

Bergische Universität Wuppertal
Interdisziplinäres Zentrum III
Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement

Bodenschutz beim Baubetrieb – Nachhaltiger Umgang mit Boden bei Baumaßnahmen

Abschlussbericht

Az: 29873-23

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. agr. Jörg Rinklebe
Dipl.-Ing. (FH) Anne Randel
M.Sc. Björn Marx

Wuppertal, den 22.06.2016

Bearbeitung durch: Bergische Universität Wuppertal

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. agr. Jörg Rinklebe

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. (FH) Anne Randel
M.Sc. Björn Marx
Dipl.-Geogr. Carsten Schilli

Laboringenieur: Dipl.-Ing. Claus Vandenhirtz

Studentische Mitarbeiter: Kai Dankowski
Marcel Imielski
Jonas Kriegler
Daniel Theiß
Mario Wetzels

Beteiligte Studierende: Ahmed-Amine Mtahri
Ann Katrin Stenzel

In Zusammenarbeit mit: 
PROSITE

Projektleitung: Dipl.-Ing. Thomas Kohlen

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	29873	Referat	23	Fördersumme	148.923,00 €
Antragstitel	Bodenschutz beim Baubetrieb – Nachhaltiger Umgang mit Boden bei Baumaßnahmen				
Stichworte	Boden, Baubetrieb				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
44 Monate	13.07.2012	31.03.2016	1		
Zwischenberichte	07.03.2014				
Bewilligungsempfänger	Bergische Universität Wuppertal Interdisziplinäres Zentrum III			Tel.:	0202-439 4114
	Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement			Fax:	0202-439 4314
	Pauluskirchstr. 7 42285 Wuppertal			Projektleitung :	Prof. Helmus Prof. Rinklebe
				Bearbeiter :	Anne Randel Björn Marx Carsten Schilli
Kooperationspartner	ProSite GmbH Martin Przybilla Debbingstraße 11 46286 Dorsten				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Bei vielen Baumaßnahmen, insbesondere im Hochbau, werden große Mengen an Bodenmaterial Belastungen ausgesetzt. Dazu gehören neben der Bebauung sowohl Einflüsse, wie beispielsweise das Befahren und Bewegen des Bodens, als auch der Eintrag von Stoffen in und auf den Boden. Besonders im Hinblick auf die stofflichen Einträge (z. B. Baustoffe, Abfälle) auf und in den Boden bestehen Defizite und Wissenslücken hinsichtlich der verursachenden Baumaßnahmen und -prozesse. Das Projekt hatte zum Ziel, typische Bauprozessabläufe und die betreffenden Bodenflächen hinsichtlich des Boden- und Gewässerschutzes zu analysieren. Dabei wurden Hot-Spots identifiziert und qualitativ und quantitativ bewertet. Oberstes Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch bewussten Umgang mit dem Boden die Qualität und damit den Wert des Bodens durch ein optimiertes Baustellenmanagement zu erhalten und nachhaltig zu sichern.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Neben Literaturrecherchen war eine messtechnische Erfassung von relevanten Bodeneigenschaften sowie eine Prozess- und Verlaufsanalyse des Baubetriebs vorgesehen. Die Messungen fanden vor, während und nach der Durchführung einer Baumaßnahme statt und waren essentiell, um Veränderungen quantifizieren zu können. Aufgedeckte Defizite wurden hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich der geltenden und in Diskussion befindlichen gesetzlichen Grundlagen bewertet. Des Weiteren wurde wissenschaftlich bearbeitet, ob und welche technischen und organisatorischen Lösungen zur Defizitbeseitigung in Frage kommen. Bei der Erarbeitung wurden adäquate Lösungsansätze entwickelt, die ökonomische und ökologische Aspekte berücksichtigen, gezielt integrieren und bewerten.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projektes konnten vier Projektbaustellen untersucht werden, darunter zwei Großbaustellen und zwei kleinere Baustellen. Im Verlauf der Projektdurchführung ist deutlich geworden, dass die Analyse von Bauprozessen erheblich aufwendiger ist, als zuvor angenommen. Die gewonnenen Bodenproben konnten oftmals einem Komplex von Bauprozessen/Bauphasen und weniger einem einzelnen Vorgang zugeordnet werden. Bei vielen Baustellenprozessen wurden dennoch potenzielle stoffliche Einträge in Böden während des Bauens identifiziert, die bodenchemische Veränderungen zur Folge haben können. Hierzu gehören alle Prozesse, bei denen es meist unbeabsichtigt zu Tropfverlusten, wie z. B. bei der Baustofflagerung in Silos, Bitumenabdichtung, Putzauftrag bei Fassadenarbeiten, oder zu Bearbeitungsabfällen (Säge- und Trennarbeiten) kommt. Auch kommen bei den organischen Stoffen Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) als Quellen-Belastungen aus Betriebsstoffen und Schmiermitteln in Frage. Diese können durch Tropfverluste beim Tanken oder Wartungsarbeiten und durch schlecht gewartete Maschinen in den Boden gelangen. Parallel hierzu wird ein Großteil potenzieller Schadstoffe in Form von Abfällen, Spänen und Stäuben in den Boden eingetragen. Die Einträge erfolgen meist unbewusst und akkumulieren sich typischerweise in Vertiefungen, gebäudenah und auf Flächen der Baustelleneinrichtung (Magazine und Abfallentsorgung). Diese Bauprozesse sollten zukünftig im Fokus stehen, wenn es darum geht, den vorsorgenden Bodenschutz auf Baustellen voranzutreiben.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vorträge
8.11.2012, Handwerkskammer Wiesbaden, Gefährdung von Boden und Wasserhaushalt durch undichte Abwasserkanäle, Vortrag: „ Bodenschutz im baulichen Umfeld - eine Einführung “
11.7.2013, BBSR Bonn, Symposium Bodenschutz beim Bauen, Vortrag: „ Welche bodenschutzrelevanten Erkenntnisse aus Forst- und Landwirtschaft sind auf die Bauwirtschaft übertragbar? “
7.-12.9.2013, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung, Rostock, Vortrag: „ Einfluss potentiell schädlicher Bauprozesse im Hochbau auf ausgewählte Bodeneigenschaften “
9.4.2014, Forschungskolloquium des Masterstudiengangs Boden, Gewässer, Altlasten, Institut für Geographie, Universität Osnabrück, Vortrag: „ Bodenschutz beim Bau “
6.-7.5.2014, Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, Laufen, Bodenkundliche Baubegleitung und Bodenrekultivierung, Vortrag: „ Gefährdungspotential physikalischer Bodenschäden durch Baufahrzeuge – Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus der Landwirtschaft “
24.7.2014, Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg in Kooperation mit dem Regierungspräsidium, Stuttgart, Bodenkundliche Baubegleitung (BBB) - ein wirksames Instrument des vorsorgenden Bodenschutzes, Vortrag: „ Übertragbarkeit von Erkenntnissen physikalischer Bodenschäden aus der Landwirtschaft auf Hochbaustellen “
10.3.2015 BBSR Bonn, Symposium Umweltschutz auf der Baustelle - Wettbewerbsvorteil oder unbezahlter Mehraufwand? Vortrag: „ Einfluss von Bauprozessen auf Bodeneigenschaften “
5.-10.9.2015 Jahrestagung der DBG, Unsere Böden – Unser Leben, München, Poster: „ Veränderungen chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften auf Hochbaustellen “
5.10.2016 Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Symposium „Umwelt- und Ressourcenschutz im Bauwesen“, Vortrag: „ Bodenschutz beim Bauen “
Abschlussarbeiten
Kai Dankowski, 2014: Messtechnische Erfassung ungewollter physikalischer Bodenveränderungen durch typische Bauprozesse anhand von zwei Modellbaustellen
Ann Katrin Stenzel, 2014: Analyse von Bauprozessen hinsichtlich der Stoffeinträge auf Baustellen
Ahmed-Amine Mtahri, 2014: Prozessanalyse einer Hochbaumaßnahme mit Fokus auf potenzielle Einflüsse auf den Boden

Fazit

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass bei den betrachteten Bauprozessen Gesetzmäßigkeiten bestehen. Zu nennen ist eine pH-Wert-Erhöhung in Arbeitsbereichen, in denen Putz oder Mörtel aus Silos entnommen wird; auch können Schwermetalle in teils hohen Konzentrationen im Boden auftreten. Eine Verdichtung ist speziell im Gebäudenahbereich durch die Befahrung während des Ausbaus relevant. Die meisten stofflichen Einträge wären durch ordnungsgemäßes Handeln vermeidbar gewesen. Zukünftiges Ziel im Sinne des Bodenschutzes muss es sein, Umweltaspekte bereits in der Arbeitsvorbereitung zu berücksichtigen, denn bereits zu diesem frühen Zeitpunkt sind solche Maßnahmen am wirkungsvollsten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Glossar.....	XV
Zusammenfassung.....	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	2
2 Grundlagen der Bauwirtschaft	5
2.1 Struktur der Bauwirtschaft	5
2.1.1 Gliederung der Bauunternehmen in Wirtschaftszweige und Größenklassen	5
2.1.2 Gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Bauwirtschaft	5
2.2 Charakteristika der Bauproduktion	6
2.3 Bauprojekttablauf	6
3 Grundlagen der Bodenkunde	11
3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen der Bodennutzung	11
3.2 Chemische und physikalische Bodeneigenschaften	12
4 Material und Methoden	17
4.1 Prozess- und Stoffstromanalyse Hochbau.....	17
4.1.1 Grundlagen des Erdbaus und Maschineneinsatz	17
4.1.2 Grundlagen des Hochbaus und Maschineneinsatz	19
4.2 Ermittlung von Hot Spots.....	22
4.2.1 Erdbau	24
4.2.2 Baustelleneinrichtung.....	25
4.2.3 Rohbau	27

4.2.3.1	Fertigteilbau.....	27
4.2.3.2	Mauerwerksbau	27
4.2.3.3	Wärmedämmverbundsysteme	28
4.2.4	Außenanlagen.....	29
4.3	Feldbodenkundliche Methoden	30
4.4	Labormethoden.....	31
4.5	Probenahme.....	33
5	Untersuchte Modellbaustellen	39
5.1	Baustelle R	39
5.1.1	Baustellenbeschreibung.....	39
5.1.2	Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse.....	41
5.1.3	Messnetz.....	45
5.1.4	Ergebnisse der Bodenanalyse.....	46
5.2	Baustelle G	52
5.2.1	Baustellenbeschreibung.....	52
5.2.2	Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse.....	53
5.2.3	Messnetz.....	56
5.2.4	Ergebnisse der Bodenanalyse.....	56
5.3	Baustelle E.....	61
5.3.1	Baustellenbeschreibung.....	61
5.3.2	Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse.....	62
5.3.3	Messnetz.....	66
5.3.4	Ergebnisse der Bodenanalyse.....	67
5.4	Baustelle L.....	78
5.4.1	Baustellenbeschreibung.....	78
5.4.2	Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse.....	79
5.4.3	Messnetz.....	81
5.4.4	Ergebnisse der Bodenanalyse.....	81

6	Diskussion und Bewertung	89
7	Resümee und Fazit	101
	Quellenverzeichnis	107
	Anhang 1: Chemie.....	111
	Anhang 2: SZ.....	119
	Anhang 3: LRS	121
	Anhang 4: Penetrologger-WG.....	125
	Anhang 5: dB + PZ + GPV	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodenfunktionen nach § 2 BBodSchG	1
Abbildung 2: Bodenhorizonte [Foto: B. Marx]	12
Abbildung 3: Anteile der Bodenbestandteile	13
Abbildung 4: Probenahmeschema	34
Abbildung 5: Probenahmedesign Bodenphysik Baustelle E [Dan14]	35
Abbildung 6: Oberbodenabtrag Baustelle E [Foto: B. Marx]	36
Abbildung 7: Intersekt Baustelle L [Foto: B. Marx]	36
Abbildung 8: Entfernung der Krautschicht Baustelle L [Foto: A. Randel]	37
Abbildung 9: Grundstücksplan Baustelle R	40
Abbildung 10: Untersuchte Prozesse auf Baustelle R	41
Abbildung 11: Erdarbeiten und Bodenmiete Baustelle R [Fotos: B. Marx]	42
Abbildung 12: Rohbauarbeiten Baustelle R [Fotos: B. Marx]	43
Abbildung 13: Ausbauarbeiten Baustelle R [Fotos: B. Marx]	43
Abbildung 14: Außenanlagen Baustelle R [Fotos: B. Marx]	44
Abbildung 15: Messnetz Baustelle R	46
Abbildung 16: Baustraße (mittig) Baustelle R	48
Abbildung 17: Baustraße (seitlich) Baustelle R	48
Abbildung 18: Trennarbeiten Metall Baustelle R	49
Abbildung 19: Mobile Betankung (Fahrzeuge, Kleingeräte) Baustelle R	49
Abbildung 20: Baustellenabfälle/Bauschutt Baustelle R	50
Abbildung 21: Lagerfläche Material Baustelle R	50
Abbildung 22: Heterogenität vor Beginn der Bautätigkeit Baustelle R	51
Abbildung 23: Übersicht Schwefelgehalte Baustelle R	51
Abbildung 24: Grundstücksplan Baustelle G	53
Abbildung 25: Untersuchte Prozesse auf Baustelle G	54
Abbildung 26: Baustelleneinrichtung Baustelle G [Fotos: B. Marx]	55

Abbildung 27: Fassadenarbeiten Baustelle G [Fotos: B. Marx].....	55
Abbildung 28: Messnetz Baustelle G.....	56
Abbildung 29: Übersicht der Mangangehalte Baustelle G.....	58
Abbildung 30: Zement unter Betonmischer Baustelle G.....	58
Abbildung 31: Zementrückstände unter Kran Baustelle G	59
Abbildung 32: Übergangsbereich BE zur Bodenmiete Baustelle G.....	59
Abbildung 33: Sägearbeiten Steine Baustelle G	60
Abbildung 34: Bitumenabdichtung, Mörtel und Dämmung Baustelle G.....	60
Abbildung 35: Sonderprobe Baurestmassen und Abfall Baustelle G.....	61
Abbildung 36: Grundstücksplan Baustelle E	62
Abbildung 37: Untersuchte Prozesse auf Baustelle E	63
Abbildung 38: Erdarbeiten und Bodenmiete Baustelle E [Fotos: B. Marx].....	63
Abbildung 39: Rohbauarbeiten Baustelle E [Fotos: B. Marx]	64
Abbildung 40: Fassaden- und Ausbauarbeiten Baustelle E [Fotos: B. Marx].....	65
Abbildung 41: Außenanlagen Baustelle E [Fotos: B. Marx].....	65
Abbildung 42: Messnetz Baustelle E	67
Abbildung 43: Bodenabtrag und -lagerung Baustelle E.....	69
Abbildung 44: Betonfertigteile und Befahrung Baustelle E.....	69
Abbildung 45: Bitumenabdichtung und Innenausbau Baustelle E.....	70
Abbildung 46: Säge- und Trennarbeiten Baustelle E.....	70
Abbildung 47: Schutt, Mörtelreste und Abfälle Baustelle E.....	71
Abbildung 48: Putzsilo Baustelle E.....	71
Abbildung 49: Dämmung und Putzauftrag Baustelle E	72
Abbildung 50: Drainage, Elektroarbeiten, Entfernung von Steinen Baustelle E	72
Abbildung 51: Bodenlagerung auf Miete Baustelle E.....	73
Abbildung 52: Oberbodenauftrag Baustelle E	73
Abbildung 53: Lagerungsdichte E.....	74
Abbildung 54: Gesamtporenvolumen B-Horizont	75

Abbildung 55: Gesamtporenvolumen C-Horizont	75
Abbildung 56: Porenverteilung B-Horizont und C-Horizont Baustelle E.....	76
Abbildung 57: Mittelwerte Eindringwiderstand und Wassergehalte im B-Horizont Baustelle E.....	77
Abbildung 58: Mittelwerte Eindringwiderstand und Wassergehalte im C-Horizont Baustelle E.....	77
Abbildung 59: Grundstücksplan Baustelle L	78
Abbildung 60: Untersuchte Prozesse auf Baustelle L	79
Abbildung 61: Erdarbeiten Baustelle L [Fotos: A. Randel]	80
Abbildung 62: Streifenfundamente und Rohbauarbeiten Baustelle L [Fotos: A. Randel]	80
Abbildung 63: Messnetz Baustelle L	81
Abbildung 64: Elementgehalte im Oberboden Baustelle L.....	83
Abbildung 65: Elementgehalte im Unterboden Baustelle L.....	84
Abbildung 66: Elementgehalte Prozess Erdarbeiten und Einmessung im Oberboden Baustelle L ...	85
Abbildung 67: Gesamtkohlenstoff Baustelle L	85
Abbildung 68: pH-Wert Baustelle L	86
Abbildung 69: Leitfähigkeit Baustelle L.....	86
Abbildung 70: Dichte des Oberboden PN1 im Vergleich zu PN2 Baustelle L.....	88
Abbildung 71: Überschneidung von Bauprozessen im Terminplan.....	90
Abbildung 72: Probenahmeort der Probe R-21 [Foto: B. Marx].....	93
Abbildung 73: Prozess Mobile Betankung Baustelle R [Foto: B. Marx].....	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische und chemische Hot Spots im Überblick	24
Tabelle 2: Prozesse und Maschineneinsatz im Erdbau.....	25
Tabelle 3: Prozesse der Baustelleneinrichtung.....	26
Tabelle 4: Prozesse und Produkteinsatz beim Mauerwerksbau	28
Tabelle 5: Prozesse und Produkteinsatz bei Fassadenarbeiten	29
Tabelle 6: Prozesse bei der Erstellung von Außenanlagen	30
Tabelle 7: Methode Mikrowelle.....	32
Tabelle 8: Übersicht Probenahmezeitpunkte.....	34
Tabelle 9: Prozessanalyse Baustelle R	45
Tabelle 10: Bodenprofil Baustelle R [Foto: B. Marx].....	47
Tabelle 11: Ergebnisse der PAK- und MKW-Analyse Baustelle R.....	52
Tabelle 12: Prozessanalyse Baustelle G.....	56
Tabelle 13: Bodenprofil Baustelle G [Foto: B. Marx]	57
Tabelle 14: Prozessanalyse Baustelle E	66
Tabelle 15: Bodeneigenschaften Baustelle E [Fotos: B. Marx]	68
Tabelle 16: Ergebnisse der Analyse auf org. Schadstoffe Baustelle E.....	74
Tabelle 17: Gesättigte Leitfähigkeit Baustelle E.....	75
Tabelle 18: Prozessanalyse Baustelle L	81
Tabelle 19: Bodenhorizonte Baustelle L [Fotos: B. Marx]	82
Tabelle 20: Untersuchte Prozesse und Aspekte Baustelle L	83
Tabelle 21: Chemische Eigenschaften im Oberboden Baustelle L	87
Tabelle 22: Gesamtübersicht der untersuchten Bauprozesse	91
Tabelle 23: Relevante Prozesse und Ursachen.....	92
Tabelle 24: Elementgehalte der Probe R-21.....	93
Tabelle 25: Zuordnungswerte nach LAGA M 20 für MKW.....	95
Tabelle 26: Schwefeltrioxidgehalte verschiedener Baustellenproben [Sei12]	95

Tabelle 27: Vergleich der Laborergebnisse für ausgewählte Prozesse	98
--	----

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
AHO	Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V.
Al	Aluminium
As	Arsen
AV	Arbeitsvorbereitung
BauGB	Baugesetzbuch
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BE-Plan	Baustelleneinrichtungsplan
bzw.	beziehungsweise
ca.	Circa
Cd	Cadmium
cm	Zentimeter
cm/s	Zentimeter pro Sekunde
cm ²	Quadratzentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
Co	Kobalt
Cr	Chrom

Cu	Kupfer
dm	Dezimeter
Fe	Eisen
g	Gramm
Hg	Quecksilber
i. d. R.	in der Regel
kg/cm ²	Kilogramm pro Quadratcentimeter
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW	Kilowatt
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mg·kg ⁻¹	Milligramm pro Kilogramm
Min.	Minuten
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
n. d.	nicht definiert
Ni	Nickel

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PKW	Personenkraftwagen
PN	Probenahme
S	Schwefel
Se	Selen
t	Tonne
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
u. a.	unter anderem
V	Vanadium
Vgl.	Vergleiche
W	Watt
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WZ 2008	Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008
z. B.	zum Beispiel
Zn	Zink

Glossar

Aktuelle Baustellenoberfläche

Auf den meisten Hochbau-Baustellen muss während der Bauphasen von einer temporären Geländeoberfläche ausgegangen werden, die sich häufig ändert. Ein direkter absoluter Bezug zu vorher anstehendem Ober- oder Unterboden existiert nicht. Die aktuelle Oberfläche während der Bauphase ist auch nicht in allen Fällen mit der für die geplante letzte Probenahme beprobten Oberfläche vergleichbar. Je nach Baustelle wird die Oberfläche vor Aufbringen des Oberbodens zumindest gebäudenah abgetragen. Bei Begehungen hat sich jedoch gezeigt, dass sich mit Beprobung der oberen 5 cm die meisten sichtbaren Einträge erfassen lassen.

