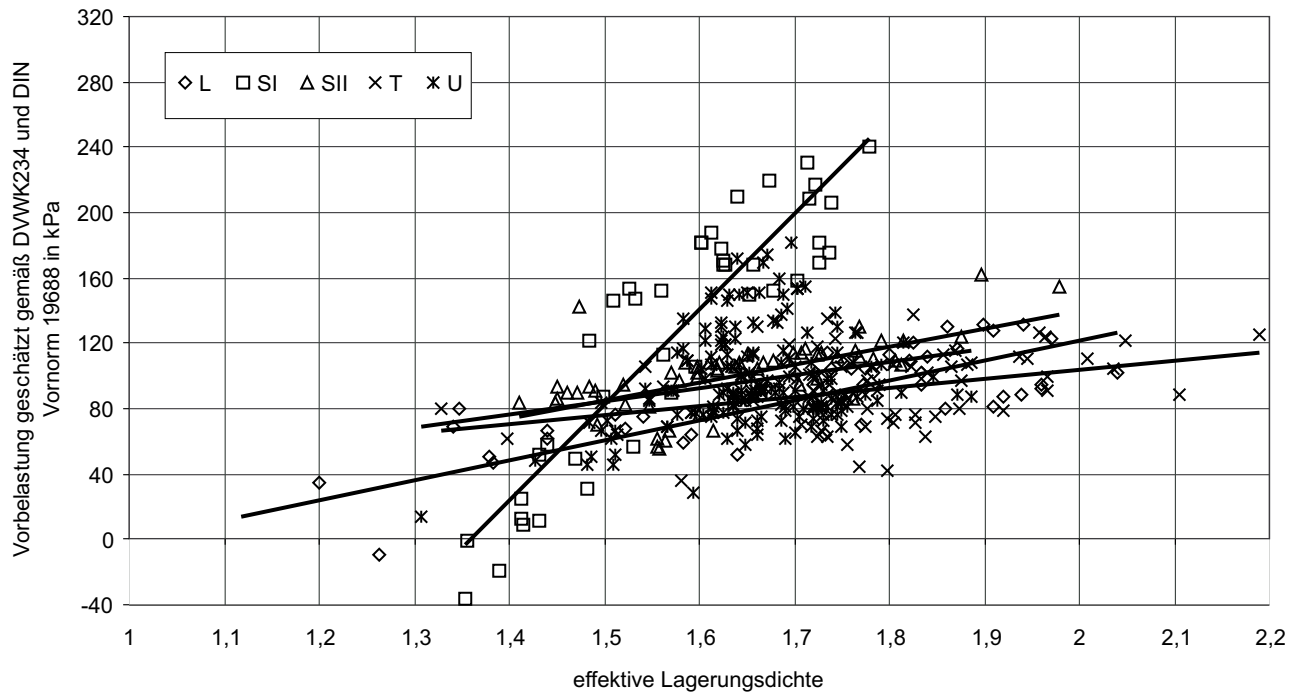


Abbildung 4:

Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (geschätzt nach DVWK (1995) und DIN (1998)) und Vorbelastung, differenziert in die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008) für die Messdaten aus der Literatur (n = 394)