Alex 02

Alex-Merkblatt 02 - Orientierungswerte für die abfall- und wasserwirtschaftliche Beurteilung, Herausgeber ist das Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung, Rheinland-Pfalz

Bauwirtschaft

Der Begriff Bauwirtschaft umfasst nicht nur das Baugewerbe, sondern auch alle Teilbereiche, die sich zusätzlich mit der Erhaltung, der Nutzung und der Veränderung von Gebäuden befassen sowie alle Dienstleistungen, die für diese Prozesse erforderlich sind. Unter dem Begriff Bauen lassen sich im Allgemeinen der Neubau, der Ausbau, die bauliche Erhaltung sowie der Rückbau von Bauwerken zusammenfassen. Die aktuelle Systematik der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamtes unterscheidet zwischen

- 41 Hochbau
- 42 Tiefbau
- 43 Vorbereitende Baustellenarbeiten, Bauinstallation und sonstiges Ausbaugewerbe.

Hot Spot

Ort möglicher negativer Auswirkungen auf den Boden, der im Rahmen der Prozessanalyse vor Einrichtung und Betrieb der Baustelle identifiziert und anschließend regelmäßig beprobt wird. Es wird zwischen physikalischen und chemischen Hot Spots unterschieden.

Laga M20

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) ist ein Arbeitsgremium der deutschen Umweltministerkonferenz. Die Mitteilung 20 beinhaltet Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen und Abfällen und ist insbesondere im Rahmen der Behandlung und Beseitigung von Bodenaushub und Bauschutt relevant.

Pedologie

Bodenkunde, -wissenschaft

Sonderprobe

Auf einigen Baustellen wurden Sonderproben gewonnen. Diese sind als Beprobung von Reinsubstrat zu verstehen und keine klassischen Bodenproben oder Boden-Abfallgemische. Diese Proben können mit den Vorher-Beprobungen verglichen werden, stellen aber keine Veränderungen des anstehenden Bodens dar, sondern müssen eigenständig bewertet werden.

Zusammenfassung

Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Baustellenbetrieb hinsichtlich des nachhaltigen Boden- und Gewässerschutzes analysiert. Dabei standen die Analyse bauogistischer Prozesse sowie deren Auswirkungen auf die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften im Vordergrund. Insgesamt wurden vier Baustellen unterschiedlicher Größe untersucht, darunter der Bau eines Unterkunfts- und Seminargebäudes, eines Mehrfamilienhauses, eines Fachmarktzentrums und eines Einfamilienhauses. Die messtechnische Erfassung von relevanten Bodeneigenschaften fand vor, während und nach der Durchführung einer Baumaßnahme statt und war essentiell, um Veränderungen quantifizieren zu können. Im Rahmen der Prozessanalyse wurden vor Einrichtung und Betrieb der Baustelle Orte möglicher negativer Auswirkungen (Hot Spots) sowie weitgehend unbeeinflusste Flächen identifiziert und anschließend regelmäßig beprobt. Die Beprobung dieser Flächen wurde nach Beendigung der Baumaßnahme wiederholt. Somit konnten Auswirkungen relevanter Bauphasen festgestellt werden, zusätzlich stellte sich die Vorher-Nachher-Situation dar.

Erzielte Ergebnisse

Im Verlauf der Projektdurchführung ist deutlich geworden, dass die Analyse von Bauprozessen erheblich aufwendiger ist, als zuvor angenommen. Die gewonnenen Bodenproben konnten oftmals einem Komplex von Bauprozessen/Bauphasen und weniger einem einzelnen Vorgang zugeordnet werden. Bei vielen Baustellenprozessen wurden dennoch potenzielle stoffliche Einträge in Böden während des Bauens identifiziert, die bodenchemische Veränderungen zur Folge haben können. Hierzu gehören alle Prozesse, bei denen es meist unbeabsichtigt zu Tropfverlusten, wie z. B. bei der Baustofflagerung in Silos, Bitumenabdichtung, Putzauftrag bei Fassadenarbeiten, oder zu Bearbeitungsabfällen (Säge- und Trennarbeiten) kommt. Der Eintrag von potenziellen Schadstoffen in Form von Abfällen, Spänen und Stäuben in den Boden erfolgt meist unbewusst und akkumuliert sich typischerweise in Vertiefungen, gebäudenah und auf Flächen der Baustelleneinrichtung.

Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Für den vorsorgenden Bodenschutz auf Baustellen sind Schutzmaßnahmen während des Baustellenbetriebs erforderlich. Das notwendige Bewusstsein und Wissen hierfür ist allerdings selten vorhanden, was vor allem mit der nicht geklärten personellen Zuständigkeit auf Baustellen zusammenhängt. Hier sind Instrumente zu erarbeiten, um die vorhandenen Defizite und Wissenslücken beim Baustellenpersonal und bei den Verantwortlichen in Zukunft zu schließen.

Kooperationspartner

ProSite GmbH, Dorsten

1 Einleitung

Bearbeitet von B. Marx, A. Randel und J. Rinklebe

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Boden erfüllt natürliche Funktionen als Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen und ist ein schützenswertes Gut. Im Rahmen des nachhaltigen Bauens erfährt der Boden bislang jedoch keine oder nur sehr wenig Beachtung. Die Auswirkungen bauphysikalischer Prozesse auf die Qualität des Bodens sind bereits bekannt, jedoch noch nicht quantitativ erfasst worden. Bei vielen Baumaßnahmen, insbesondere im Hochbau, können große Mengen an Bodenmaterial Belastungen ausgesetzt werden. Dazu gehören neben der Bebauung sowohl Einflüsse, wie beispielsweise das Befahren und Bewegen des Bodens, als auch der Eintrag von Stoffen in und auf den Boden.

Der Boden, der zusammen mit Wasser und Luft zu den Umweltmedien gehört, bildet eine wichtige Ressource. Er weist zahlreiche, für das Leben des Menschen essentielle Funktionen auf. Neben der Funktion als Pflanzenstandort, übernimmt er weitere Funktionen wie z. B. Nutzungsfunktionen als Siedlungs- und Verkehrsfläche (vgl. Abbildung 1).

Natürliche Funktionen			Archivfunktion	Nutzungsfunktion
Lebensgrundlage und -raum	Bestandteil des Naturhaushaltes	Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	Archiv	Nutzung
<ul style="list-style-type: none"> - Menschen - Tiere - Pflanzen - Bodenorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wasserkreislauf - Nährstoffkreislauf 	<ul style="list-style-type: none"> - Filter - Puffer - Stoffumwandlung 	<ul style="list-style-type: none"> - Naturgeschichte - Kulturgeschichte 	<ul style="list-style-type: none"> - Rohstofflager - Siedlungs- und Erholungsfläche - Land- und Forstwirtschaft - Sonstige Nutzung - Verkehr - Ver- und Entsorgung

Abbildung 1: Bodenfunktionen nach § 2 BBodSchG

Der Boden wird primär durch äußere Einflüsse und menschliche Aktivitäten gefährdet. Dies ist grundsätzlich als kritisch einzustufen, da die Ressource Boden endlich ist. Auf Grund seiner begrenzten Verfügbarkeit und Gefährdung durch menschliche Tätigkeiten ergibt sich eine hohe Schutzbedürftigkeit. [BHT11] In der Bundesrepublik Deutschland regelt das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) in Verbindung mit der zugehörigen Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) den Umgang mit Boden und Erdbewegungen. Nach §1 des BBodSchG sind wesentliche Ziele des Gesetzes

„...nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen...sowie...schädliche Bodenveränderungen abzuwehren (...) und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen...“. [BBodSchG98] Im Baugesetzbuch heißt es: „Mit Grund und Boden soll sparsam und schonend umgegangen werden; dabei sind zur Verringerung der zusätzlichen Inanspruchnahme von Flächen für bauliche Nutzungen die Möglichkeiten der Entwicklung der Gemeinde insbesondere durch Wiedernutzbarmachung von Flächen, Nachverdichtung und andere Maßnahmen zur Innenentwicklung zu nutzen sowie Bodenversiegelungen auf das notwendige Maß zu begrenzen“. [BauGB60]

Bei vielen Baumaßnahmen, insbesondere im Hochbau, sind große Mengen an Bodenmaterial Belastungen ausgesetzt. Dazu gehören neben der Bebauung sowohl mechanische Einflüsse, wie beispielsweise das Befahren des Bodens mit schweren Maschinen, als auch der Eintrag von Stoffen (z. B. Schwermetalle wie Cadmium und Chrom, die häufig in Betonzuschlagsstoffen enthalten sind) in den Boden. Besonders im Hinblick auf die stofflichen Einträge auf und in den Boden bestehen Defizite und Wissenslücken hinsichtlich der verursachenden Baumaßnahmen und -prozesse. Dies belanzt zum einen die Berücksichtigung der Problematik vor und während der Baumaßnahme, zum anderen die daraus resultierende Wirkung hinsichtlich eines nachhaltigen Boden- und Grundwasserschutzes. Zu Bodenschäden physikalischen Ursprungs zählen u. a. die Verdichtung, Erosion und Flächenversiegelung. Beim Befahren von zu nassen Böden mit schwerem Gerät kommt es zu einer Verdichtung. Negative Auswirkungen auf die chemischen Eigenschaften des Bodens können durch den Eintrag verschiedener schädlicher Substanzen verursacht werden, beispielsweise Mineralöl, welches in das Erdreich eindringen kann und den Boden so kontaminiert.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Erstmals soll der Baustellenbetrieb hinsichtlich des nachhaltigen Boden- und Gewässerschutzes analysiert werden, um gegebenenfalls Vorschläge zu dessen Optimierung zu unterbreiten. Dabei standen die Analyse bauleistungsprozesse sowie deren Auswirkungen auf die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften im Vordergrund. Bisherige Arbeiten zum Thema „Bodenschutz auf der Baustelle“ zeigten deutlich die Notwendigkeit, den vorsorgenden Bodenschutz intensiver wissenschaftlich und praktisch zu berücksichtigen. Die nicht einheitlichen rechtlichen Regelungen und deren teilweise unzureichende Berücksichtigung zeigen den aktuellen Handlungsbedarf.

Das Ziel des Projektes war es, die real bestehenden Defizite auf der Basis exemplarischer Baustellen unterschiedlicher Typen zu identifizieren. Neben Literaturrecherchen war eine messtechnische Erfassung von relevanten Bodeneigenschaften vorgesehen. Die Messungen fanden vor, während und nach der Durchführung einer Baumaßnahme statt und waren essentiell, um Veränderungen quantifizieren zu können. Aufgedeckte Defizite wurden hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich der geltenden und in Diskussion befindlichen gesetzlichen Grundlagen bewertet. Ein Kernziel des Projektes war die Beantwortung der Frage, welchen Beitrag eine sachgerechte und angepasste Planung und Durchführung

einer Baumaßnahme zum Bodenschutz leisten kann. Hierbei spielen sowohl ökologische Aspekte, als auch finanzielle Aspekte des nachhaltigen Bauens eine Rolle. Ein gesunder und intakter Boden trägt nicht nur zur ökologischen Qualität bei, sondern ist auch maßgeblich an einer Werterhaltung von Immobilien, Grundstücken und Liegenschaften beteiligt. Je geringer die Einwirkungen des Bauens auf den Boden und seine Funktionen ausfallen, desto höher ist die quantitative und qualitative Bewertung.

Des Weiteren wurde wissenschaftlich bearbeitet, ob und welche technischen und organisatorischen Lösungen zur Defizitbeseitigung in Frage kommen. Um die Auswirkungen einer Baumaßnahme auf den Boden und dessen Eigenschaften sachgerecht zu erfassen, erfolgte eine Betrachtung relevanter Parameter vor und nach der Baumaßnahme. Auf den von der Baumaßnahme betroffenen Flächen wurden dementsprechend vor, während und im Anschluss (sofern dies möglich war) an die Baumaßnahme Bodenproben entnommen und ein Monitoring durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden die betroffenen Flächen betrachtet der aktuelle Zustand erhoben. Bei Einrichtung und Betrieb der Baustelle wurden Orte möglicher negativer Auswirkungen (Hot-Spots) sowie weitgehend unbeeinflusste Flächen identifiziert und beprobt. Die Beprobung dieser Flächen wurde im Anschluss an die Maßnahme wiederholt. Die chemischen Parameter umfassten, neben gängigen Parametern (z. B. pH -Wert und elektrische Leitfähigkeit), sowohl organische (PCB und PAK), als auch anorganische Schadstoffe (Schwermetalle und Arsen). Die physikalischen Parameter wurden erhoben, um beispielsweise Verdichtungen zu identifizieren. Beimengungen von Fremdmaterialien im Boden wurden makroskopisch abgeschätzt. Zusätzlich war eine Erhebung der Bodenart notwendig, um die chemischen Parameter hinsichtlich der bestehenden Gesetzgebung zu bewerten und das Material nach den Bodenklassen der DIN 18300 einzuordnen. Während der Maßnahme wurden die Abläufe im Bauprozess identifiziert, die Auswirkungen auf bodenschutzrelevante Eigenschaften der Fläche zeigten. Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes vier Projektbaustellen untersucht.

2 Grundlagen der Bauwirtschaft

Bearbeitet von A. Randel

2.1 Struktur der Bauwirtschaft

2.1.1 Gliederung der Bauunternehmen in Wirtschaftszweige und Größenklassen

Im Folgenden werden die Rolle der Bauwirtschaft im gesamtwirtschaftlichen Kontext dargestellt und die besonderen Randbedingungen der Bauproduktion erläutert. Der Begriff Bauwirtschaft umfasst nicht nur das Baugewerbe, sondern auch alle Teilbereiche, die sich zusätzlich mit der Erhaltung, der Nutzung und der Veränderung von Gebäuden befassen sowie alle Dienstleistungen, die für diese Prozesse erforderlich sind. Unter dem Begriff Bauen lassen sich im Allgemeinen der Neubau, der Ausbau, die bauliche Erhaltung sowie der Rückbau von Bauwerken zusammenfassen. Nach der aktuellen Systematik der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamtes (WZ 2008) wird unter Abschnitt F zwischen

- 41 Hochbau
- 42 Tiefbau
- 43 Vorbereitende Baustellenarbeiten, Bauinstallation und sonstiges Ausbaugewerbe

unterschieden. ([SB08] S. 104-106) Das Baugewerbe (bzw. die Bauwirtschaft) setzt sich aus dem Bauhauptgewerbe und dem Ausbaugewerbe zusammen. Der Begriff „Bauindustrie“ wird als Synonym für das Bauhauptgewerbe verwendet.

Unternehmen der Bauwirtschaft werden entweder nach Mitarbeiteranzahl und/oder nach Gesellschaftsform unterschieden: Unternehmen mit weniger als 20 Mitarbeitern sind dem Bauhandwerk zuzuordnen, Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern der Bauindustrie. Werden Bauunternehmen nach ihrer Gesellschaftsform unterschieden, so werden die im Ausbau tätigen Betriebe dem Baugewerbe und die im Roh- und Tiefbau tätigen Betriebe der Bauindustrie zugeordnet. Dieser Definition folgend, beträgt der Anteil der kleinen und mittelständischen Unternehmen an der deutschen Bauwirtschaft 99,7 %. Nur 0,3 % der Bauunternehmen sind Großunternehmen zuzurechnen. Diese erwirtschaften jedoch 16 % des Umsatzes. [HDB13]

2.1.2 Gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Bauwirtschaft

4,6 % der gesamten Wertschöpfung in Deutschland wurden 2013 vom Baugewerbe erbracht. Das Baugewerbe ist mit rund 2,4 Millionen Erwerbstätigen – das sind 5,7 % der gesamten Erwerbstätigen – einer der größten Arbeitgeber in Deutschland. Seit Jahren gehört der Wohnungsbau (57,9 %) vor dem Wirtschaftshochbau (23,0 %) zu den bedeutendsten Bausparten. Auf das Bauhauptgewerbe und Ausbaugewerbe zusammen entfielen 63 % der Bauinvestitionen. [HDB13]

2.2 Charakteristika der Bauproduktion

Die Bauwirtschaft unterliegt im Gegensatz zu allen anderen Branchen ganz besonderen Bedingungen bei der Produktion. Sie ist durch eine instationäre Produktion gekennzeichnet, die Arbeitsschritte Entwicklung, Planung, Konstruktion und Herstellung sind dabei häufig auf mehrere Akteure verteilt. Zu nennen sind in erster Linie die Bauherren. Sie veranlassen Bauvorhaben und legen je nach Projekt Qualität, Zeitumfang und Kostenrahmen fest, beauftragen Architekten und Planer, Bauunternehmen und Lieferanten. Sowohl Privatpersonen und Wirtschaftsunternehmen, als auch öffentliche Auftraggeber wie Bund und Länder können als Bauherren auftreten. Zu den Aufgaben des Fachplaners (Architekten, Prüffingenieure, Ingenieurbüros, Fachingenieure) gehören Entwurf, Statik und Konstruktion, Erschließungsplanung oder Bauleitung. ([HO12] S. 29 ff.) Als Bauherrenberater haben sie Einfluss auf Stoffströme und Baustoffauswahl. Der Bauherr hat ebenso die Möglichkeit, Einfluss auf die Qualität und die zu verwendenden Baustoffe zu nehmen. ([Gra11] S. 7)

Zu den Aufgaben eines Bauunternehmens gehört die Erstellung eines Bauwerkes, die mit Angebotsabgabe beginnt und mit Abnahme durch den Bauherrn abgeschlossen ist. Durch den Bedarf an Baustoffen und -produkten sowie den Maschinenpark des Unternehmens besteht eine direkte Korrelation zur Beeinflussung des Bodens.

Zu den charakteristischen Eigenschaften der Bauproduktion gehören insbesondere:

- Standortgebundenheit (Immobilität) von Bauvorhaben
- vorwiegende Unikatfertigung
- diskontinuierliche Prozesse
- wechselnde Zuständigkeiten, die den Informationsfluss beeinträchtigen
- heterogene Betriebsgrößenstruktur
- geringer finanzieller Spielraum
- lange Herstellungs- und Lebensdauer des Produktes. ([HO12] S. 27)

Darüber hinaus muss das Endprodukt in einem im Vorhinein vertraglich festgelegten Zeit- und Kostenrahmen fertiggestellt werden und die geforderte Qualität erreichen. Dies stellt sehr hohe Ansprüche an die Planung, Organisation und Koordinationsstruktur des Bauunternehmens.

2.3 Bauprojekttablauf

Nach AHO gliedert sich der Bauprojekttablauf in die fünf Stufen

- Projektvorbereitung
- Projektplanung

- Ausführungsvorbereitung
- Ausführung
- Projektabschluss

Die Ausführungsphase beginnt mit der Auftragserteilung der ausführenden Baufirmen und endet mit der Abnahme des fertiggestellten Bauwerks. ([GMS00] S. 233) Der Planungs- und der Bauproduktionsprozess sowie die daran anschließenden Nutzungs- bzw. Bewirtschaftungsprozesse sind Bestandteil des ganzheitlichen Bauwerkserstellungsprozesses. ([Gir14] S. 10) Vor Beginn des tatsächlichen Bauproduktionsprozesses sind im Unternehmen vorbereitende Maßnahmen notwendig. Der Bauproduktionsprozess besteht aus vielen Teilprozessen, welche sich gegenseitig beeinflussen. Die Planung der Teilprozesse sowie deren nahtlose Verzahnung hinsichtlich der Ablaufabfolge ist Aufgabe der Baubetriebsplanung. ([Gir14], S. 141) Es bezeichnet den organisatorischen Teil des Bauunternehmens, welcher sich unmittelbar mit der Herstellung des Bauwerks beschäftigt. In der Literatur wird für diese vorbereitenden Aufgaben häufig der Begriff Arbeitsvorbereitung verwendet. Die Arbeitsvorbereitung (AV) nimmt in Bauunternehmen oft eine untergeordnete Rolle ein, obwohl gerade in dieser Phase der Auftragsabwicklung viele Möglichkeiten zur effizienten Steuerung des Bauablaufs bestehen. Erhebliche Optimierungspotenziale in wirtschaftlicher, organisatorischer und ökologischer Hinsicht werden so nicht erschlossen. Ziel der Arbeitsvorbereitung ist eine möglichst umfassende Vorbereitung aller Belange während der Auftragsabwicklung. Sie umfasst die langfristige Planung der Produktion (Qualitätssicherung, Kosten-, Finanzierungs-, Verfahrens-, Materialplanung) bis zur kurzfristigen Steuerung des Fertigungsablaufes. Elemente der Arbeitsvorbereitung sind die Informationsbeschaffung, Arbeitsplanung und -steuerung. ([HNR11], S. 18)

Eine umfassende Baustellenorganisation basiert auf den richtigen Informationen über alle den Auftrag betreffenden Belange. Daten über das Produktionsgut, wie beispielsweise zu verwendende Materialien, Termine, Produktionsbedingungen und an der Produktion beteiligte Personen, müssen unmittelbar zu Beginn der Arbeitsvorbereitung vorliegen, um die notwendigen Schritte für eine wirtschaftlich erfolgreiche Auftragsbearbeitung einleiten zu können. ([HNR11], S. 18)

Die Arbeitsplanung beschäftigt sich mit Kernaufgaben der Arbeitsvorbereitung. Hier werden die Grundlagen für eine reibungslose Produktion geschaffen. Mit Auswertung der gesammelten Informationen über Produktionsgut, Fertigungsbedingungen und Erfahrungswerten aus vorangegangenen Aufträgen wird das weitere Vorgehen in der Arbeitsplanung maßgeblich bestimmt. Zu den Bestandteilen der Arbeitsplanung gehören:

- Termin- und Ablaufplanung
- Wahl der Produktionsverfahren
- Einsatz- und Kapazitätsplanung von Personal, Geräten, Material und Fertigungsstätten

- Umfassende Planungsdocumentation
- Kostenplanung

Die Arbeitssteuerung ist dafür zuständig, auf veränderte Randbedingungen mittels Veranlassung von planmäßigen Korrekturen steuernd auf die Produktion einzuwirken. Eine der Arbeitsplanung entsprechende Auftragsabwicklung muss jederzeit sichergestellt sein. ([HNR11], S. 19-20)

Im Gegensatz zur stationären Industrie werden in der Bauwirtschaft in Einzelfertigung Prototypen hergestellt. Die Planung des Bauwerks wird i. d. R. von einem vom Bauherrn betrauten Planer bzw. Fachplaner vorgenommen. Es existiert eine Entkoppelung von Planung und Fertigung. Die Beauftragung der ausführenden Unternehmen erfolgt erst nach Fertigstellung der Planung, vielfach sogar erst nach Beendigung der Ausführungsplanung. Jedoch können gerade in der Planungsphase die Belange der Arbeitsvorbereitung im Hinblick auf die Wahl der Bauverfahren und damit direkt auch der Einsatz von Personal, Material und Geräten maßgeblich beeinflusst werden. Die AV in der Bauwirtschaft ist also kein internes Bindeglied zwischen Konstruktion und Produktion, sondern vielmehr Instrument zur Umsetzung fremder Vorgaben. Das Ideal einer Integration von Planung und Fertigung, wie es in der stationären Industrie vorzufinden ist, muss auch das Ziel der Bauwirtschaft sein. Erkenntnisse der AV fließen selten in zukünftige Planungsphasen ein. In diesem Fall stellt die Schnittstelle zwischen Bauherr/Planer auf der einen Seite und den ausführenden Unternehmen auf der anderen eine anscheinend unüberwindbare Hürde dar. Weiter erschwerend ist, dass sogar nach Auftragserteilung noch Änderungen in der Planung seitens der Bauherren/Planer vorgenommen werden, die einen unmittelbaren Einfluss auf die AV der Bauunternehmen haben. ([HNR11], S. 21)

Durch ständig wechselnde Fertigungsstandorte bzw. Baustellen sind in der AV bei jedem Auftrag vollkommen unterschiedliche Randbedingungen zu beachten, die durch unbeständige Witterung oftmals zusätzlich unvorhersehbar beeinflusst werden. Erschwerend für die AV ist zudem, dass in nahezu allen Bauphasen mehrere Unternehmen gleichzeitig auf der Baustelle tätig sind und die daraus resultierende Schnittstellenproblematik in der Bauausführung ein besonderes Vorgehen in der AV erzwingt. Die klassische Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen beschäftigt sich mit Kosten und Terminen sowie deren Einhaltung in der Ausführungsphase. Ziel ist die Realisierung der Vorgaben des Auftraggebers hinsichtlich Fristen und Ausführungsqualität bei möglichst geringen Kosten bzw. maximaler Wirtschaftlichkeit. Umweltaspekte nehmen nur eine sporadische Rolle in der AV ein und gehen vielfach im Tagesgeschäft unter. Jedoch lassen sich genau zu diesem frühen Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung wirkungsvolle Maßnahmen initiieren. ([HNR11], S. 21)

Die Beeinflussbarkeit ökologischer Aspekte nimmt mit dem Baufortschritt erheblich ab. Es besteht die Gefahr, dass auf wechselnde Randbedingungen nur noch reagiert wird, anstatt diese bereits im Vorfeld zu erkennen und Maßnahmen einzuleiten. Wichtiger Bestandteil in diesem Zusammenhang

ist beispielsweise die Baustelleneinrichtungsplanung, da hier die Funktion der Fertigungsstätte „Baustelle“ im Voraus festgelegt werden kann.

Durch die Ressourcenplanung wird die Anzahl und Menge an Ressourcen, die über einen gewissen Zeitraum auf der Baustelle zur Verfügung stehen müssen, ermittelt. Unter Ressourcen versteht man in diesem Zusammenhang Arbeitskräfte, Geräte, Stoffe, Hilfsmittel sowie finanzielle Mittel. Zur Ressourcenplanung gehören die Personalplanung, die Planung der Fremdleistungen, die Geräteeinsatzplanung sowie die Planung der Baustoffe.

3 Grundlagen der Bodenkunde

Bearbeitet von B. Marx und J. Rinklebe

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen der Bodennutzung

Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) bzw. die Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) regeln den Umgang mit Boden und werden durch die jeweiligen Landesregelungen konkretisiert. In der Verordnung werden Anforderungswerte für Schadstoffe definiert. Bisher gibt es bezüglich der physikalischen Gefahren keine konkreten Anforderungswerte.

„Boden im Sinne dieses Gesetzes ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der (...) Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten“. [§2 (1) BBodSchG98]

Der Schutz des Gesetzes bezieht sich somit auf die folgenden Bodenfunktionen:

1. Natürliche Bodenfunktionen
2. Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte
3. Nutzungsfunktionen.

Der Schutz des Bodens wird auch in weiteren Gesetzen, Verordnungen und sonstigen Regelwerken aufgeführt. Im Bereich Bau sind dies beispielsweise: § 1a (2) Baugesetzbuch (BauGB) „mit Boden ist sparsam und schonend umzugehen“ und § 202 BauGB Schutz des Mutterbodens.

DIN 18300 Erarbeiten, DIN 18320 Landschaftsbauarbeiten, DIN 18915 Vegetationstechnik im Landschaftsbau- Bodenarbeiten und DIN 19731 Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial haben ebenfalls Vorgaben zum Umgang mit Boden.

Darüber hinaus sind im Bereich des Abfallrechts insbesondere die Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und Länderregelungen wie LAGA M20 relevant. Diese Norm gilt bei der Verwertung von mineralischem Abfall für Bauzwecke. Dabei bezieht sich die Norm ausdrücklich auf den Bereich unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht. Zukünftig wird vermutlich die geplante Mantelverordnung ebenfalls relevant sein und ältere Bestimmungen zumindest teilweise ablösen.

Es gibt somit diverse Vorgaben, die beim Umgang mit Boden zu berücksichtigen sind. Das Schutzniveau, welches sich daraus für den Boden konkret ableiten lässt, ist jedoch vergleichsweise gering. Zudem ist aus der Baupraxis bekannt, dass es regelmäßig zu Nichtbeachtung der hier genannten Vorschriften kommt. Teilweise gibt es zudem Diskrepanzen zwischen einzelnen Normen. Dies gilt zum Beispiel für den Abtrag des Oberbodens. Von einzelnen Normen ist der Abtrag gefordert. Er dient

jedoch nicht in jedem Fall dem vorsorgenden Bodenschutz. Das Ziel, den Boden vor schädlichen Einflüssen zu schützen, um so schädliche Veränderungen des Bodens zu vermeiden, wird somit bisher nicht erreicht.

3.2 Chemische und physikalische Bodeneigenschaften

Wenn Böden auf Baustellen aufgegraben werden, sind häufig drei so genannte Horizonte erkennbar. Es lässt sich ein deutlicher Farbunterschied zwischen dem stark humosen Oberboden und dem Unterboden erkennen (Abbildung 2). Nicht abgebildet ist hier das Ausgangsgestein. Die hohe biologische Aktivität und die starke Durchwurzelung nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Es gibt viele verschiedene Bodeneigenschaften, die durch Einflüsse auf Baustellen verändert werden können. Im Folgenden soll auf ausgewählte Bodeneigenschaften kurz eingegangen werden.



Abbildung 2: Bodenhorizonte [Foto: B. Marx]

Die Textur (Körnung) ist eine zentrale Eigenschaft eines Bodens. Sie unterliegt gewöhnlich keiner zeitlichen Dynamik. In der Bodenkunde werden Grobboden (2-630 mm) und Feinboden (> 2 mm) unterschieden. Feinböden werden weiter untergliedert nach ihren Anteilen von Sand (2-0,63 mm) Schluff (0,063-0,002 mm) und Ton ($> 0,002$ mm). Die Bodenart beschreibt das Mischungsverhältnis. In der Bodenkunde werden häufig 31 verschiedene Bodenarten unterschieden. [AdH05] Auf Baustellen werden Substrate eingesetzt, die nicht zwingend der Textur des anstehenden Bodens entsprechen. Zusätzlich kann es zur Zerkleinerung einzelner Körner durch Befahrung kommen. Die Korngröße hat entscheidenden Einfluss auf die Speicherfähigkeit des Bodens für Wasser, Nähr- und Schadstoffe. Generell gilt, dass feinkörnige Böden Nähr- und Schadstoffe sowie Wasser besser speichern können. Boden besteht ca. zu 45 % aus mineralischen Anteilen (Abbildung 3).

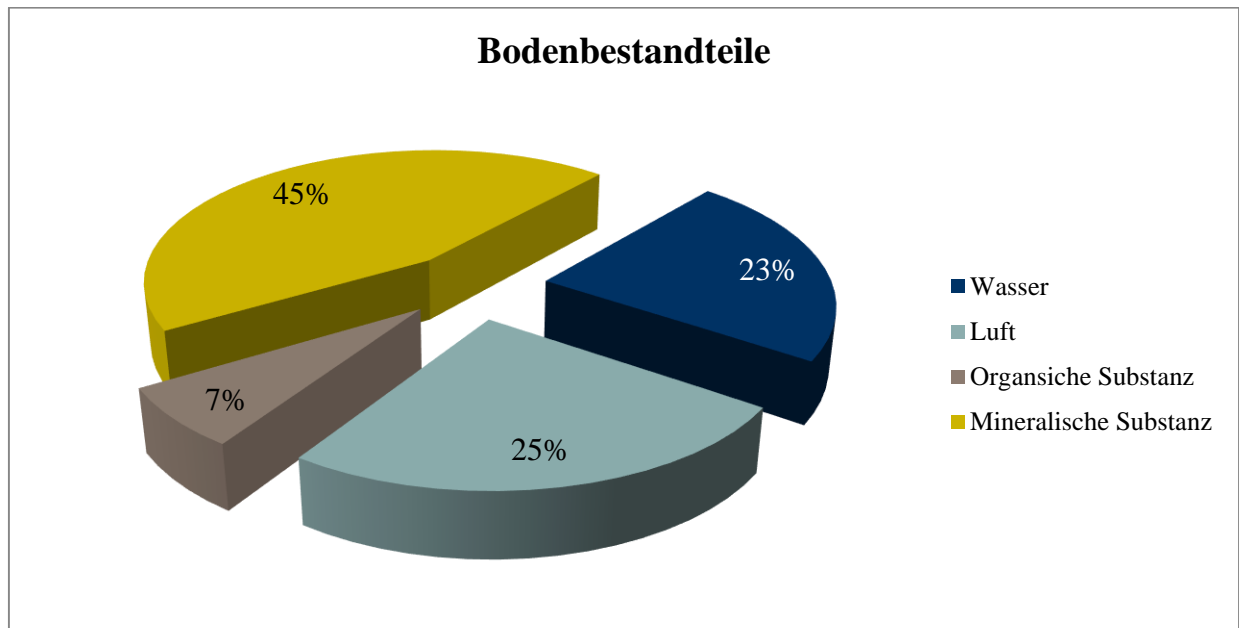


Abbildung 3: Anteile der Bodenbestandteile

Die Zwischenräume zwischen einzelnen Körnern oder Aggregaten bilden das Porensystem. Das Porensystem ist ein weiterer wichtiger Bestandteil des Bodens. Die Poren können je nach Größe und aktuellem Wassergehalt mit Luft oder Wasser gefüllt sein. Es werden 3 Gruppen unterschieden: Grobporen $> 10 \mu\text{m}$, Mittelporen $10\text{-}20 \mu\text{m}$ und Feinporen $< 0,2 \mu\text{m}$. Grobporen können zum Beispiel Regenwurm- oder Wurzelgänge sein. Sie ermöglichen beispielsweise ein schnelles Versickern von Niederschlag. Die Mittelporen sind wichtig für den pflanzenverfügbaren Wasserspeicher. Das Wasser in den Feinporen ist für viele Pflanzen nicht nutzbar.

Wie ein Porensystem aufgebaut ist, ist abhängig von der Körnung, den bodenbildenden Prozessen und der resultierenden Struktur (Gefüge, Aggregate).

Mögliche Gefüge reichen von einzelnen Körnern bis zu scharf abgegrenzten Polyedern (Aggregate). Für die Ausbildung solcher Gefüge sind z. B. die biologische Aktivität und wechselnde Temperaturen sowie Wassergehalte relevant. Durch Befahrung mit schwerem Gerät können sich Plattengefüge ausbilden, die einen Hinweis auf Bodenverdichtung geben können.

Die Verteilung der Poren ist auch entscheidend für die Wasserverhältnisse im Boden. Das Wasser in den Feinporen ist so stark im Boden gebunden, dass es für gewöhnlich in Pflanzenwurzeln nicht verfügbar ist. Wasser in groben Poren versickert mit der Zeit. Dazwischen gibt es Mittelporen. Das hier gespeicherte Wasser ist pflanzenverfügbar.

Bei Verdichtung, wie sie als Folge von Befahrung möglich ist, kann es zu einer Verschiebung der Porenanteile kommen. Parallel dazu ist eine Abnahme des Porenvolumens möglich.

Die gesättigte Leitfähigkeit beschreibt die Versickerungsleistung des Bodens unter konstant nassen Bedingungen. Sie ist primär abhängig vom Porensystem. Hier sind Porenanteile und Konnektivität die relevanten Größen. Es gibt von Natur aus eine große Schwankungsbreite der Leitfähigkeit. Die Bewertung kann zum Beispiel anhand der bodenkundlichen Kartieranleitung [AdH05] erfolgen.

Der Eindringwiderstand korreliert stark mit Körnunggröße, Bodenfeuchte und Lagerungsdichte. Er stellt eine Möglichkeit dar, Verdichtungen indirekt zu messen. Als Parameter ist er nicht unumstritten, aber für wiederkehrende Untersuchungen der gleichen Fläche kann er ergänzend eingesetzt werden.

Die Lagerungsdichte ist abhängig von dem Substanzgewicht, der Körnunggröße und dem Porenvolumen. Typische Lagerungsdichten liegen zwischen 1,2-2 g/cm³.

Der pH-Wert ist für diverse Prozesse im Boden wichtig. Dies gilt insbesondere für die Stoffumsetzung und Mobilität von Nähr- und Schadstoffen. Mit abnehmendem pH-Wert steigt gewöhnlich die Mobilität. Unterhalb von pH 6,5 sind viele Schwermetalle mobil, die zuvor an Tonmineralen adsorbiert waren. Der Grund ist der Austausch von H⁺-Ionen an den Oberflächen der Tonminerale. Auf Baustellen können aufgrund der eingesetzten Materialien extreme pH-Werte erwartet werden. Üblicherweise liegen pH-Werte im Boden zwischen 3-10. [SSB10]

Der Kohlenstoffgehalt im Boden setzt sich aus organischen und anorganischen Komponenten zusammen. Der C_{org}-Gehalt gilt als Indikator für den Humusanteil (Faktor 1.724). Vereinfacht lässt sich sagen: $C_{org} = C_{ges.} - C_{anorg.}$. Die Unterscheidung C_{org} / C_{anorg} ist wichtig, da sowohl organische (MKW, PAK), als auch anorganische Schadstoffe (Schwermetalle) besonders am Humus gebunden werden können. Auf Baustellen werden carbonatreiche Materialien verwendet, daher sind hohe C_{anorg}-Anteile am Gesamtkohlenstoffgehalt zu erwarten. C_{anorg} kommt bei pH-Werten kleiner 7,5 gewöhnlich nicht vor.