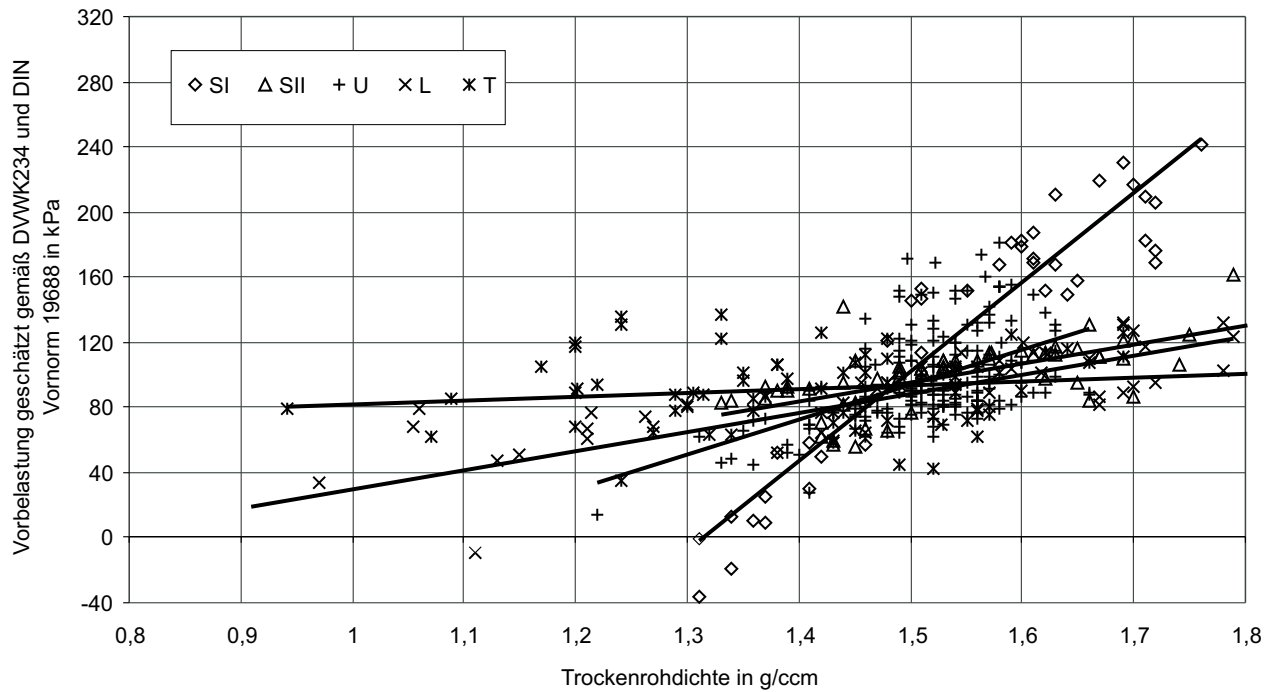


Abbildung 5:

Zusammenhang zwischen Trockenrohichte und Vorbelastung^(geschätzt), differenziert in die fünf Bodenarthauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008), geschätzt auf Basis der Messdaten aus der Literatur (n = 394)

Tabelle 14:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt) bei einer Wasserspannung von pF 1,8 gemäß DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die fünf Bodenartenhauptgruppen, geschätzt auf Basis der Messdaten aus der Literatur (n = 394)

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hochprozentig“	42	R ² = 0,8914	y = 548,95 x - 721,12
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	57	R ² = 0,4431	y = 116,13 x - 78,35
Schluffe	179	R ² = 0,2602	y = 215,59 x - 229,05
Lehme	47	R ² = 0,6484	y = 118,30 x - 89,16
Tone	69	R ² = 0,0278	y = 23,612 x + 58,53

Die höheren Bestimmtheitsmaße relativieren sich allerdings deutlich, wenn man den Zusammenhang zwischen Vorbelastung_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) betrachtet (s. Abbildung 6).

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die nach DVWK (1995) und DIN (1998) geschätzten Werte mit den Messwerten nicht in Übereinstimmung sind. Ab einer gemessenen Vorbelastung von ca. 80k Pa, dies entspricht der Klasse „mittel“ nach Lebert & Schäfer (2005), ist davon auszugehen, dass die PTF nach DVWK (1995) bzw. DIN

(1998) eher unterschätzen. Unterhalb der Messwerte von 80 kPa ist eher eine Überschätzung zu erkennen. In der „Philosophie“ der Vorbelastung bedeutet dies, dass eine Schätzung nach DVWK (1995) und DIN (1998) die tatsächliche Tragfähigkeit der Unterböden unterschätzen würde. Für Unterböden mit einer höheren Vorbelastung würden somit nur noch geringere zusätzliche Lasteinträge als tatsächlich kompensierbar als akzeptabel angesehen. Auf Böden mit tatsächlich geringen Vorbelastungswerten würde sie hingegen überschätzt. Durch eine auf diese Schätzwerte abgestimmte Nutzung könnte es im letzten Fall dann zu einer zusätzlichen irreversiblen Verdichtung kommen. Gleiches wäre bei einer entsprechenden „tolerierbaren Belastung“ nicht auszuschließen.

Da aber keine eindeutige Tendenz einer Über- oder Unterschätzung zu belegen ist, bedeutet es letztendlich nur, dass auf Basis der nach DVWK (1995) und DIN-V-19688 (1998) abgeleiteten Schätzwerte eine fundierte Empfehlung zu kompensierbaren Lasteinträgen nicht möglich ist.