Typische C-Gehalte liegen in Oberböden zwischen 7,5-20 g·kg⁻¹ und in Unterböden zwischen 1-10 g·kg⁻¹. In Mooren können Werte um die 500 g·kg⁻¹ erwartet werden. [SSB10]

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Indikator für gelöste Salze. Diese können durch Auswaschung aus Baustoffen in den Boden gelangen. Salze können in hohen Konzentrationen direkt schädlich für Pflanzen sein. Des Weiteren erschweren Salze die Wasser- und Nährstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln. Bei nachweislich hohen Werten der Leitfähigkeit kann eine Bestimmung der relevanten Salze sinnvoll sein.

Bei der Bestimmung von Schadstoffen wie Schwermetallen gibt es verschiedene Methoden. Neben dem Gesamtgehalt können auch die unterschiedlich mobilen Fraktionen untersucht werden. Üblicherweise werden jedoch zunächst Gesamtgehalte bestimmt, um weitere, aufwendigere Messungen zu planen. Ähnliches gilt für die Untersuchung von organischen Schadstoffen.

Grundsätzlich gilt dabei, die Schwermetallmobilität nimmt zu:

- mit abnehmendem pH-Wert (< 6.5)
- mit abnehmendem Tongehalt
- mit abnehmendem Humusgehalt
- mit abnehmendem Gehalt pedogener Oxide (Eisen- und Manganoxide)
- mit zunehmenden Gesamtgehalten
- (bei Cd) mit zunehmendem Chloridgehalt (Cd-Chloro-Komplexe)

Die Mobilität von organischen Schadstoffen nimmt mit zunehmender Viskosität und Hydrophilität zu. Im Gegensatz zu anorganischen Schadstoffen kann es zu einem natürlichen Abbau der Ausgangsstoffe kommen.

Allgemein nimmt die Mobilität von Stoffen im Boden zusätzlich mit Erhöhung der Sickerwasserrate zu.

Da Böden auch durch die Ausgangsgesteine und atmosphärische Einflüsse erhöhte Gehalte mit Hinblick auf das BBodSchG aufweisen können, ist es sinnvoll, die 2003 von der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz veröffentlichten „Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden“ für eine Bewertung mit einzubeziehen.

Bei der Bewertung der Schadstoffe sind Anforderungswerte nach BBodSchV beziehungsweise nach Abfallrecht LAGA M20 bzw. ALEX 02 heran zu ziehen.

4 Material und Methoden

Bearbeitet von B. Marx, A. Randel und J. Rinklebe

4.1 Prozess- und Stoffstromanalyse Hochbau

4.1.1 Grundlagen des Erdbaus und Maschineneinsatz

Der Begriff Erdbau umfasst sämtliche Baumaßnahmen, bei denen Böden in ihrer Form und ihrer Lagerungsbeschaffenheit verändert werden. Erdbauleistungen umfassen im Allgemeinen das Lösen und Laden oder das Verteilen, Einbauen und Verdichten von Böden, Fels oder anderen Baustoffen wie beispielsweise Schotter, Kies oder Recycling-Material zur Modellierung des Geländes oder zum Erstellen von Bauwerken im Bereich des gewachsenen Bodens. Diese Leistungen oder Teile davon treten in irgendeiner Form bei fast allen Baumaßnahmen auf. Allen Erdbauleistungen gemein ist ein hoher Maschineneinsatz, da das Bewegen großer Erdmassen oder erdähnlicher Baustoffe nur durch diesen wirtschaftlich zu realisieren ist. ([Wit09] S. 1)

Der Oberbodenabtrag soll möglichst auf dem ganzen Baufeld fertig gestellt werden, bevor mit anderen Bautätigkeiten begonnen wird. Der Bodenaushub kann entweder schürfend oder grabend erfolgen. Der Boden wird von der Baumaschine (Planierraupe, Raddozer oder Grader) zur Seite oder vor sich hergeschoben und mit Radladern oder Raupenladern verladen oder von der Baumaschine (Scraper oder Schürfkübelraupe) abgeschoben, geladen und transportiert. Oberboden wird wie anderer Aushub auf sogenannten Mieten gelagert. Grundsätzlich sollte nicht mehr benötigter Oberboden ohne Zwischenlagerung von der Baustelle transportiert werden, um Baustellenflächen zu sparen und potenzielle Hindernisse zu vermeiden. Es existieren spezielle Anforderungen an Oberbodenmieten, wie z. B. eine ausreichende Durchlüftung durch Anpassen der Mietenhöhe oder Maßnahmen gegen Vernässung. Dazu gehören die Anlage von Entwässerungsgräben an den Seiten der Mieten und eine Profilierung von mindestens 2 %, um das Aufstauen von Oberflächenwasser zu vermeiden. Die Höhe von Oberbodenmieten ist nach DIN 19731 für humosen Oberboden auf maximal 2,00 m mit einem Böschungswinkel von 45° beschränkt, praxisüblich sind Miethöhen von ca. 1,30 m. Die Schichtdicke für das Einbauen des Oberbodens richtet sich nach dem späteren Verwendungszweck. Rasenflächen benötigen etwa 10 cm Dicke, für eine andere Bepflanzung sind größere Schichtdicken notwendig. Bevor der Oberboden auf eine verdichtete Bodenfläche aufgebracht wird, ist sie aufzulockern, um eine bessere Verzahnung zwischen den Bodenschichten zu erzielen. [Gra11]

Zu den gängigsten Erdbaugeräten zählen

- Hydraulikbagger
- Radlader
- Planierraupen

- Verdichtungsgeräte
- Transportgeräte.

Zunächst werden einige Erdbaugeräte vorgestellt, um ihre grundlegenden Eigenschaften aufzuzeigen und einen Überblick über die Vielzahl von Baugrößen und Einsatzmöglichkeiten zu schaffen. Weiterhin werden Aspekte vorgestellt, die die Leistung der Maschinen beeinflussen können.

Der *Hydraulikbagger* ist ein universell einsetzbares Erdbaugerät, welches sich gleichermaßen zum Lösen, Laden, Verteilen und Profilieren eignet. Durch den Anbau von Vibrationsplatten kann der Hydraulikbagger auch für die Verdichtung kleiner Flächen eingesetzt werden. Weiterhin werden Hydraulikbagger als Universalhebezeuge auf Baustellen eingesetzt und können als Trägergerät für Bohr- oder Rammgeräte dienen. Hydraulikbagger können abhängig vom Einsatzgebiet stark unterschiedliche Baugrößen haben. Diese reichen von Minibaggern mit 2,0 t Einsatzgewicht und 5,0 kW Leistung für den leichten Einsatz im Gartenbau oder innerhalb von Gebäuden bis hin zum Großgerät für den Tagebau mit bis zu 980 t Einsatzgewicht und 3360 kW Leistung. ([Gar09], S. 50) Im Erdbau kommen in der Regel Hydraulikbagger mit Einsatzgewichten zwischen 20 t und 60 t zum Einsatz. Weiterhin werden Hydraulikbagger nach ihrem Fahrwerk unterschieden. Bagger mit Raupenfahrwerk (Raupenbagger) eignen sich für schwere und nasse Böden und kommen daher immer zum Einsatz, wenn eine hohe Standfestigkeit notwendig ist. Bagger mit Reifenfahrwerk (Mobilbagger) werden auf trockenem und festem Untergrund eingesetzt und können Straßen zerstörungsfrei befahren. ([HK11], S. 745)

Radlader zeichnen sich durch ihre sehr hohe Mobilität aus und werden für die Prozesse Lösen, Laden, und Transporte verwendet. Radlader können ähnlich dem Hydraulikbagger aufgrund ihrer Motorleistung sowie ihrer Bauweise in drei Baugrößen unterteilt werden. Bis zu 40 kW Motorleistung und mit einem Betriebsgewicht von bis zu ca. 3,5 t bezeichnet man Radlader als Kompaktlader. Die Baugröße 2 beinhaltet Kleinlader, welche eine Motorleistung bis zu 65 kW und ein Betriebsgewicht von bis zu 7,5 t aufweisen. Ab ca. 9 t Betriebsgewicht und einer Motorleistung von ca. 70 kW bilden die sog. Großlader die Bauklasse 3, sie dienen überwiegend als Ladegeräte. ([Kön08] S. 113-114)

Planierraupen gehören zu den Flachbaggern. Sie werden zum Lösen, Transportieren und Einbauen von Böden eingesetzt. Dabei sind sie insbesondere für große Auf- und Abtragsflächen geeignet. Beim Bodentransport gelten Entfernungen bis etwa 50 m als wirtschaftlich. ([Kön08] S. 132) Für größere Transportentfernungen sollten Zwischentransporte mit Radfahrwerk durchgeführt werden, wobei zu beachten ist, dass in dem Fall noch weitere Geräte eingesetzt werden müssen. Die Baugrößen von Planierraupen liegen zwischen 7 t und 100 t. Dabei werden in der Regel nur die Geräte bis 50 t im Straßen- und Erdbau eingesetzt. Wie bei den Hydraulikbaggern wird die Leistung der Planierraupen durch die Klasse des anstehenden Bodens beeinflusst.

Zur *Verdichtung* steht eine Vielzahl verschiedener Geräte zur Verfügung. Es sind handgeführte Vibrationsplatten, Stampfer, verschiedene Arten von Walzen, Tiefenrüttler usw. gängig. Während die bisher vorgestellten Geräte verschiedene Erdbauleistungen erbringen können, sind Walzenzüge nur für das Verdichten von Böden geeignet. Die Verdichtung wird entweder statisch durch das Eigengewicht des Gerätes oder dynamisch durch zusätzliche Vibration erreicht. Die Vibration wird mit Hilfe einer exzentrisch angebrachten Masse in der Bandage erzeugt. In der Regel sind mehrere Frequenzen einstellbar, um den Anforderungen der verschiedenen Gegebenheiten Rechnung zu tragen. Die Baugrößen von Erdbauwalzen liegen bei 3-25 t, wobei die Motorleistung zwischen 33 kW und 150 kW liegt.

Die Einrichtung einer Baustelle sowie der Erdbau selbst erfordern in der Regel eine umfangreiche logistische Planung, um ein Projekt wirtschaftlich und energieeffizient abzuwickeln. Neben der An- bzw. Ablieferung von Baustoffen, sind häufig auch *Baustellentransporte* erforderlich. Bei geringen Transportentfernungen werden diese mit Raupen oder anderen Geräten durchgeführt. Für größere Transportentfernungen ist es sinnvoll, Lastkraftwagen (LKW) oder Schwerlastkraftwagen (SKW) einzusetzen. LKW sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Straßenzulassung besitzen und daher sowohl zur An- und Ablieferung von Baustoffen über öffentliche Straßen, als auch für Baustellentransporte eingesetzt werden können. Es ist zu beachten, dass bei Schüttgütern, wie sie im Baubetrieb üblich sind, das maximale Transportvolumen des LKW häufig nicht ausgenutzt werden kann. Aufgrund der Dichte der Baustoffe (z. B. Bodenaushub mit $1,7 \text{ t/m}^3$) ist das Gewicht der Ladung hier der limitierende Faktor. Ein Sattelzug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t kann demnach nur mit etwa 16 m^3 Material beladen werden.

4.1.2 Grundlagen des Hochbaus und Maschineneinsatz

Das wichtigste Ergebnis einer vollständigen Arbeitsvorbereitung ist der Baustelleneinrichtungsplan. Die Baustelleneinrichtung bildet das Bindeglied zwischen Planung und Ausführung. Der Baustelleneinrichtungsplan stellt die Dimensionierung räumlich und zeitlich einzusetzender Ressourcen (Arbeitskräfte, Material, Geräte, Lagerfläche etc.) dar und liefert eine vollkommene Beschreibung der Baustelle für Personal, Nachunternehmer sowie Lieferanten.

Die Elemente einer Baustelleneinrichtung bei Hochbaumaßnahmen können in folgende sechs Hauptgruppen eingeordnet werden:

- Großgeräte
- Sozial- und Büroeinrichtungen, geschlossene Lagerräume
- Verkehrsflächen und Transportwege
- Medienversorgung und Entsorgung
- Baustellensicherung/Sicherheits- und Schutzeinrichtungen sowie
- Baugrubensicherung und Baugruben im Grundwasser.

Relevant für die Ressource Boden sind die ersten drei Gruppen, auf die hier detaillierter eingegangen wird.

Auf Baustellen werden die unterschiedlichsten *Großgeräte* eingesetzt, wie z. B.:

- Turmdreh- und Fahrzeugkrane
- Autobetonpumpen
- Bagger und Radlader als Hebezeuge
- Teleskopstapler
- Hubbühnen
- Geräte des Spezialtiefbaus
- Misch- und Aufbereitungsanlagen
- Werkzeuge und Kleingeräte. ([SO11], S. 13)

Ein Turmdrehkran besteht aus Turm, Unterbau und Ausleger. Die Kranfundamente werden in der Regel aus Beton hergestellt und werden nach dem anstehenden Baugrund sowie den statischen Erfordernissen dimensioniert. Die Ausbildung erfolgt üblicherweise als Ortbeton-Einzelfundament oder Fertigteilfundament. Die erforderliche Stellfläche hängt von Größe und Art des Kranes ab. Bei Obendrehern liegt die Stellfläche zwischen 4 x 4 m bis 10 x 10 m. Für den Auf- und Abbau des Turmdrehkrans werden in jedem Fall Zu- und Abfahrtsmöglichkeiten sowie Stellflächen für Autokrane und LKW benötigt.

Autobetonpumpen sind Großgeräte, die in der Regel nur temporär auf Baustellen eingesetzt werden. Sie bestehen aus einem LKW-Chassis, auf dem eine Betonpumpe sowie ein drehbarer Verteilermast mit einem parallel dazu verlaufenden Beton-Förderrohr befestigt sind. Mit Hilfe dieser Geräte wird Beton von Fahrmischern möglichst in einem stetigen Vorgang aufgenommen und durch die Rohr- und Schlauchleitungen des Verteilermastes zu den jeweiligen Einbaustellen gefördert. Die Aufstellung der Autobetonpumpe darf nur auf einem ausreichend tragfähigen, möglichst horizontalen Untergrund und

unter Beachtung von Sicherheitsabständen zu Baugruben und Freileitungen erfolgen. Die erforderliche Stellfläche liegt zwischen 10 x 7 m und 18 x 14 m. Wird Restbeton aus den Fahrmischern auf der Baustelle zurückgelassen, sollte dafür ein geeigneter Ort ausgewiesen werden. Die Reinigung von Betonfahrmischern und Autobetonpumpen auf der Baustelle sollte sich ausschließlich auf die Reinigung des Trichters oder der Schurre beschränken.

Bei sehr großen oder weit abgelegenen Baustellen kann die Herstellung von Beton oder Asphalt in mobilen Beton- oder Asphaltmischanlagen wirtschaftlich sein. Mörtelmischanlagen kommen hingegen bei vielen Hochbau-Baustellen zum Einsatz. Falls Mauerwerk errichtet oder Putz aufgebracht werden muss, wird Mörtel benötigt. Entweder erfolgt der Bezug von fertig gemischtem Mörtel, eventuell mit Langzeitverzögerern versehen, so dass er während eines ganzen Arbeitstages verarbeitet werden kann oder er wird selbst hergestellt, wobei sich heute weitgehend der Einsatz von Wechselsilos durchgesetzt hat, in denen werksgemischter Trockenmörtel zwischengelagert und mit einem angeflanschten Mischer aufbereitet wird.

Neben den in den vorigen Abschnitten aufgeführten Baumaschinen gibt es zahlreiche Kleingeräte und Werkzeuge, welche die manuelle Arbeit erst ermöglichen oder stark unterstützen und so zur wirtschaftlichen Bauabwicklung beitragen. Für jedes Gewerk gibt es zahlreiche Standard- und Spezialwerkzeuge. Relevant sind in erster Linie Sägen, Trennschleifer, Trennschneider und Trommelmischer, da bei deren Benutzung der Boden beeinflusst werden kann.

Neben der Planung des Großgeräteinsatzes auf der Baustelle gehört zur Planung der Baustelleneinrichtung auch die vor Witterungseinflüssen geschützte *Unterbringung* von Arbeitskräften, Baustoffen, Kleingeräten, Ersatzteilen usw. Hierzu gehören vor allem Pausen- und Umkleieräume als Aufenthaltsmöglichkeit für die Arbeitskräfte, Sanitäranlagen, Büroflächen zur Unterbringung des Aufsichts- und Verwaltungspersonals, Magazine für die Unterbringung von Kleingeräten, Werkzeugen, Ersatzteilen oder Baumaterialien sowie zur Lagerung witterungsempfindlicher Baustoffe. Die genannten Räumlichkeiten werden entweder in bereits vorhandenen oder während der Bauphase erstellten Gebäuden auf oder in der Nähe der Baustelle, fahrbaren Bau- oder Wohnwagen oder in Containern bereitgestellt. Am häufigsten werden Container eingesetzt, die sich aufgrund der Standardmaße horizontal beliebig erweitern und sind vertikal bis zur dreifachen Höhe stapeln lassen.

Zu den *Verkehrsflächen und Transportwegen* auf Baustellen gehören Baustraßen und -wege, Werk- und Bearbeitungsflächen sowie Lagerflächen. Die Baustraßen sind zu unterscheiden in reine Baustraßen, die ausschließlich von Baufahrzeugen befahren werden, und Straßenprovisorien, die durch den privaten und öffentlichen Verkehr gemeinsam genutzt werden (z. B. Vorstufenausbau von Erschließungsstraßen). Im Sinne des Bodenschutzes sollten Baustraßen so angelegt und befestigt werden, dass sie später als Unterbau für die endgültigen Straßen und Wege verwendet werden können. Der Aufbau der Baustraße reicht dabei von einer bloßen Verdichtung des Bodens über einen einfachen Oberbau

aus verdichtetem Beton-/Ziegelrecyclingmaterial bis hin zu einem mehrschichtigen Aufbau mit einer bituminösen Deckschicht. Bei der Herstellung von Baustraßen muss der vorhandene, im Baustraßenbereich befindliche Oberboden grundsätzlich abgeschoben werden. Bei langen Baustraßen und sehr bindigen Bodenverhältnissen kann weiterhin durch eine Bodenstabilisierung mit Kalk oder Zement der anstehende Baugrund verbessert werden. Sobald die Rohbauphase auf der Baustelle beginnt, werden Werk- und Bearbeitungsflächen eingerichtet. Diese sind witterungsgeschützt und ebenerdig einzurichten sowie mit einer wetterfesten Oberfläche zu versehen. Lager- und Stellflächen werden hauptsächlich für Schüttgüter (Sande, Kiese usw.), Baustoffe, Schal- und Rüstmaterial, Silos sowie Oberböden und andere Böden benötigt. Dabei wird unterschieden in Lagerflächen für eine kurzfristige Zwischenlagerung (z. B. für Fertigteile) und in Lagerflächen für eine langfristige Vorratslagerung (z. B. für Erdmaterial).

4.2 Ermittlung von Hot Spots

Zu Identifizierung so genannter Hot Spots auf Baustellen sind sowohl die zeitliche, als auch die örtliche Dimension entscheidend. Diese sind i. d. R. durch Terminpläne und Baustelleneinrichtungspläne zu ermitteln. Im Vergleich zur stationären Industrie ergibt sich im Zuge des Bauprojekttablaufs die Besonderheit, dass die Produktionsinfrastruktur mit jedem neuen Bauvorhaben aufs Neue erstellt werden muss und somit als mobile Industrie zu betrachten ist. ([Gir14], S. 164) Das Ergebnis der Baustelleneinrichtung wird im Baustelleneinrichtungsplan (BE-Plan) mit einem Maßstab von 1:500 oder 1:200 dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Lageplan, welcher eine Flächenzuweisung des Baugeländes vornimmt und u.a. folgende Punkte beinhaltet:

- Bauwerk und Nebenanlagen
- Beschaffenheit des Baugeländes
- Verkehrsverhältnisse
- Zufahrten zum Baugelände
- Einfriedungen des Baugeländes
- Baufeldeinrichtungen (Unterkünfte, Büro- und Sanitärräume, Notrufstelle, etc.)
- Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen
- Kanäle und Leitungen
- Lagerflächen
- Schwenkbereich der Turmdrehkrane
- Betriebsflächen (Baugruben, Böschungen, etc.). ([Gir14], S. 211-215)

Um die einzelnen Vorgänge und deren Reihenfolge während des Bauprozesses darzustellen, sind Terminpläne essentiell. Werden die Vorgänge in weiterer Folge konkreten Terminen zugeordnet, ergibt sich aus der Ablaufplanung die Terminplanung. Häufig wird jedoch der Begriff Bauablaufplanung als Synonym für die Terminplanung verwendet.

Die Abwicklung eines Bauvorhabens erfordert eine sehr hohe Anzahl an notwendigen Vorgängen. Zudem ist die Ablaufplanung ein sehr dynamischer Prozess, denn mit fortschreitendem Bauablauf nimmt auch Informationsmenge zur Durchführung des Bauvorhabens zu, sodass die Ablaufplanung ständig ergänzt, verfeinert und ggf. sogar korrigiert werden muss. Zusätzlich sind Aussagen über Termine mit zunehmenden Abstand zum Eintreten immer ungenauer. ([Bis06], S. 49) Ziel der Terminplanung ist es, die notwendigen Voraussetzungen für eine wirtschaftlich optimale Bauausführung zu schaffen. Dies bedeutet, dass Arbeitskräfte, Bauproduktionsmittel, Baustoffe und ggf. Nach-/Nebenunternehmer zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der erforderlichen Menge zur Verfügung stehen. ([BKS08], S. 24)

Im Rahmen der Prozessanalyse wurden vor Einrichtung und Betrieb der Baustelle Orte möglicher negativer Auswirkungen (Hot Spots) sowie weitgehend unbeeinflusste Flächen identifiziert und anschließend regelmäßig beprobt. Die Beprobung dieser Flächen wurde nach Beendigung der Baumaßnahme wiederholt. Somit konnten Auswirkungen relevanter Bauphasen festgestellt werden, zusätzlich stellte sich die Vorher-Nachher-Situation dar.

Generell wurde zwischen physikalischen und chemischen Hot Spots unterschieden:

Physikalische Hot Spots	Chemische Hot Spots
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spätere Grün- und Freiflächen ▪ Bodenmieten ▪ Materiallager ▪ Baucontainer ▪ Parkplatz Baumaschinen ▪ Baustraßen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fundament und Bodenplatte ▪ Fassadenarbeiten ▪ Silos ▪ Abfallcontainer ▪ Materiallager ▪ Spezielle Arbeitsbereiche (Trenn-, Säge- und Schleifarbeiten) ▪ Mobile Betankung ▪ Parkplatz Baumaschinen ▪ Baustraßen ▪ Abwasser Straßenreinigung

Tabelle 1: Physikalische und chemische Hot Spots im Überblick

Die aufgelisteten Hot Spots leiten sich aus gängigen Baustellenprozessen ab, die in der Regel für alle untersuchten Baustellen relevant waren.

Im Folgenden werden diese Baustellenprozesse beschrieben und für das Projekt definiert.

4.2.1 Erdbau

Der Erdbau umfasst alle erforderlichen Vorgänge zum Bewegen von Bodenmassen und der damit verbundenen Veränderung der Erdoberfläche. Dabei handelt es sich in der Regel um den Aushub von Baugruben für Gebäude, aber auch um den Bodenabtrag und Bodenauftrag. Neben dem Baugrubenaushub gehören auch die Erstellung von Transportwegen wie Baustraßen, Gräben für Kanäle, Rohr- und sonstige Leitungen sowie Verfüll- und Verdichtungsarbeiten zum Spektrum des Erdbaus. Die im Erdbau auszuführenden Arbeiten umfassen folgende Teilvorgänge:

Erdarbeiten	Ausheben von Baugruben	Abtragen von Boden	Fördern	Einbau von Erdbaustoffen	Verdichten von Erdbaustoffen
Prozess	Lösen	Laden	Transportieren	Einbringen	Verdichten
Maschineneinsatz	- Bagger - Raupen - Radlader		- Fahrbagger - Flachbagger - Lkw - Muldenkipper - Dumper	- Planierraupen	- Statische Walzen - Vibrationswalzen

Tabelle 2: Prozesse und Maschineneinsatz im Erdbau

Bei den Bodenzuständen unterscheidet man zwischen natürlicher Lagerung (gewachsener Boden), aufgelockerter Lagerung (gelöster Boden) und verdichtetem Boden.

Zu den vorbereitenden Arbeiten auf der Baustelle gehören Geländeaufnahmen sowie geologische boden- und felsmechanische Untersuchungen zur Beurteilung und Klassifizierung der anstehenden Böden. Ebenso erfolgen eine Mengenermittlung und die Abschätzung von Förderwegen und -weiten. ([ZDKB13], S. 874-886)

4.2.2 Baustelleneinrichtung

Damit die Bauproduktion im Rahmen der wirtschaftlichen, terminlichen und qualitativen Vorgaben durchgeführt werden kann, muss eine optimal eingerichtete Fertigungsstätte zur Verfügung stehen. Die Baustelleneinrichtung muss sich daher im Laufe des Bauens neuen Anforderungen anpassen. Neben ausgewählten Großgeräten werden für den Betrieb einer Baustelle weitere Elemente wie Werkplätze, Lagerflächen, Verkehrseinrichtungen, Sozialeinrichtungen, Strom- und Wasserversorgung, Sicherung der Baustelle und die Abfallentsorgung benötigt. Diese Elemente können in jedem Arbeitsfeld vorhanden sein, im Schnittbereich von Arbeitsfeldern liegen oder allgemeine zentrale Einrichtungen sein. ([ZDKB13], S. 862-865) Der Umfang der Baustelleneinrichtung ist abhängig von der Art, Größe und Dauer der Baumaßnahme. Darüber hinaus muss sie entsprechend des Baufortschritts angepasst werden. Die Qualität der Baustelleneinrichtungsplanung ist somit grundlegend für den Erfolg einer Baumaßnahme. Die im Rahmen der Baustelleneinrichtung auftretenden Prozesse werden nachfolgend dargestellt.

Baustelleneinrichtung			Prozess
Geräte	Misch- und Aufbereitungsanlagen	Putzsilo	Verunreinigung des Bodens mit Putz- und Mörtelresten
		Mörtelmischer	
	Werkzeuge und Kleingeräte	Trennschneider	Verunreinigung des Bodens mit metallhaltigem oder mine- ralischen Sägemehl oder -späne
		Sägen	
Sozial- und Lagerräume	Magazine für Geräte und Betriebsstoffe	Materialcontainer	Tropfverluste von Betriebs- stoffen
Verkehrsflächen und Transportwege	Baustraßen und Bauwege		Verunreinigung des Bodens mit organischen Schadstoffen
	Werk- und Bearbeitungsflächen		Verunreinigung des Bodens mit metallhaltigem oder mine- ralischen Sägemehl oder -spänen
	Lager- und Stellflächen		Tropfverluste von Kraftstoffen auf Parkplätzen
Medienversor- gung und Entsorgung	Mobile Tankanlagen	Mobile Betankung von Fahrzeugen und Geräten	Tropfverluste bei mobiler Be- tankung
	Abfallentsorgung	Baustellenabfälle	Verunreinigung des Bodens mit Baustellenabfällen und Bauschutt

Tabelle 3: Prozesse der Baustelleneinrichtung

4.2.3 Rohbau

4.2.3.1 Fertigteilbau

Im Gegensatz zum Ortbeton werden Stahlbetonfertigteile in stationären Anlagen außerhalb des Bauwerkshergestellt und zur Baustelle transportiert und dort eingebaut. Die Anlieferung der Fertigteile zur Baustelle erfolgt nach einem Abrufplan, der auf die Montagefolge abgestimmt sein muss. Anschließend werden die Fertigteile auf der Baustelle kurzfristig zwischengelagert oder optimalerweise unmittelbar montiert. Für die Montage ist vor allem die Baustellensituation, die Zufahrten, die Befahrbarkeit und Belastbarkeit des Baugeländes durch Hebezeuge und Transportfahrzeuge, der Platz für die Baustelleneinrichtung und die Lagerung von Fertigteilen relevant. Bei Industrie- und Hallenbauwerken kommen üblicherweise Mobilkrane mit Schrägausleger als Hebezeug zum Einsatz. ([ZDKB13], S. 941-952)

4.2.3.2 Mauerwerksbau

Im Rohbau wird sowohl für Innen-, als auch für Außenwände im Allgemeinen Kalksandstein verwendet. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit ist die Kombination mit Dämmstoffen zweckmäßig. Zweischalige Außenwände mit Kerndämmung bestehen aus zwei massiven Mauerschalen und einer dazwischenliegenden Wärmedämmung. Das Aufmauern der Wände beginnt mit einer Ausgleichsschicht aus Normalmörtel, anschließend wird Dünnbettmörtel mit dem Mörtelschlitten aufgetragen und unter Zuhilfenahme eines Versetzgerätes gemauert. Nach Befestigung der Kerndämmplatten erfolgt die Verblendung mit Klinkersteinen. Das Anpassen der Klinkersteine erfolgt durch die Benutzung einer (Diamant-)Steinsäge.

Wandaufbau	Kalksandstein		Kerndämmung	Klinker
Prozess	Aufmauern der Kimmschicht	Mauern Kalksandstein	Anbringen Wärmedämmung	Verblendung der Außenwände
Produkteinsatz	Normalmörtel	Dünnbettmörtel	Steinwolle	Klinker und Fugenmörtel

Tabelle 4: Prozesse und Produkteinsatz beim Mauerwerksbau

4.2.3.3 Wärmedämmverbundsysteme

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) sind Konstruktionen, bei denen eine Funktionstrennung zwischen der Außenwand an sich und der Funktion „Dämmen“, „Schützen“ und „Gestalten“ herrscht. Sie werden auf Untergründen wie Kalksandstein oder Beton angebracht, ausreichende Tragfähigkeit des Untergrundes vorausgesetzt. WDVS werden in der Regel vollflächig verklebt oder angedübelt. ([Pro08], S. 203-204) Der Wandaufbau setzt sich folgendermaßen zusammen:

Wandaufbau	Verklebung	Dämmung	Armierung	Schlussbeschichtung
Prozess	Auftrag von Kleber	Zuschnitt und Anbringung der Dämmplatten	Auftrag von Armierungsmasse und -gewebe	Auftrag von Putz
Produkteinsatz	Mineralischer Klebemörtel	Polystyrol	Mineralischer Armierungsmörtel und Armierungsgewebe	Silikonharzputz

Tabelle 5: Prozesse und Produkteinsatz bei Fassadenarbeiten

4.2.4 Außenanlagen

Relevant für die Ausübung von Landschaftsbauarbeiten auf Baustellen ist die DIN 18915 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten. Sie regelt die Qualität und Anwendung von auf Baustellen hergestellten Bodensubstraten für Vegetationstragschichten mit Bodenanschluss für den punktuellen oder flächigen Einbau im Garten- und Landschaftsbau. ([ABD15], S. 29) Hierzu gehören u. a. Pflanzarbeiten sowie Rasen- und Saatarbeiten. Bei der Herstellung von Vegetationsflächen hängen Erfordernisse, Umfang und Zeitpunkt der Leistungen von der vorgesehenen Begrünung und den Standortverhältnissen ab. Vor der Bodenbearbeitung sind in jedem Fall Baurückstände, Verpackungsreste und sonstige Abfälle zu entfernen. ([ABD15], S. 56-57) Der Einbau erfolgt möglichst mit Bagger oder Radlader, die Überführung sollte nur bei optimalen Bedingungen stattfinden. Unter- und Oberboden sind lagenweise einzubauen, die Vegetationstragschicht ist abhängig von der späteren Nutzung. Bei Rasen reichen i. d. R. 10-20 cm, für Gehölz- und Staudenflächen sind 20-40 cm notwendig. ([ABD15], S. 108-109)

Die auftretenden Prozesse werden nachfolgend dargestellt.

Erstellung von Außenanlagen	Bodenabtrag	Bodenlagerung	Einbau	Bodenverbesserung
Prozess	Laden	Getrennte Lagerung von Ober- und Unterboden	Transport und lagenweiser Auftrag, Bodenlockerung	Einbringen von organischen Stoffen
Maschineneinsatz	<ul style="list-style-type: none"> - Bagger - Raupen - Radlader 		<ul style="list-style-type: none"> - Bagger - Radlader 	<ul style="list-style-type: none"> - Radlader mit Anbaugeräten - Erdschredder - händisches Einharken

Tabelle 6: Prozesse bei der Erstellung von Außenanlagen

4.3 Feldbodenkundliche Methoden

Bestimmung des Eindringwiderstands mittels Penetrologger (Eijkelkamp)

Der Eindringwiderstand mittels Penetrologger wurde mit einer 1 cm² Spitze mit 60° bestimmt. Die Penetrationsgeschwindigkeit betrug 2 cm/s. Es wurden pro Untersuchungspunkt (Plot) 4 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die verwendete Software war PenetroViewer 4.24.

Bestimmung des Eindringwiderstands mittels leichter Rammsonde (LRS) DIN 4094-3 (2003)

Der Eindringwiderstand mittels leichter Rammsonde erfolgte mit einer 5 cm² Spitze mit 90°. Es wurden die notwendigen Schläge pro 10 cm Eindringtiefe ermittelt. Das Gewicht des Rammbärs betrug 10 kg und die Fallhöhe 50 cm.

Bestimmung der Bodenart (Fingerprobe nach KA5)

Die Bestimmung der Bodenart erfolgte gemäß der bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5). An ausgewählten Proben erfolgte zudem eine Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß DIN 18123 (04/2011).

4.4 Labormethoden

Bestimmung der Trockenrohddichte ISO 11272 (1998)

Die Bestimmung der Trockenrohddichte erfolgte an 100 cm³-Stechzylindern. Die Trocknung erfolgte bei 105 °C in einem Trockenschrank. Je Horizont wurde die Dichte anhand von 6 Proben (5 Wiederholungen) durchgeführt.

Bestimmung der Korngrößenverteilung DIN 18123 (04/2011)

Die Siebung erfolgte im mechanischen Nasssiebverfahren. Bei der Bestimmung der Korngrößen wurden die einzelnen Siebrückstände gravimetrisch ermittelt. Der feinste Siebdurchgang (< 0,125 mm) wurde dispergiert (Natriumpyrophosphat) und die Korngrößen mittels Aereometerverfahren bestimmt.

Verwendete Siebgrößen: 8,0 mm, 4,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm und 0,125 mm.

Dispergierungsmittel: Natriumpyrophosphat Na₄O₇P₂ x 10 H₂O 1 g/1000 ml

Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4) DIN 38414-4 (10/1984)

Die Eluation nach DEV S4 erfolgte 24 h im Überkopfschüttler im Verhältnis 1:10 Feststoff/VE-Wasser. Die Eluate wurden anschließend zentrifugiert und danach gefiltert.

Extraktion von Spurenelementen aus Böden mit Ammoniumnitratlösung DIN ISO 19730 (2008)

Die Extraktion erfolgte 120 Min. im Überkopfschüttler im Verhältnis 1:2,5 Feststoff/1 mol/l Ammoniumnitratlösung (NH₄NO₃).

Extraktion von Spurenelementen mit dem Mikrowellenaufschluss US EPA Method 3051A

In Anlehnung an die Methode wurden 0,2 g der Bodenprobe mit 1 ml Salzsäure und 3 ml Salpetersäure aufgeschlossen. Die Methode ist anhand von Referenzmaterial (BAM, Boden) validiert.

Schritt	Zeit (Min.)	Leistung (W)
1	2	250
2	0,5	0
3	10	250
4	1	0
5	5	450
6	1	0
7	4	450
8	1	0
9	2	600
10	2	0
11	3	250
12	1	0
13	2	600
14	1	0
15	3	500

Tabelle 7: Methode Mikrowelle

Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (gelösten Anionen) mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie ISO 10304-1 (2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1 (2009)

Der Aufschluss erfolgte nach DIN 38414-4 (10/1984).

Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) ISO 11885 (2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885 (2009)

Die Bestimmung der Elemente (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, S, Zn, Mo, V, Co und Se) erfolgte mit einer induktiv gekoppeltem Plasma-Atom-Emissionspektroskopie (ICP-OES, Ultima 2, Horiba Jobin Yvon, Unterhaching, Deutschland). Alle Proben wurden anhand von drei Replikaten gemessen. Es wurde eine 4-Punkt-Kalibration mit Standardlösungen durchgeführt (CertiPur, Merck, Deutschland), welche in deionisiertem Wasser verdünnt wurden.

Bestimmung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe mit dem Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie-(HPLC-)-Verfahren DIN ISO 13877 (2000)

Aufschluss und Analytik erfolgten normenkonform.

Gaschromatographische Bestimmung des Gehalts an Kohlenwasserstoffen von C₁₀ bis C₄₀ DIN EN ISO 16703 (2011)

Aufschluss und Analytik erfolgten normenkonform.

Bestimmung des pH-Wertes DIN ISO 10390 (12/2005)

Der pH-Wert wurde nach einem Aufschluss mit 0,01-molarer CaCl₂-Lösung im Verhältnis von 1:2,5 Boden zur Lösung nach 1 h und mehrmaligem Schwenken gemessen.

Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit DIN ISO 11265 (1994/ Cor.1 1996)

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte an einer Suspension von 20 g Boden und 100 ml VE-Wasser, welche für 30 Min. per Hand geschwenkt wurde. Der verwendete Boden war getrocknet und auf 2 mm gesiebt.

Bestimmung von organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Gesamtkohlenstoff (C_{Ges}) nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) DIN ISO 10694 (1995)

Analytik erfolgte normenkonform.

Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren (Scheibler Apparatur) ISO 10693 (1995)

Die Bestimmung des Carbonatgehaltes erfolgte abweichend der Norm in Einfachbestimmung.

4.5 Probenahme

Ziel der Probenahme war es, mögliche chemische und physikalische Veränderungen während der Bauphase zu erfassen. Für einen Vorher-Nachher-Vergleich sollten daher vor Baubeginn und nach Abschluss der Bauphase Proben gewonnen werden (vgl. Abbildung 4). Es war geplant, diese in 3 Tiefenstufen bis maximal einem Meter Tiefe zu nehmen. Die Probenahmen 2 und 3 sollten an sechs „Hot Spots“ oberflächennah erfolgen, um so die Eintragspfade zu identifizieren. Zwei weitere Proben waren an Referenzpunkten ohne Einfluss durch den Bau geplant. Die vierte Probenahme sollte an den bereits zum Zeitpunkt 2 und 3 beprobten „Hot Spots“ in drei Tiefen erfolgen.