3.3.4 Darstellung des Zusammenhanges zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung auf Basis der von Lebert (2008) ermittelten Regressionen für die 11 Bodenartengruppen

Durch die Erweiterung des Datensatzes im Vergleich zu DVWK 234 bzw. DIN-V-19688 konnte Lebert (2008) die

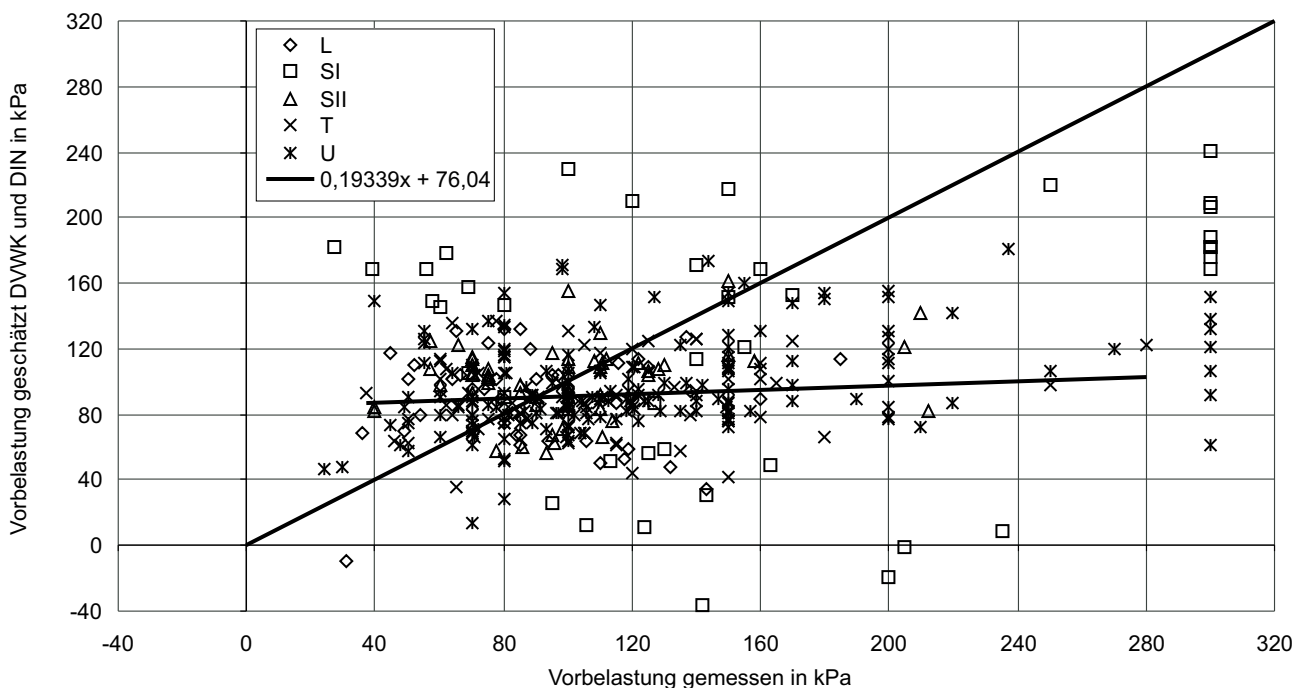


Abbildung 6:

„1 : 1“- Streudiagramm – Vorbelastung_(gemessen) gegen Vorbelastung_(geschätzt) – differenziert dargestellt für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008), geschätzt auf Basis der Daten aus der Literatur (n = 394, y = 0,19339x + 76,04; R² = 0,0892).

erwähnten statistischen Zusammenhänge nicht nur für die fünf Hauptbodenartengruppen berechnen, sondern den Datensatz weiter untergliedern und damit diese Beziehungen auch für die 11 Bodenartengruppen der KA5 bestimmen (s. Tabelle 4).

Für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) werden im Folgenden, analog zur Vorgehensweise von Lebert (2008), beispielhaft die gleichen Zusammenhänge für die Daten aus der Literatur aufgezeigt.

So zeigt Abbildung 7 den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DIN-V-19688 (1998) auf Basis der Messdaten aus der Literatur.

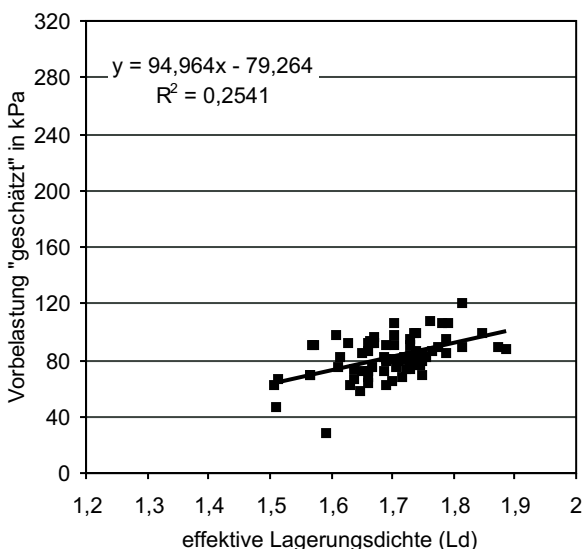


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DIN-V-19688 (1998) für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten aus der Literatur (n = 79)

Vergleicht man die Schätzwerte nach DIN-V-19688 (1998) mit den tatsächlich gemessenen Werten, so zeigt sich erneut, wie locker der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen ist und dass nur für den Bereich einer Vorbelastung von 80 bis 120 kPa ein tendenzieller Zusammenhang erkennbar ist (s. Abbildung 8).

Die Vorbelastung ist für die Gruppe der Tonschluffe aus der effektiven Lagerungsdichte regressionsanalytisch bei einem Bestimmtheitsmaß von ca. 25 % nicht ableitbar. Ab einer mittleren Vorbelastung (> 120 kPa) kommt es bei der Nutzung der PTF eher zu einer Unterschätzung, für den Bereich der geringen Vorbelastung (< 80 kPa) eher zu einer Überschätzung.

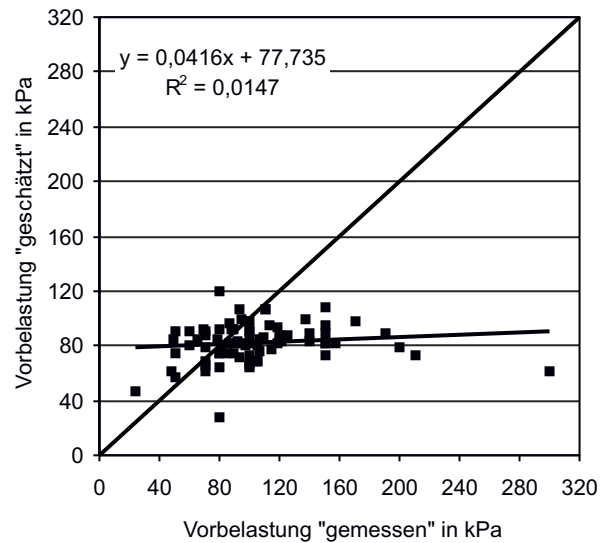


Abbildung 8: „1 : 1“- Streudiagramm für den Zusammenhang: Vorbelastung_(gemessen) gegen Vorbelastung_(geschätzt) geschätzt nach DIN-V-19688 (1998) für die Bodenartengruppe Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten aus der Literatur (n = 79).

Errechnet man zum Vergleich die Vorbelastung auf Basis der in der UBA-Studie ermittelten Regression für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung ($y = 125,72 x - 128,36$, s. Tabelle 4) und stellt die so errechneten Werte den Messwerten gegenüber, dann zeigt sich Folgendes (s. Abbildung 9).

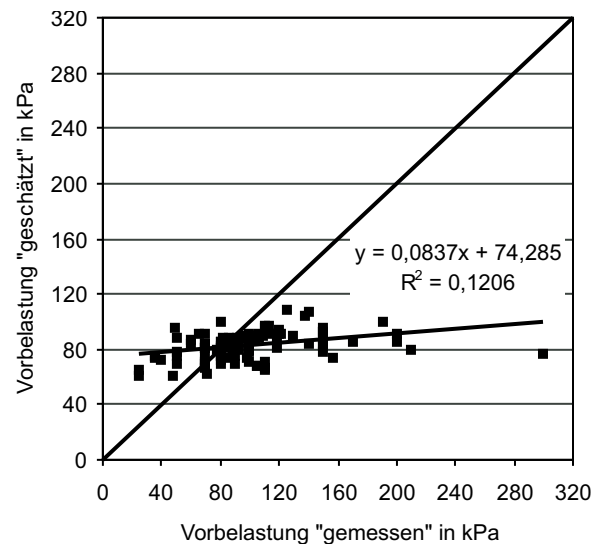


Abbildung 9: „1 : 1“- Streudiagramm für den Zusammenhang zwischen Vorbelastung_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) [Schätzung nach der Regression aus Lebert (2008)] für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten aus der Literatur (n = 106)

Auch hier ist deutlich zu erkennen, wie stark die Schätzwerte von den gemessenen Werten abweichen. Das mit 12 % etwas bessere Bestimmtheitsmaß (im Vgl. zu Abbi-

dung 8) wird vor allem durch die geringere Streuung der Schätzwerte bestimmt und ist kein Ausdruck eines statistisch belastbareren Zusammenhanges.