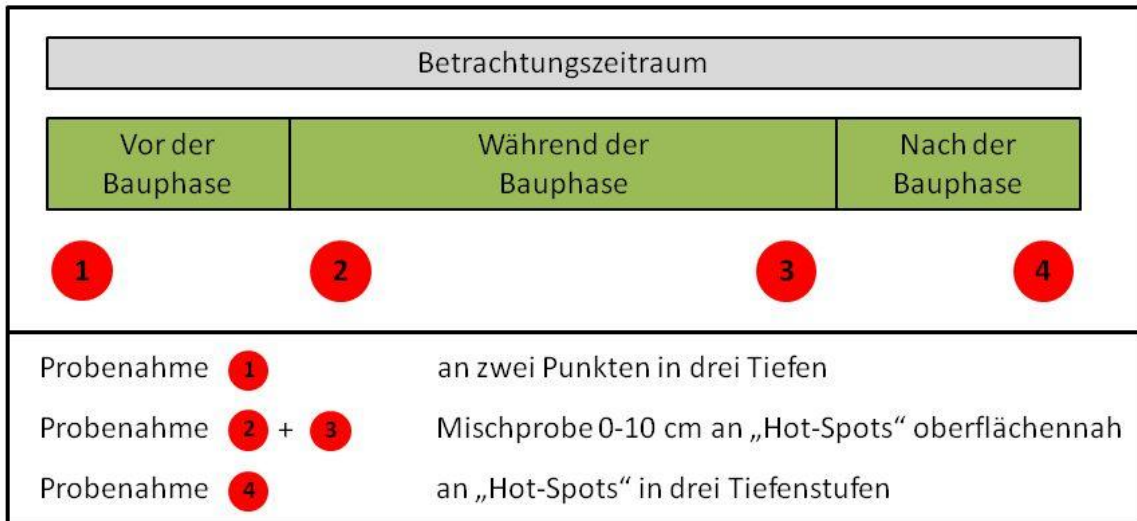


Abbildung 4: Probenahmeschema

Die Probenahme 4 konnte für die Baustellen G, E und L nicht durchgeführt werden. Da im Falle der Baustelle R alle Probenahmen nur oberflächennah erfolgen konnten (oberflächlich anstehendes Ausgangsgestein) wurde auch Probenahme 4 nur oberflächennah durchgeführt.

Im Fall der Baustelle R waren zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung bereits erste Bautätigkeiten erfolgt. Die Probenahme 1 war deshalb nur bedingt möglich. Zudem ist der Standort teilweise geringmächtig und durch diverse (unbelastete) Substrate überprägt. Daher erfolgte nur die Beprobung der Oberfläche (0-5 cm). Eine physikalische Untersuchung war wegen der Geringmächtigkeit des anstehenden Bodens technisch nicht möglich. Repräsentative Referenzflächen konnten nicht ausgewiesen werden.

	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4
Baustelle R	(✓)	✓	✓	✓
Baustelle G	✓		✓	
Baustelle E	✓	✓	✓	
Baustelle L	✓	✓	✓	

Tabelle 8: Übersicht Probenahmezeitpunkte

Für die Baumaßnahme G konnte ebenfalls kein Referenzstandort ausgewiesen werden, da diese räumlich stark begrenzt war. Die Erstbeprobung erfolgte mit Rücksicht auf die Vornutzung in zwei Tiefenstufen. Die abschließende Probenahme 4 war durch den Bauherrn nicht gewünscht. Eine Untersuchung der Einflüsse bezüglich bodenphysikalischer Veränderungen war wegen eines geplanten Bodenaustausches nicht sinnvoll.

Trotz homogener Bodeneigenschaften konnte auch bei der Baustelle E wegen den beengten Verhältnissen keine Referenzfläche angelegt werden.

Auf der Baustelle E wurden Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften untersucht. Die beprobte Fläche lag im Bereich der später errichteten Gebäude. Im Anschluss an die Bautätigkeiten sind hier keine Ansprüche an die natürlichen Bodenfunktionen zu stellen wie im Außenbereich. Die Erkenntnisse sind dennoch auch auf die gebäudenahen, zukünftigen Außenflächen übertragbar. Der Oberbodenabtrag erfolgt üblicherweise nicht grenzscharf für den Gebäudebereich. Häufig wird ein Übergangsbereich von 2 m oder der gesamte Oberboden flächig abgetragen.

Der Oberboden wurde im Rahmen des Versuchs unter definierten Feldbedingungen abgetragen. Hierfür wurde ein Kettenbagger (Caterpillar 322 C LN) eingesetzt. Die Fahrspuren hatten einen Abstand von 7,5 m. Die Fahrspuren wurden zweimalig überfahren. Das Gesamtgewicht des mittleren Hydraulikbaggers lag bei 25 t. Unter Berücksichtigung des verwendeten Laufwerks lag der Kontaktflächen- druck somit bei 0,5 kg/cm². Neben der Auflast kann auch das Abtragen selbst Einfluss auf bodenphysikalische Eigenschaften haben.

Die Beprobung erfolgte in zwei Tiefen vor und nach der Befahrung. Abbildung 5 zeigt das Probenahmedesign, Abbildung 6 zeigt die Befahrung durch den Bagger.

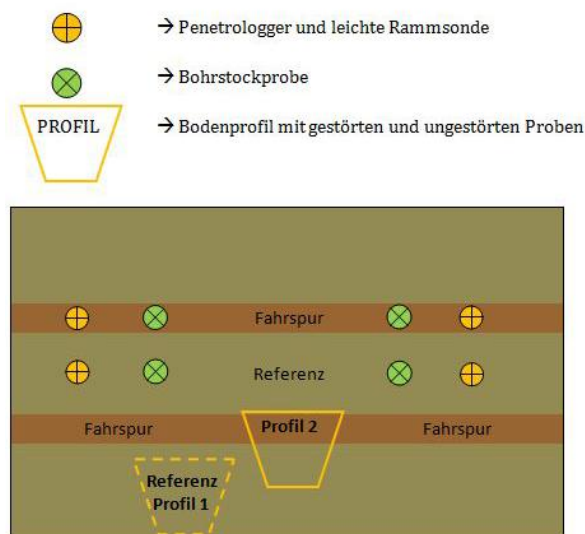


Abbildung 5: Probenahmedesign Bodenphysik Baustelle E [Dan14]



Abbildung 6: Oberbodenabtrag Baustelle E [Foto: B. Marx]

Die Baustelle L wurde mit Hinblick auf mögliche Veränderungen der chemischen Bodeneigenschaften in zwei Intersekten zu drei Zeitpunkten beprobt. Jedes Intersekt bestand aus 4 Feldern von 1 m² (Abbildung 7). Durch 10 Einstiche innerhalb eines Feldes war eine repräsentative Beprobung gewährleistet. Von Bauherrenseite war gestattet, für diese Baustelle zwei Beprobungstiefen (0-30 cm und 30-60 cm) chemisch zu untersuchen. Ziel der Rasterbeprobung war es, den Problemen bei der Probenahme als Folge der Informationsdefizite bezüglich der zeitlichen und räumlichen Ausdehnung von Prozessen entgegen zu wirken. Dabei musste das Raster im Verlauf der Bauphase den aktuellen Gegebenheiten auf der Baustelle angepasst werden. Es war erforderlich, die Proben 28 und 41 sowie 31, 32, 44, 45 versetzt zu nehmen, da am ursprünglichen Beprobungsort Material gelagert wurde. Aufgrund des verzögerten Baufortschritts konnten die weitergehende Probenahme 3 sowie die abschließende Probenahme 4 nicht realisiert werden.



Abbildung 7: Intersekt Baustelle L [Foto: B. Marx]

Das Entfernen der Krautschicht erfolgte im Bereich, wo der Garten angelegt werden sollte. Der Boden auf diesen Flächen soll im Anschluss an die Baumaßnahme natürliche Bodenfunktionen erfüllen. Die untersuchte Fläche befand sich innerhalb ausgewählter Intersekte für die bodenchemische Untersuchung. Die Krautschicht auf der untersuchten Fläche wurde mit einem Kettenbagger Takeuchi TB290

abgetragen (Abbildung 8). Der Abtrag erfolgte aufgrund der geringen Flächengröße nicht geordnet. Die Überfahungshäufigkeit liegt vermutlich bei 2-3. Der Oberbodenabtrag erfolgte mit einem vergleichsweise kleinen Hydraulikbagger. Dieser wies einen Bodendruck von $0,38 \text{ kg/cm}^2$ und ein Gewicht von 8,5 t auf. Neben der Befahrung ist auch eine Beeinflussung des Untergrunds durch das Abtragen des Bodens selbst möglich.



Abbildung 8: Entfernung der Krautschicht Baustelle L [Foto: A. Randel]

5 Untersuchte Modellbaustellen

Bearbeitet von B. Marx, A. Randel und J. Rinklebe

Im Rahmen des Projekts wurden mögliche chemische und physikalische Einflüsse auf den Boden während verschiedener Bauphasen untersucht. Um die theoretischen Ansätze in der Praxis zu verifizieren, wurden insgesamt vier Baustellen analysiert. Es handelte sich dabei um folgende Baumaßnahmen:

- Baustelle R: Unterkunfts- und Seminargebäude
- Baustelle G: Mehrfamilienhaus
- Baustelle E: Fachmarktzentrum
- Baustelle L: Einfamilienhaus

Die Baustellen R und E gehörten zur Kategorie Großbaustellen, während es sich bei den Baustellen G und L um kleinere Baumaßnahmen handelte.

Die Baumaßnahmen wurden, sofern vorhanden, mit Hilfe der zur Verfügung gestellten Lagepläne und Blockzeitpläne detailliert hinsichtlich der verwendeten Materialien und Maschinen analysiert, um eine mögliche Beeinflussung des Bodens durch den Baubetrieb im Vorhinein erfassen zu können. Im Folgenden erfolgen jeweils kurze Beschreibungen der Baustellen, des Bauablaufs und relevanter Besonderheiten. Anschließend werden die baustellenspezifischen Prozesse, bei denen eine Beeinflussung des Bodens durch den Baubetrieb zu erwarten war, festgelegt und so genannte Hot Spots, also Bereiche mit starker Beeinflussung, herausgearbeitet und für die Probenahme ausgewählt.

5.1 Baustelle R

5.1.1 Baustellenbeschreibung

Gebaut wurde eine Gebäudegruppe bestehend aus sechs Unterkunfts- und Seminargebäuden, konzipiert für insgesamt 540 Schüler und Auszubildende. Die Bauzeit betrug knapp zwei Jahre. Die bis zu fünfeinhalb geschossigen Gebäude sind durch ein- bis zweigeschossige Querriegel miteinander verbunden. Es wurde jeweils ein Verwaltungs- und Mensengebäude sowie eine Sporthalle gebaut. In den Bereichen zwischen den Gebäuden wurden Grünflächen angelegt. Die Bruttogeschossfläche beträgt 27.500 m².

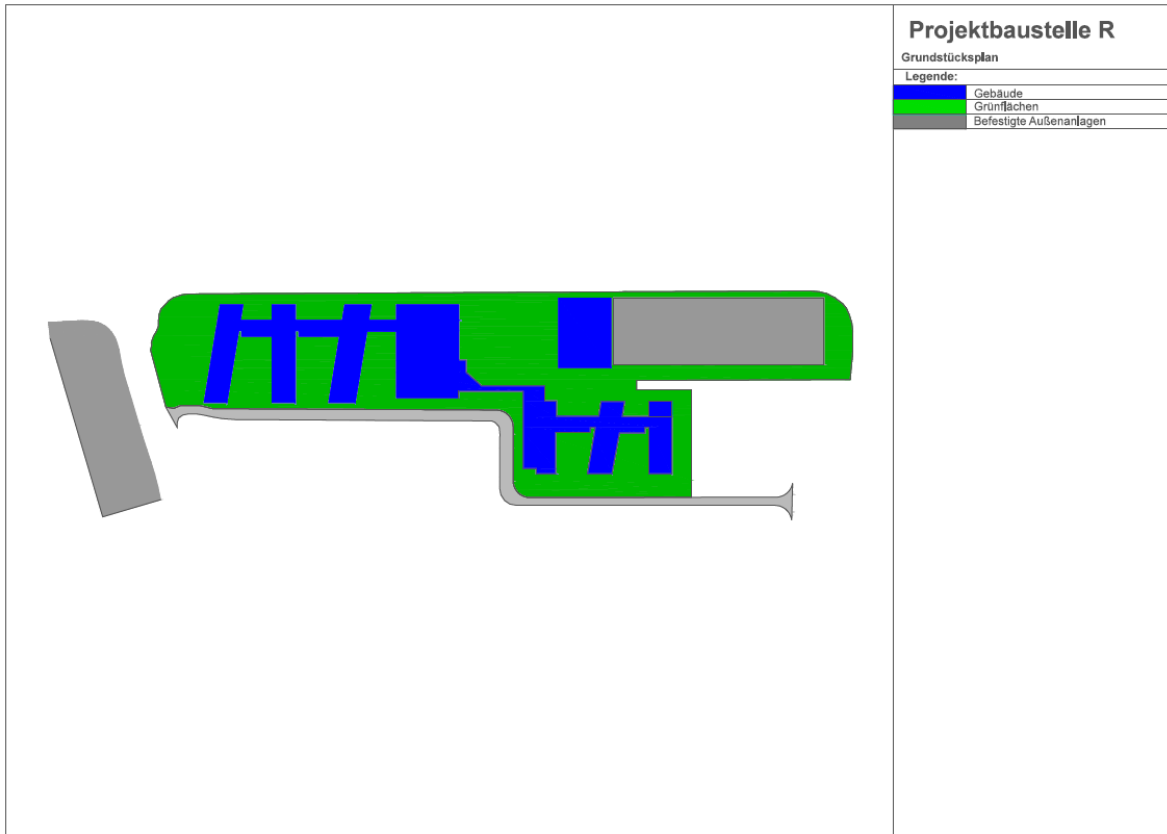


Abbildung 9: Grundstücksplan Baustelle R

Das Gelände wurde vor Baubeginn bereits teilweise genutzt, vorwiegend als Verkehrsfläche. Es waren anthropogen wenig beeinflusste Bereiche vorhanden, welche für Referenzprobenahmen genutzt wurden. Das Gelände wurde vor Baubeginn gerodet, die Flächen entsprechend modelliert und die erforderlichen Bodenbewegungen durchgeführt. Des Weiteren fand eine Kampfmittelräumung statt. Nachdem das Baufeld hergerichtet war, wurden die Grund- und Versorgungsleitungen verlegt. Bei den Leitungen handelte es sich um Frischwasser-, Abwasser-, Gas-, Strom- und Telekommunikationsleitungen. Anschließend folgten die Erdbauarbeiten. Die Baugruben für die Fundamente und für die Bodenplatten wurden mittels schwerer Bagger, Radlader, Raupen und Erdbauwalzen ausgehoben. Die Fundamente wurden sowohl gegen anstehenden Boden, als auch in Schalungen betoniert. Der Beton wurde mit Fahrmischern auf die Baustelle geliefert und dann mit Autobetonpumpen in die Schalung bzw. in die Baugruben gepumpt. Nach Erreichen der gewünschten Festigkeit wurde begonnen, die Wände und Stützen einzuschalen und die nötige Bewehrung einzubauen. Daraufhin begannen die Innenausbauarbeiten und die Fassadenarbeiten. Die Gas-, Wasser-, Abwasser-, Elektro-, Wärmeversorgungs- und Feuerlöschtechnik wurde installiert. Die Dämmung wurde angebracht und die Klinkerfassade erstellt. Nach Fertigstellung der Rohbauarbeiten und nach dem Einbau der TGA wurden die Außenanlagen gestaltet. Mutterboden wurde aufgetragen, Gehwege gepflastert, Grün- und Wasserflächen angelegt.

5.1.2 Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse

Für die Prozessanalyse standen ein Termin- und ein Baustelleneinrichtungsplan zur Verfügung. Die gesamte Bauzeit betrug zwei Jahre, die Baustellenarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes bis zum Beginn der Erstellung der Außenanlagen untersucht (vgl. Abbildung 10).

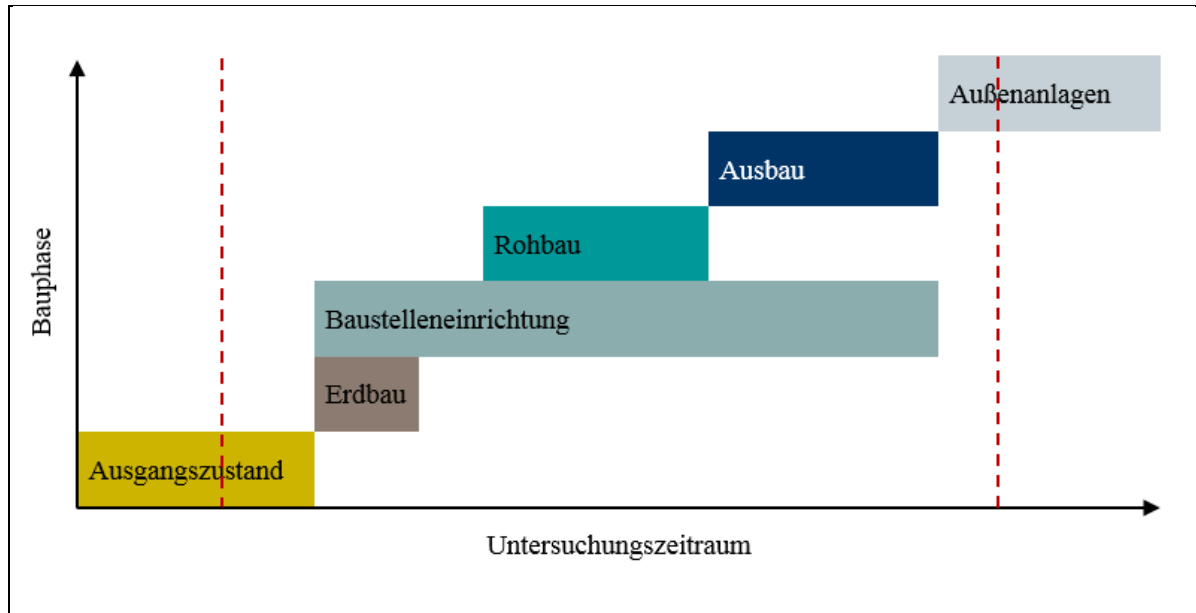


Abbildung 10: Untersuchte Prozesse auf Baustelle R

Mit Ausführungsbeginn der Baumaßnahme wurde die Baustelleneinrichtung erstellt, diese bestand zunächst aus Sozial- und Bürocontainern, Materiallagern und der Medienversorgung. Ebenso wurden geschotterte und verdichtete Baustraßen rund um das gesamte Baugelände hergerichtet.

Die Erdarbeiten waren durch einen hohen Maschineneinsatz und große Erdbewegungen gekennzeichnet. Hierbei kamen vor allem große Raupen- und Mobilbagger sowie schwere LKW zum Einsatz. Der abgetragene Boden wurde auf mehrere große Bodenmieten abseits der Baustelle verfrachtet und dort bis zur Erstellung der Außenanlagen gelagert. Die Bodenmieten waren ca. 4 m hoch und wiesen einen Krautbewuchs auf. Da sich das bebaute Gelände am Hang befindet, wurde der gesamte Oberboden abgetragen und abschließend wieder aufgetragen, so dass keine vollständige Vorher-Nachher-Betrachtung möglich war.