Entsprechend der in Tabelle 5 beispielhaft beschriebenen Herangehensweise berechnete Lebert (2008) für alle 11 Bodenartengruppen die Regressionsgeraden für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung_(geschätzt), dann für alle 11 Bodenartengruppen für die jeweils fünf Klassenmittelwerte der Ld die zugehörige Vorbelastung. Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug seiner Ergebnisse für die Bodenartengruppen Lehmschluffe „lu“, Tonschluffe „tu“, Normallehme „ll“ und Schlufftone „ut“.

Tabelle 15:

Mittelwerte der von Lebert (2008) regressionsanalytisch abgeleiteten Schätzwerte der Vorbelastung (kPa) für vier Bodenartengruppen, differenziert nach effektiver Lagerungsdichte (Ld) der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Bodenarten- gruppe	Klasse der effektiven Lagerungsdichte (Ld) nach KA5				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	63	98	133	157	--
„tu“	35	60	85	111	129
„ll“	35	61	87	113	132
„ut“	54	70	87	104	116

Es fällt auf, dass für die Werte der Gruppen „tu“ und „ll“, die zwei unterschiedlichen Bodenartenhauptgruppen angehören, für die Klassen der Ld 1 bis Ld 5 kein Unterschied in der Höhe der errechneten Vorbelastung zu erkennen ist. Für die Gruppen „tu“, „ll“ und „ut“ ist für die Klasse Ld 3 ebenfalls kein Unterschied zu erkennen.

Vergleicht man die Werte (Tabelle 15) mit entsprechenden Werten der Messwerte aus der Literatur (s. Tabelle 16), so sind aber sehr wohl Unterschiede zwischen den einzelnen Bodenartengruppen zu erkennen. Besonders für die Gruppe „ll“ wird ersichtlich, dass der postulierte Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung nicht vorhanden ist. Das ist im Einklang mit dem in Abbildung 2 dargestellten Sachverhalt.

Tabelle 16:

Mittelwerte der Messwerte der Vorbelastung für vier Bodenartengruppen, differenziert nach den Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Ld) der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Bodenarten- gruppe	Klasse der effektiven Lagerungsdichte Ld				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	70	105	141	---	---
„tu“	---	77	103	134	---
„ll“	80	102	90	90	78
„ut“	90	65	101	111	165

Klassifiziert man nun aber die Mittelwerte gemäß der Klassenbildung von Lebert & Schäfer (2005), so erhält man, bis auf wenige Ausnahmen (in der Tabelle 17 fett-kursiv), für die Schätzdaten nach Lebert (2008), verglichen mit den Messdaten aus der Literatur, eine identische Klasseneinteilung. Da nun den Legendeneinheiten der Bodenarten nicht die absoluten Werte, sondern die Klassen der Vorbelastung zugeordnet werden und diese Klassen bei Schätz- und Messwerten nahezu identisch sind, werden mit den beiden Tabellen (s. Tabellen 17 und 18) die Ergebnisse der UBA-Studie anscheinend bestätigt, obwohl es, wie bereits aufgezeigt nur unbefriedigende, d. h. statistisch nicht belegbare Zusammenhänge gibt.

Tabelle 17:

Klassen der Mittelwerte der Schätzwerte (oben) und der Messwerte (unten) der Vorbelastung, differenziert nach den Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Ld); „fett-kursiv“ keine Übereinstimmung.

Bodenarten- gruppe	Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit aus LEBERT (2008)				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	5	4	3	3	(2)
„tu“	6	5	4	4	3
„ll“	6	5	4	4	3
„ut“	5	5	4	4	4

Bodenarten- gruppe	Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit auf Basis der Messwerte aus der Literatur				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	5	4	3	---	---
„tu“	---	5	4	4	---
„ll“	5	4	4	4	5
„ut“	5	5	4	4	2

Betrachtet man nochmals die bereits ausführlich dargestellten unbefriedigenden statistischen Zusammenhänge, insbesondere die große Streuung der Messwerte, dann bedarf es einer genaueren Darstellung der statistischen Parameter, der der Tabelle der Messwerte zugrunde liegenden Mittelwerte. In der Tabelle 18 sind die Streuung und die Variationskoeffizienten der Mittelwerte für die vier beispielhaft angeführten Bodenartengruppen angeführt. Die Mittelwerte sind gekennzeichnet durch eine hohe Streuung, häufig bis zu einer Klassenbreite von 40 kPa sowie durch Variationskoeffizienten von bis zu 60 %. Bei einer so großen Streuung bedeutet dies bei einer Darstellung in Form einer Karte, dass in der zugehörigen Legende bzw. Erläuterung dem Nutzer unbedingt hätte vermittelt werden müssen, dass die dargestellten Klassen um jeweils ½ bis 1 Klassenbreite unter- oder überschritten werden können, die Spanne der Vorbelastung für die einzelnen Legendeneinheiten somit jeweils ca. zwei wenn nicht sogar drei Klassen betragen kann.

Tabelle 18:

Standardabweichung (oben) bzw. Variationskoeffizienten (unten) der Mittelwerte der Messdaten für die 4 Bodenartengruppen „lu“, „tu“, „ll“ und „ut“.

Bodenarten- gruppe	Streuung der Messwerte in kPa				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“		48	68		
„tu“		28	42	39	
„ll“	50	16	32	31	5
„ut“	36	25	39	38	7
Bodenarten- gruppe	Variationskoeffizient der Messwerte in %				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“		45,4	48,0		
„tu“		35,7	40,8	29,2	
„ll“	59,2	16,2	35,7	34,5	
„ut“	40,3	38,6	38,1	34,0	4,3

Hier besteht somit die Gefahr einer großen Fehleinschätzung, da die Matrix letztendlich auch nur das Ergebnis einer Schätzung ist und der für diese Schätzung postulierte Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung statistisch nicht nachweisbar bzw. mangels ausreichender Datengrundlage für belastbare Aussagen nicht hinreichend genau absicherbar ist. Zudem konnte für keine Gruppe der Daten ein Zusammenhang zwischen den geschätzten und den gemessenen Daten aufgezeigt werden. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die durch Messwerte nicht validierbaren Bewertungen der Schätzta-bellen ohne die Darstellung der Aussagegenauigkeit (\pm 1 bis 2 Klassen) in Form einer Karte nicht hätten publiziert werden sollen.

Tabelle 19:

Die „mittleren Fehler“ (ME) sowie die „Quadratwurzelfehler“ (RMSE) als Gütekriterien für unterschiedliche Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung

A: für die Pedotransferfunktionen nach DVWK 234 (1995), DIN-V-19688 (1998)

B_1: für die Pedotransferfunktionen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) – Ableitung der Vorbelastung auf Basis der Trockenrohdichte für alle Proben sowie getrennt nach den Bodenartenhauptgruppen nach Lebert (2008)

B_2: für die Pedotransferfunktionen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) – Ableitung der Vorbelastung auf Basis der effektiven Lagerungsdichte (Ld) für alle Proben getrennt nach den Bodenartengruppen „lu“, „tu“, „ut“, „sl“, „ll“ und „ls“.

Variante	n	Spannweite der Differenz Schätzwert / Messwert in kPa	ME	RMSE in kPa
A: DVWK (1995), DIN (1998)				
Grundgesamtheit	394	-238 bis + 154	-16,54	61,59
DVWK 1995 (Sande I + II)	42	-225 bis + 154	-27,45	107,68
DIN-V-19688 (1998) Schluffe	118	-208 bis + 112	-23,24	66,41
DIN-V-19688 (1998) Lehme	150	-238 bis + 94	-7,40	43,21
DIN-V-19688 (1998) Tone	84	-158 bis + 71	17,6	49,15
B_1: LEBERT (2008) Basis: Trockenrohdichte				
alle Bodenartenhauptgruppen	486	-202 bis + 135	-8,07	54,87
Bodenartenhauptgruppe: Sande I	41	-172 bis + 135	-15,54	87,73
Bodenartenhauptgruppe: Sande II	66	-65 bis + 128	1,84	35,61
Bodenartenhauptgruppe: Schluffe	236	-202 bis + 126	8,96	57,82
Bodenartenhauptgruppe: Lehme	64	-120 bis + 92	-0,76	39,12
Bodenartenhauptgruppe: Tone	79	-52 bis + 180	12,93	45,70
B_2: LEBERT (2008) Basis: eff. Lagerungsdichte				
Bodenartengruppe: „lu“	130	-182 bis + 140	-7,37	66,68
Bodenartengruppe: „tu“	106	-228 bis + 68	-15,45	42,87
Bodenartengruppe: „ut“	54	-109 bis + 51	-13,10	39,65
Bodenartengruppe: „sl“	61	-132 bis + 66	-1,48	33,61
Bodenartengruppe: „ll“	60	-120 bis + 89	+1,31	40,57
Bodenartengruppe: „ls“	23	-192 bis + 105	-29,54	94,75