Abbildung 11: Erdarbeiten und Bodenmiete Baustelle R [Fotos: B. Marx]

Nach Herrichtung des Geländes und den notwendigen Ausschachtungsarbeiten wurde mit den Rohbauarbeiten begonnen. Der Rohbau wurde aus gemauertem Kalksandstein und mittels Ortbeton erstellt. Für die Rohbauphase charakteristisch waren u. a. folgende Baustoffe, Hilfsmittel und Baugeräte:

- Schalbretter und Schalöl
- Frischbeton-Schutzmittel
- Bewehrungsstahl
- Bitumendickbeschichtung
- Kalksandstein und Dünnbettmörtel
- Kreissägen
- Dämmplatten und Mineralwolle



Abbildung 12: Rohbauarbeiten Baustelle R [Fotos: B. Marx]

Nach Fertigstellung der Klinkerfassade wurde mit der technischen Gebäudeausrüstung und den Ausbauarbeiten begonnen. Diese sind i. d. R. durch mehrere parallel arbeitende Ausbaugewerke gekennzeichnet. Die Außenflächen wurden im Bereich der Gebäudeeingänge vielfach als Materiallager, für die Abfallentsorgung und als Arbeits- und Werkfläche genutzt.



Abbildung 13: Ausbauarbeiten Baustelle R [Fotos: B. Marx]

Kurz vor Fertigstellung der Baumaßnahme wurden die Außenanlagen gestaltet. Der Oberboden wurde wieder aufgetragen, Gehwege gepflastert, Grün- und Wasserflächen angelegt. Mit Hilfe einer Steinsammelschaufel als Anbaugerät wurden Steine und Schutt eingesammelt und der Boden geglättet.



Abbildung 14: Außenanlagen Baustelle R [Fotos: B. Marx]

Zu den untersuchten Bauprozessen gehörten

- Oberboden- und Felsabtrag sowie Befahrung
- Errichtung des Rohbaus
- Elemente der Baustelleinrichtung
- Fassadenarbeiten
- Erstellung der Außenanlagen.

Zu beachten ist, dass es zu zeitlichen und räumlichen Überschneidungen der Bauprozesse gekommen ist. Dies war besonders in der Rohbau- und Ausbauphase der Fall.

Bauprozess	Mögliche Beeinflussung des Bodens
Oberboden- und Felsabtrag	Verdichtung
Schalung der Stützen und Decken	Verunreinigung mit Schalöl
Betonierung	Verunreinigung mit Beton
Baustelleneinrichtung	Verunreinigung durch Sägestaub, Bauchemikalien, Mörtel, Abfälle, Kraftstoffe und Baustoffe
Fassadenarbeiten	Verunreinigung mit geschäumten Kunststoffen oder Mineralfasern, Fugenmörtel, Abfälle im Gerüstbereich, Bitumendickbeschichtung

Tabelle 9: Prozessanalyse Baustelle R

5.1.3 Messnetz

Abbildung 15 zeigt das Messnetz der Baustelle R. Die Beprobung erfolgte zu acht Zeitpunkten. Es konnten innerhalb des Baugrundstücks keine geeigneten Referenzflächen ausgewiesen werden. Die links angrenzende Fläche gehört nicht zum eigentlichen Baugrundstück, wurde jedoch als Parkplatz während der Baumaßnahme genutzt.

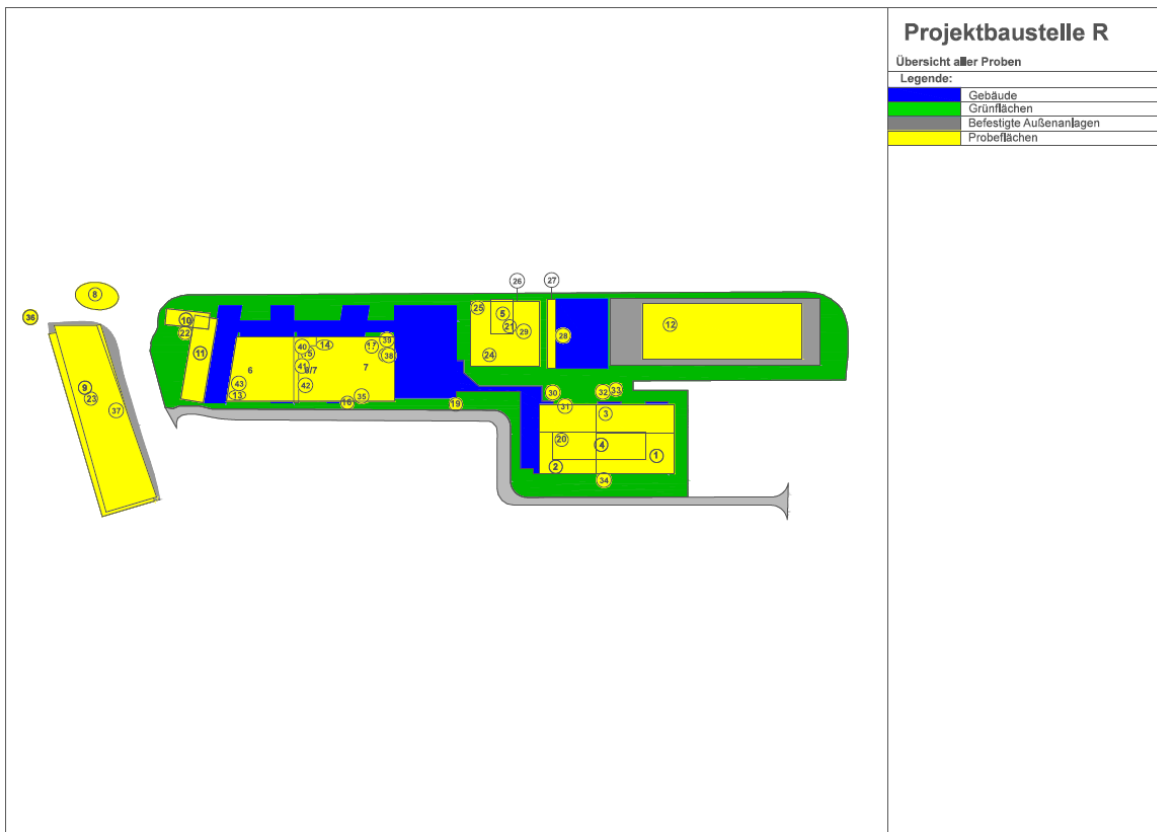


Abbildung 15: Messnetz Baustelle R

5.1.4 Ergebnisse der Bodenanalyse

Die Bodenverhältnisse auf der Baustelle R sind sehr heterogen. Das anstehende Gestein ist überlagert von verschiedenen anthropogen geprägten Substraten. Eine Teilfläche hatte zum Zeitpunkt der Erstbe-
 probung noch Reste des ursprünglich anstehenden naturnahen Oberbodens (vgl. Tabelle 10). Das Aus-
 gangsgestein zeigt deutliche Verwitterungsmerkmale.

Der Oberboden ist Schluff dominiert, dieser findet sich auch im grusigen verwitterten Ausgangsgestein wieder. Laut BK50 sind Braunerden aus Sand-, Ton, und Schluffsteinen verbreitet. Gemäß GK100 handelt es sich dabei um Gesteine der Brandenburg-Schichten.


0-5 cm Reste des abgetragenen Oberbodens	
6-20 cm anstehendes teilweise verwittertes Ausgangsgestein	

Tabelle 10: Bodenprofil Baustelle R [Foto: B. Marx]

Auf der Baustelle R wurden folgende Prozesse untersucht (hier: in fett gedruckt mit Ergebnisdarstellung)

- Sonderprobe Spülwagenschlamm
- **Betonfundamente, Wände und Stützen aus Kalksandstein, Dünnbettmörtel**
- Container, Abfall, Baustellenabfälle
- **Baustraße (mittig)**
- **Baustraße (seitlich)**
- Trenn- und Sägearbeiten
- **Trennarbeiten Metall**
- **Sozial- und Materialcontainer**
- Tropfbereich Fass
- Mitarbeiterparkplatz
- **Mobile Betankung (Fahrzeuge oder Kleingeräte)**
- Sedimente nahe eines Imbisswagens
- Pausenbereich, Lagerfläche
- Verunreinigung durch Putzabfüllung
- Putzsilo
- **Baustellenabfälle/Bauschutt**
- **Mitarbeiterparkplatz**
- Lagerfläche
- **Lagerfläche Material (mineralische Dämmung) nach Fertigstellung Fassade**

- Fugenmörtel
- Kanalbau (Schachtring)
- Baustellenabfälle (Gerüstbereich)
- Bitumenanstrich und Baustellenabfälle
- Oberbodenauftrag zur Bepflanzung
- Installation Beleuchtung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Laboranalyse für die Elementgehalte dargestellt. Da die Schwefelkonzentrationen meist wesentlich größer sind, wurden diese grundsätzlich um den Faktor 10 reduziert dargestellt. Im Fall des Prozesses Baustellenabfälle/Bauschutt (Abbildung 20) wurden die Schwefelkonzentrationen nur für den Messwert „Nachher“ mit einem Faktor 100 kleiner dargestellt.

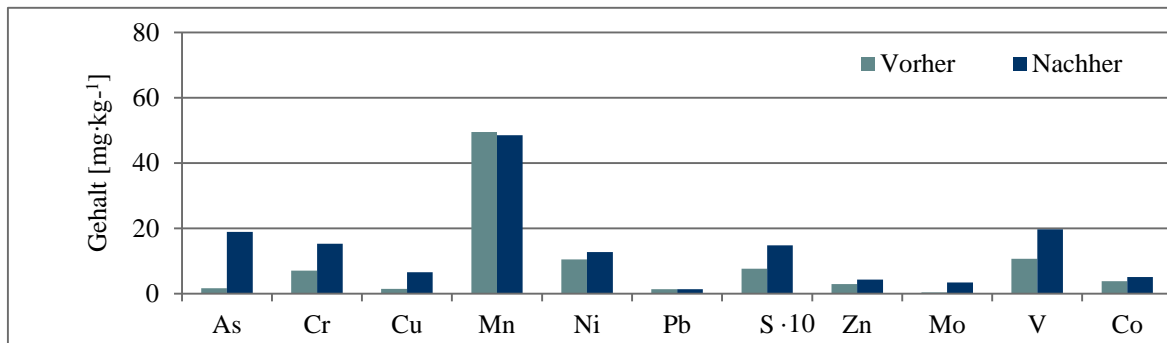


Abbildung 16: Baustraße (mittig) Baustelle R

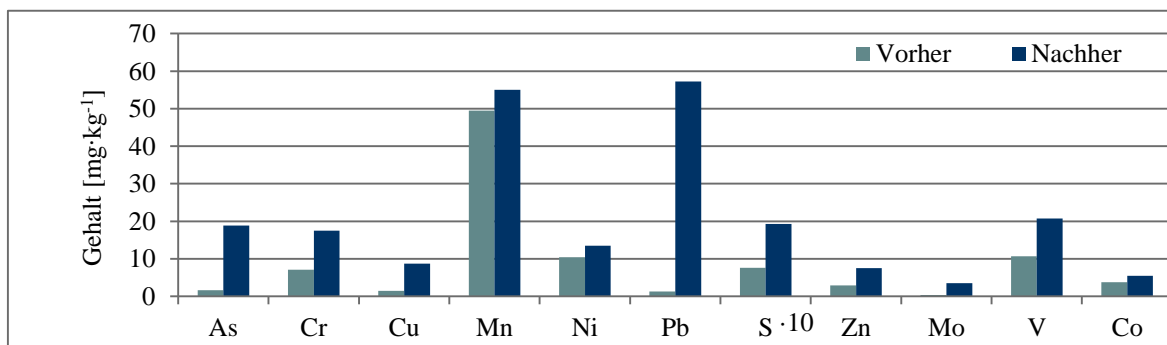


Abbildung 17: Baustraße (seitlich) Baustelle R

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Elementgehalte im Vorher-Nachher-Vergleich auf und neben einer Baustraße. Während die meisten Parameter eine annähernd gleiche Zunahme zeigen, unterscheiden sich die Prozesse bei Mangan und Blei. Neben der Baustraße steigt der Mangangehalt geringfügig. Auf der Baustraße nimmt der Mangangehalt minimal ab. Der Bleigehalt neben der Baustraße steigt enorm an (von 1,3 auf 57,3 mg·kg⁻¹) während er auf der Baustraße unverändert ist.

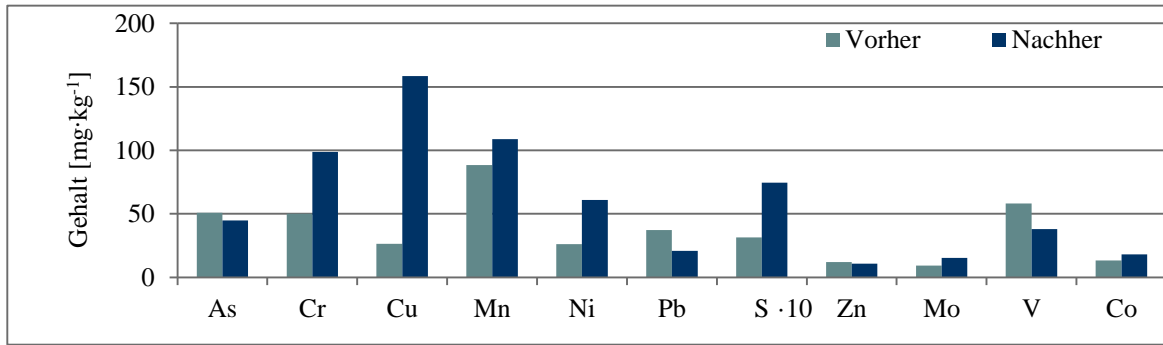


Abbildung 18: Trennarbeiten Metall Baustelle R

Abbildung 18 zeigt Veränderungen der Elementgehalte durch den Prozess „Trennarbeiten Metall“. Die Ergebnisse für Schwefel sind um den Faktor 10 kleiner dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 16 und Abbildung 17 ist die Y-Achse bis 200 mg·kg⁻¹ skaliert. Für diesen Prozess wurden die größten Elementgehalte bei der Baustelle R gemessen. Der Chromgehalt verdoppelt sich annähernd von 50 auf 99 mg·kg⁻¹. Mit einer Zunahme von 26 auf 62 mg·kg⁻¹ verändert sich der Nickelgehalt auch deutlich. Die stärkste Zunahme zeigt sich für Kupfer (von 26 auf 158 mg·kg⁻¹).

Die Ergebnisse des Prozesses „mobile Betankung“ sind in Abbildung 19 dargestellt. Auffällig sind die starken Zunahmen im Bereich von 50 mg·kg⁻¹ bei Arsen, Chrom und Vanadium. Der Vanadiumgehalt steigt von 11 auf 57 mg·kg⁻¹. Bei den Parametern Arsen und Chrom sind die gemessenen Elementgehalte geringer als für den Prozess „Trennarbeiten Metall“.

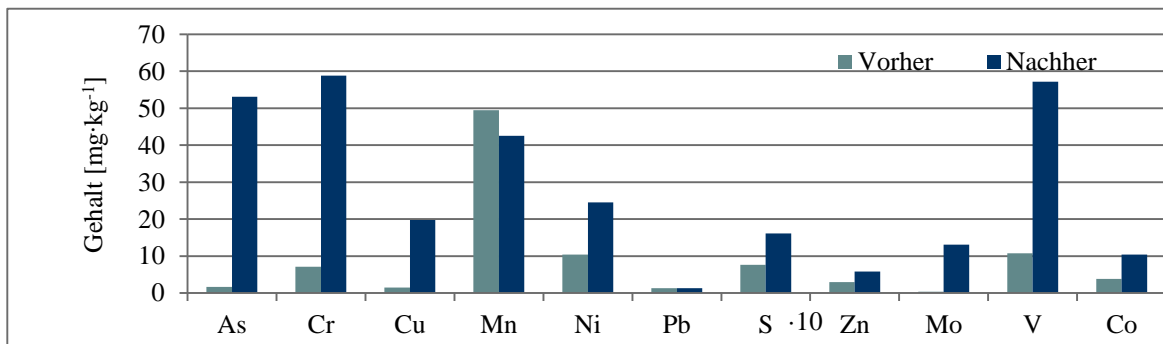


Abbildung 19: Mobile Betankung (Fahrzeuge, Kleingeräte) Baustelle R

Die Ergebnisse des Prozesses „Baustellenabfälle/Bauschutt“ zeigen einen starken Anstieg der Schwefelgehalte von 44 mg·kg⁻¹ auf 22,7 g·kg⁻¹ (Abbildung 20). Parallel hierzu ist ein Anstieg des Zinkgehalts zu erkennen (3,9 auf 47,5 mg·kg⁻¹).

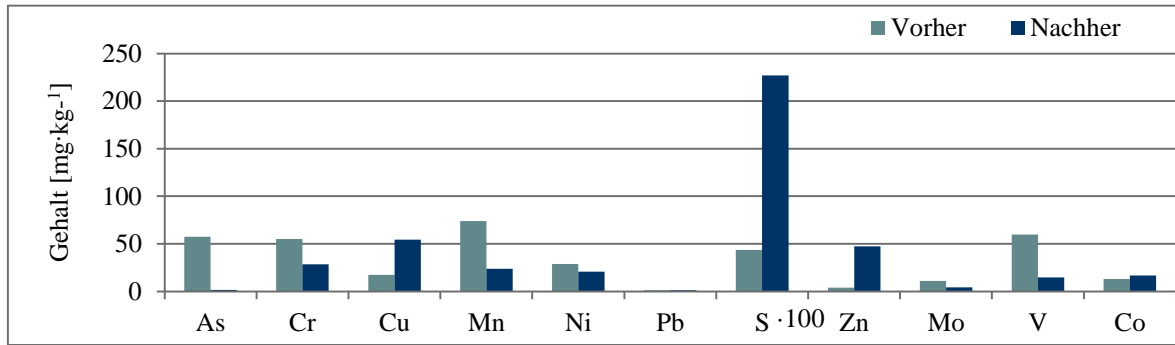


Abbildung 20: Baustellenabfälle/Bauschutt Baustelle R

Der Prozess „Lagerfläche Material“ bezieht sich auf die Lagerung von mineralischem Dämmmaterial nach Fertigstellung der Fassade und ist von den Elementgehalten und den Veränderungen vergleichbar mit einigen der hier nicht dargestellten Prozesse. Die meisten Elementgehalte sinken oder sind annähernd konstant. Die Abnahme bei Arsen, Chrom und Vanadium beträgt dabei 30-40 mg·kg⁻¹.

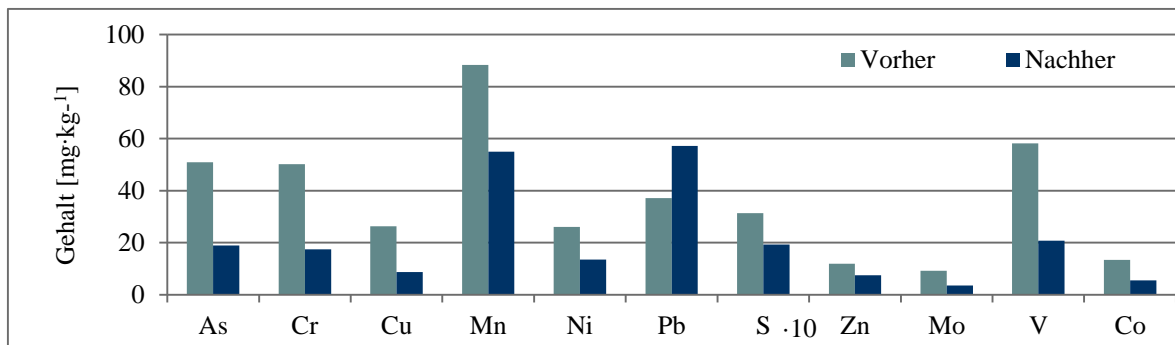


Abbildung 21: Lagerfläche Material Baustelle R

Die Veränderungen sind dabei meist geringer, als die Heterogenität der Fläche vor Beginn der Bautätigkeit (Abbildung 22). Dargestellt ist in der Grafik der Mittelwert aller zu Beginn der Baumaßnahme genommenen Proben inklusive der Standardabweichung ausgehend von einer Stichprobe.