3.3.5. Berechnung der Gütekriterien zur Beurteilung der Qualität der mittels Pedotransferfunktionen berechneten Schätzdaten

Die Genauigkeit, mit der die mittels Pedotransferfunktionen berechneten Zielwerte (Vorbelastung_(geschätzt)) mit den entsprechenden Messwerten (Vorbelastung_(gemessen)) übereinstimmen, kann über verschiedene Kriterien beschrieben werden (Willmott, 1982; Robinson et al., 2005; Cornelius et al., 2001). Informationen zur generellen Richtung der Abweichung (Über- oder Unterschätzung) liefert der „mittlere Fehler“ $ME = (\sum(y_{ges} - y_{gem})/N)$.

Die Qualität der Aussagegenauigkeit einer Schätzung beschreibt als Gütekriterium der so genannte „Quadratwurzelfehler“ $RMSE = \sqrt{((ME) * (ME))/N}$.

Er ist immer positiv und der absolute Wert für den Gesamtfehler einer Transferfunktion. Die Tabelle 19 zeigt die Gütekriterien der im Rahmen der Validierung eingesetzten Transferfunktionen aus DVWK (1995), DIN (1998) sowie Lebert (2008).

Die RMSE liegen bis auf eine Ausnahme zwischen ca. 40 und 110 kPa. Die Fehler der Schätzung betragen somit i.d.R. 1 bis 2,75 Klassenbreiten, legt man eine Klassenbreite von 40 kPa gemäß Lebert & Schäfer (2005) zu Grunde. Bei den in DVWK (1995) bzw. DIN (1998) angeführten Klassenbreiten für die einzelnen Stufen der Vorbelastung von 30 bzw. 20 kPa ist die Abweichung allerdings noch gravierender.

Die Vorzeichen der ME sind allein ein Hinweis, dass die Schätzung der Vorbelastung je nach Pedotransferfunktion und Stratifizierung der Bodenarten zu einer Unter- oder auch Überschätzung der tatsächlichen Vorbelastung führen kann (s. a. Abbildung 5, 7 und 8).

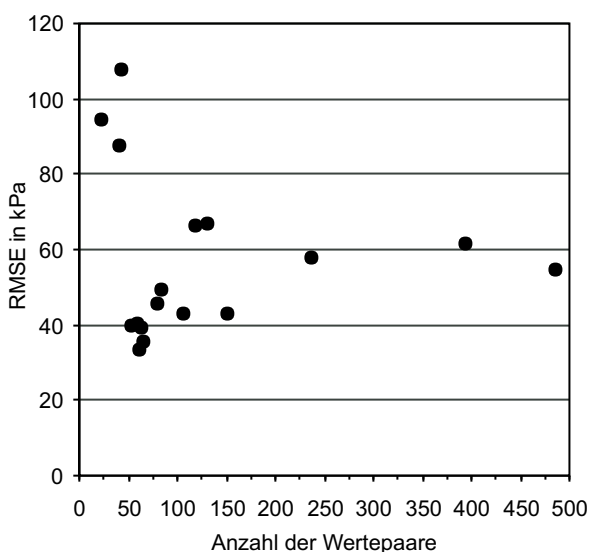


Abbildung 10:

Höhe des „Quadratwurzelfehlers“ (RMSE) in Abhängigkeit von der Anzahl der Wertepaare (geschätzt/gemessen)

Ein gewisser Einfluss auf die Höhe des RMSE durch die Anzahl der Wertepaare ist zu erkennen. So wird erst ab einer Anzahl von ca. 60 Wertepaaren ein RMSE mit einer Spanne von weniger als zwei Klassen erreicht (s. Abbildung 10).

Es ist sicherlich sinnvoll zu überprüfen, ob auf dem Niveau der Bodenartengruppen eine Anzahl von nur 60 Wertepaaren (gemessen/geschätzt) tatsächlich ausreicht, um einen RMSE von einer Klassenbreite (40 kPa) zu erreichen. Bei 11 Bodenartengruppen bedeutet dies dann aber 660 Wertepaare, und dies auch nur für einen Entnahmebereich wie z. B. 30 bis 60 cm Tiefe, also einen erheblichen Untersuchungsaufwand. Bei geringeren Klassenbreiten von 20 kPa wie sie DIN (1998) oder von 30 kPa wie sie DVWK (1995) für die Bewertung vorgeben, dürfte die Anzahl der benötigten Wertepaare durchaus höher liegen.

4. Fazit der Validierung

Die Studie des UBA (Lebert, 2008) beschreibt vor allem:

- den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und der Vorbelastung für die 5 Bodenartenhauptgruppen mit einem Bestimmtheitsmaß von 7 bis 54 %,
- die Ableitung von Schätzwerten der Vorbelastung mittels PTF gemäß DVWK (1995) und DIN (1998),
- den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung für die Bodenartenhauptgruppen mit einem Bestimmtheitsmaß von 27 bis 85 % bzw. den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung von 23 bis 88 % für die 11 Bodenartengruppen,
- darauf aufbauend die Erstellung einer Matrix aus den fünf Klassen der L_d sowie der Vorbelastung, differenziert für die 11 Bodenartengruppen als Grundlage für eine Zuordnung von Klassenmittelwerten der Vorbelastung an die Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Ad-hoc-AG Boden, 2005) als Grundlage für die entsprechende Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit“.

Die wichtigsten Ergebnisse der UBA-Studie wurden mittels gemessener Daten aus der Literatur der Jahre 1981 bis 2009 überprüft, vor allem im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der statistischen Zusammenhänge.

Betrachtet man die Ergebnisse, so zeigt sich dass:

- die Bestimmtheitsmaße für die Zusammenhänge von Trockenrohdichte bzw. effektiver Lagerungsdichte mit den Messwerten der Vorbelastung extrem gering sind,
- mit dem Datensatz die entsprechenden Ergebnisse der UBA-Studie nicht reproduziert werden konnten,

- die Schätzwerte nach DVWK (1995) und DIN (1998) mit tatsächlich gemessenen Werten nicht in Übereinstimmung zu bringen sind,
- die etwas besseren Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt) zu einem sehr großen Teil sicherlich auf die hohe Sensitivität des Parameters Trockenrohdichte in den Schätzfunktionen nach DVWK und DIN beruhen dürften, was die Schlussfolgerung auf eine Autokorrelation des Parameters Trockenrohdichte nahe legt,
- die im Vergleich mit den gemessenen Daten besseren Bestimmtheitsmaße für die Schätzwerte nicht dazu führen dürfen, dass Transferfunktionen, die auf Schätzwerten basieren, Vorrang gegenüber den messwertbasierten Funktionen gegeben wird,
- die Mittelwerte der Matrix „Klasse der effektiven Lagerungsdichte und Vorbelastung“ für die Bodenartengruppen durch eine große Streuung von häufig \pm einer Klassenbreite (40 kPa) gekennzeichnet sind,
- diese RMSE-Werte von 30 bis 60 kPa aufzeigen, dass eine Nutzung der Schätzwerte zu einer Fehlschätzung von ein bis zu fast drei Klassen führen kann,
- der jeweilige Trend der Modelle zu einer völligen Fehleinschätzung im Hinblick auf eine mögliche Zusatzbelastung bzw. hinsichtlich der tatsächlichen Belastbarkeit führen kann.

Im ersten Teil dieses Beitrages wird aufgezeigt, dass die methodischen Grundlagen der neuen Pedotransferfunktionen bzw. der darauf basierenden Matrix zur Schätzung der Vorbelastung nur schwer reproduzierbar sind, einer statistischen Absicherung nicht standhalten und eine Übereinstimmung zwischen Schätz- und Messwerten nicht nachweisbar ist. Dies wurde anhand der extrem geringen Bestimmtheitsmaßen für die Zusammenhänge zwischen der Rohdichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte und der Vorbelastung herausgestellt und zwar sowohl für die geschätzten Werte als auch für die Messwerte der Vorbelastung. Der 1:1 Vergleich von Mess- und Schätzwerten ergab eine gravierende Unter- bzw. Überschätzung von einer bis zu drei Klassen, ohne dass aber Möglichkeiten für eine evtl. mathematische Korrektur dieser Abweichung zu erkennen sind. Eine Bewertung der Fehlermaße mittels RMSE belegt die Schwächen der mittels Transferfunktionen erzielten Ergebnisse.

Teil II dieser Arbeit diskutiert zunächst, ob die von Horn et al., 2009 publizierten Vorsorgewerte auf Basis der Vorbelastung für die gesetzlichen Aufgaben des Bodenschutzes geeignet sind. Weiterhin befasst er sich mit der Frage, ob die Schätzmethode zur Ableitung der Vorbelastung als Grundlage für die „Identifizierung sensibler Gebiete der Bodenverdichtung“ (risk areas) i. S. d. BSRR für die Bundesländer, insbesondere Hessen, einsetzbar ist.