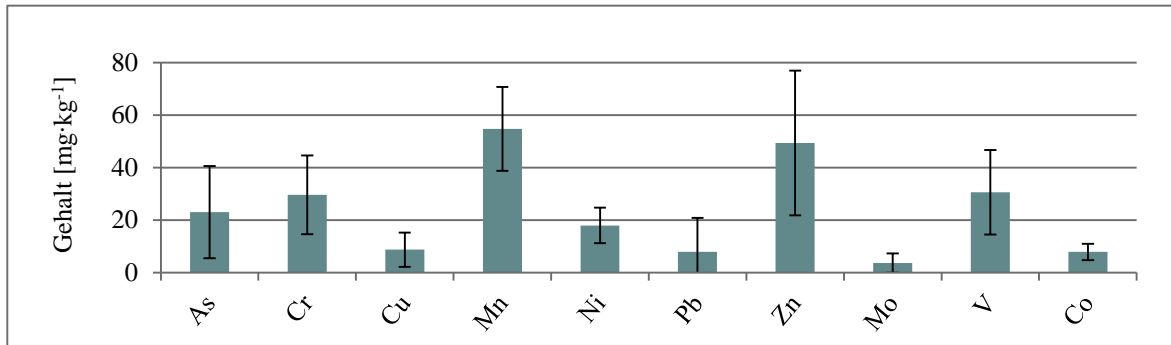


Abbildung 22: Heterogenität vor Beginn der Bautätigkeit Baustelle R

Der Schwefelgehalt in den untersuchten Proben der Baustelle R zeigt deutliche Unterschiede. Die grüne Linie markiert den Maximalgehalt der vor Beginn der Bautätigkeit gemessen wurde (490 mg·kg⁻¹). Im Vergleich dazu sinkt der Gehalt in diversen Proben (z. B. R-15 bis R-19, R-36 bis R-43). In den Proben R-28 (1,5g·kg⁻¹), R-29, R-31 und R-32 (5g·kg⁻¹) sind starke Zunahmen der Schwefelgehalte zu erkennen. Die Proben R-33 (65,14g·kg⁻¹) und R-35 (22,7g·kg⁻¹) zeigen einen extrem starken Anstieg.

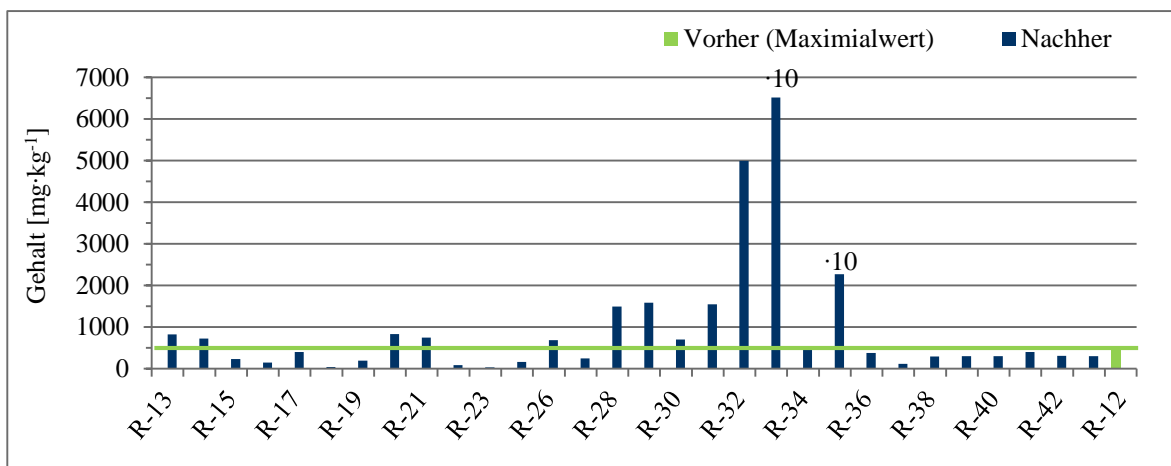


Abbildung 23: Übersicht Schwefelgehalte Baustelle R

Prozess	Zeitpunkt	PAK Σ [mg·kg ⁻¹]	MKW c10-c40 [mg·kg ⁻¹]
Betonfundamente, Wände und Stützen aus Kalksandstein, Dünnbettmörtel (A)	1	2,08	n.d.
	2	0,12	352,3
Container, Abfall, Baustellenabfälle (A)	1	2,08	n.d.
	2	n.d.	480
Baustraße mittig	1	0,26	n.d.
	2	0,14	57
Baustraße seitlich	1	0,26	n.d.
	2	0,50	89,8
Sozial- und Materialcontainer	1	0,26	n.d.
	2	0,56	4274,8
Mitarbeiterparkplatz (A)	1	0,26	n.d.
	2	n.d.	18
Mobile Betankung (Fahrzeuge, Kleingeräte)	1	0,26	n.d.
	2	0,08	3800
Lagerfläche Material (Mineralische Dämmung) nach Fertigstellung Fassade	1	n.d.	360
	2	0,50	89,8

Tabelle 11: Ergebnisse der PAK- und MKW-Analyse Baustelle R

Die Ergebnisse der Analyse auf PAK und MKW sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Veränderungen der Ergebnisse bezüglich PAK sind generell gering. Die MKW-Gehalte zeigen einen starken Anstieg bei den Prozessen „Sozial- und Materialcontainer“ sowie „Mobile Betankung (Fahrzeuge, Kleingeräte)“. Beide Proben waren visuell und olfaktorisch stark auffällig. Für andere Prozesse wie „Container, Abfall, Baustellenabfälle (A)“, konnten auch deutliche Anstiege der MKW-Gehalte nachgewiesen werden, wenngleich diese nicht olfaktorisch auffällig im Gelände waren.

5.2 Baustelle G

5.2.1 Baustellenbeschreibung

Das Projekt umfasst den Neubau eines Mehrfamilienhauses für vier Parteien auf einer Grundstücksfläche von ca. 635 m². Die Flächeninanspruchnahme für den Baukörper beträgt ca. 160 m². Zusätzlich zum Wohnhaus wurden vier Abstellräume von jeweils ca. 3,5 m², drei PKW-Stellplätze sowie eine Fertiggarage errichtet. Die Zugänge zum Haus sowie die Terrassen wurden mit Verbundsteinpflaster belegt, die übrigbleibenden freien Gartenflächen wurden grob planiert. Eine mögliche Nutzung als Grünfläche obliegt den späteren Eigentümern. Bei dem Grundstück handelte es sich um eine ungenutzte Baulücke in einem Wohngebiet.

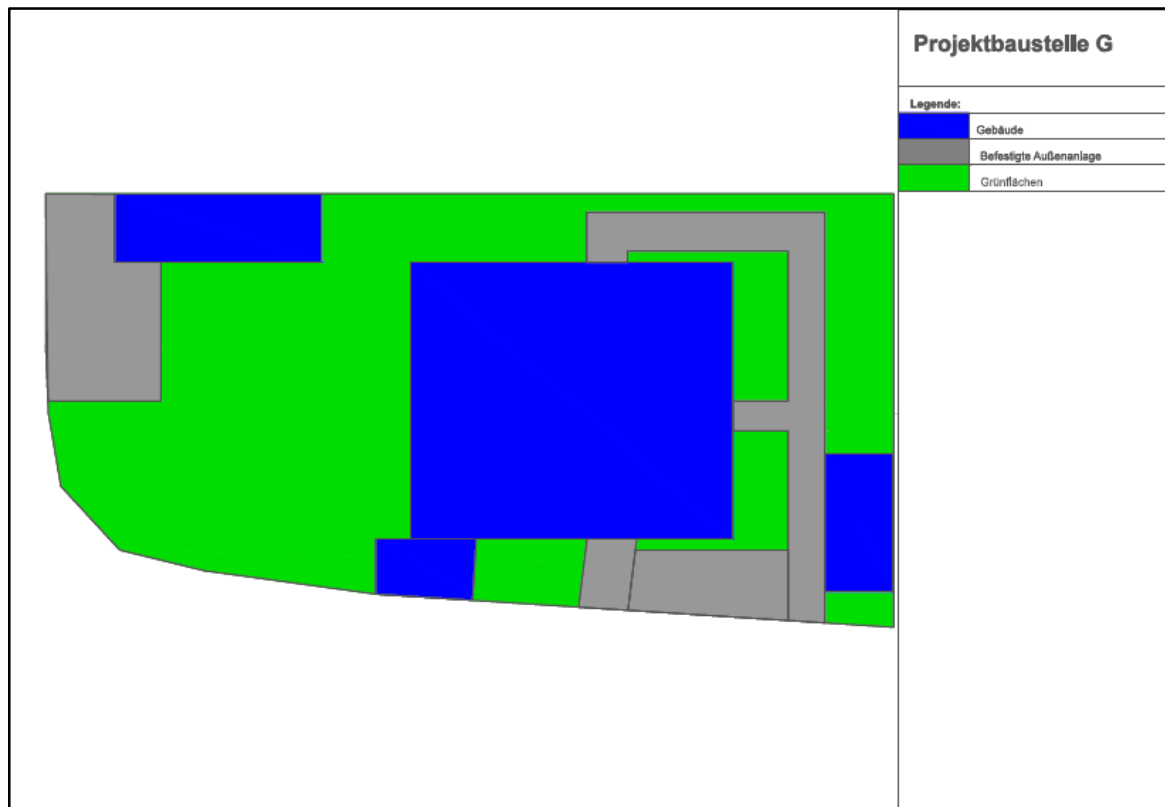


Abbildung 24: Grundstücksplan Baustelle G

Vor Beginn der Baumaßnahme wurde der Oberboden im Bereich des Baukörpers abgetragen und auf dem Grundstück gelagert. Das Fundament wurde aus Beton erstellt. Das Außenmauerwerk besteht aus 15 cm starkem Kalksandsteinmauerwerk, die Wärmedämmung wurde im Bereich verblendeter Fassadenflächen als Kerndämmung ausgeführt, verputzte Fassadenflächen erhielten ein Wärmedämmverbundsystem.

5.2.2 Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse

Aufgrund der vergleichsweise kleinen Baumaßnahme wurden weder ein Termin-, noch ein Baustelleneinrichtungsplan erstellt. Die gesamte Bauzeit betrug 7 Monate. Die Baustelle wurde einschließlich der Rohbauphase untersucht, die Erdarbeiten wurden dabei jedoch nicht gesondert miterfasst (vgl. Abbildung 25). Eine abschließende Untersuchung nach Beendigung der Baumaßnahme war seitens der Bauherren nicht erwünscht.

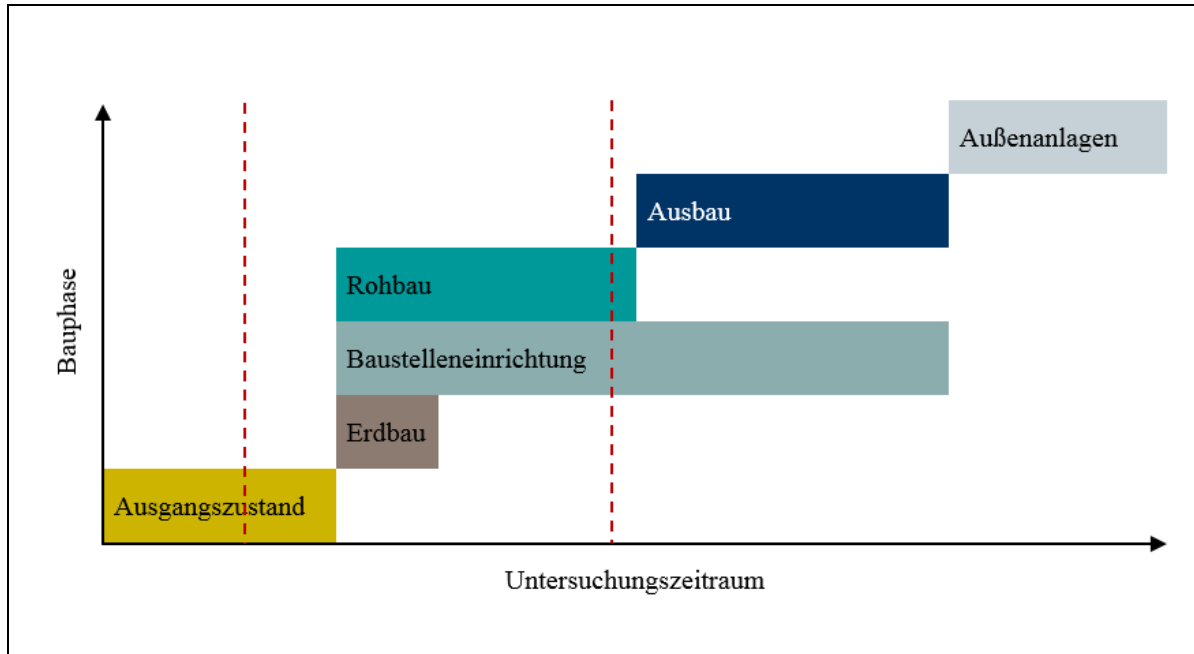


Abbildung 25: Untersuchte Prozesse auf Baustelle G

Im Rahmen der Baufeldfreimachung wurde der abgeschobene Oberboden im Bereich der späteren Grünfläche auf einer Miete gelagert, um nach Beendigung der Baumaßnahme wieder eingebaut werden zu können. Die restliche freie Fläche auf dem Grundstück wurde als Baustelleneinrichtungsfläche genutzt. Hierzu gehörten

- Trommelmischer
- Frischwassertank
- Mobile Toilette
- Turmdrehkran
- Materiallager (Sand, Gerüstelemente, Schalbretter, Klinkersteine auf Paletten)
- Abfälle
- Kreis- und Steinsäge
- Bauchemikalien (Frostschutzmittel für Mörtel)



Abbildung 26: Baustelleneinrichtung Baustelle G [Fotos: B. Marx]

Zu den untersuchten Bauprozessen gehörten Elemente der Baustelleneinrichtung und die Fassadenarbeiten.



Abbildung 27: Fassadenarbeiten Baustelle G [Fotos: B. Marx]

Im Folgenden werden die möglichen Beeinflussungen des Bodens dargestellt.

Bauprozess	Mögliche Beeinflussung des Bodens
Fassadenarbeiten	Verunreinigung durch Bitumenabdichtung, Mörtel und Mineralwolle
Baustelleneinrichtung	Verunreinigung mit Sägestaub (Holz und Stein), Bauehemikalien, Mörtel (im Bereich des Trommelmischers und des Krans)

Tabelle 12: Prozessanalyse Baustelle G

5.2.3 Messnetz

Das Messnetz der Baustelle G ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Beprobung erfolgte zu zwei Zeitpunkten. Im Bereich einer potenziellen Referenzfläche wurde der anstehende Oberboden zwischengelagert.

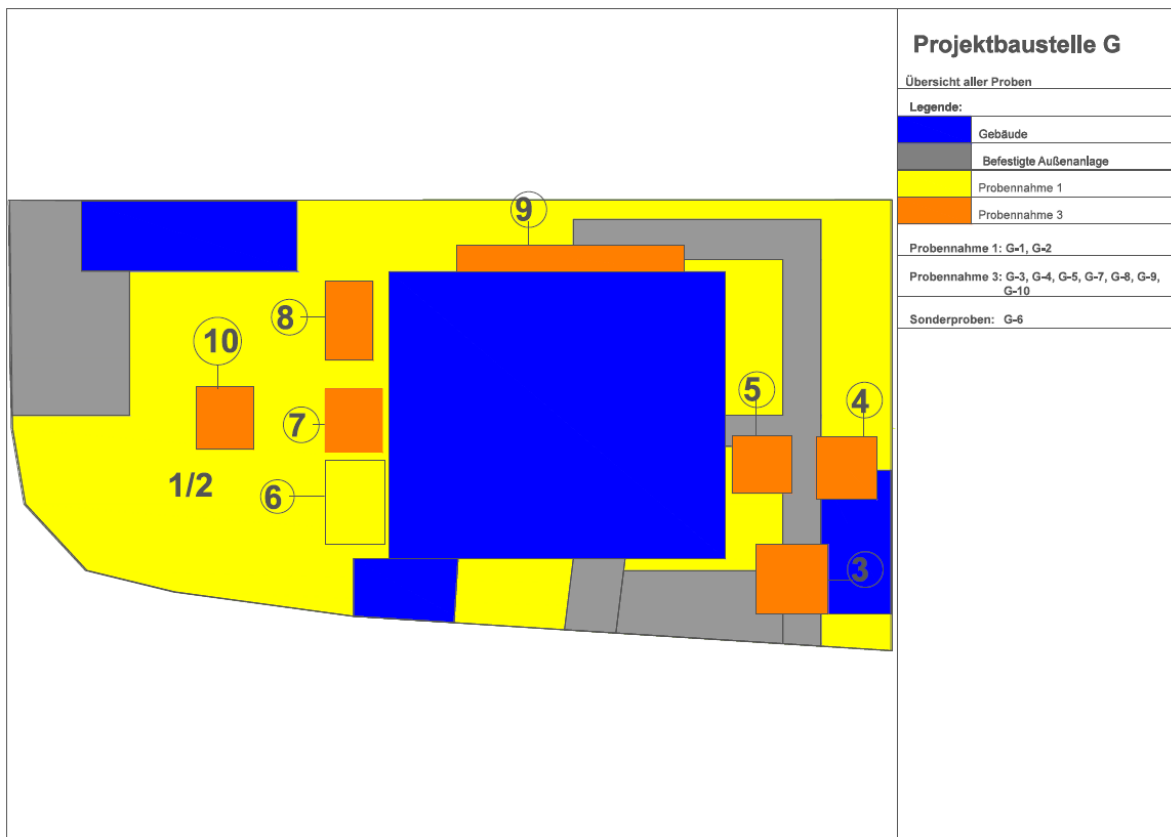


Abbildung 28: Messnetz Baustelle G

5.2.4 Ergebnisse der Bodenanalyse

Die Bodenverhältnisse der Baustelle G waren bei Beginn der Bautätigkeit homogen. In den Randbereichen sind geringe Anteile von Schotter aus dem Wegebau zu erkennen gewesen. Der humose

Oberboden wies eine Mächtigkeit von 25 cm auf. In Tabelle 13 ist eine Aufnahme der Bodenverhältnisse während der Bauphase dargestellt. Der Oberboden war überdeckt von einer Mischung aus Bodenmaterial von der Baufläche sowie Abfällen der Baustelle. Das Profil ist außerhalb der Gebäudegrundfläche (blaue Schraffur Abbildung 28) dort, wo im Nachgang der Garten entstand (gelbe Schraffur Abbildung 28), angelegt worden. Im Bereich des Gebäudes und der Zuwegung war der Oberboden abgeschoben und teilweise durch Sand ersetzt worden (rechte Seite Abbildung 28).

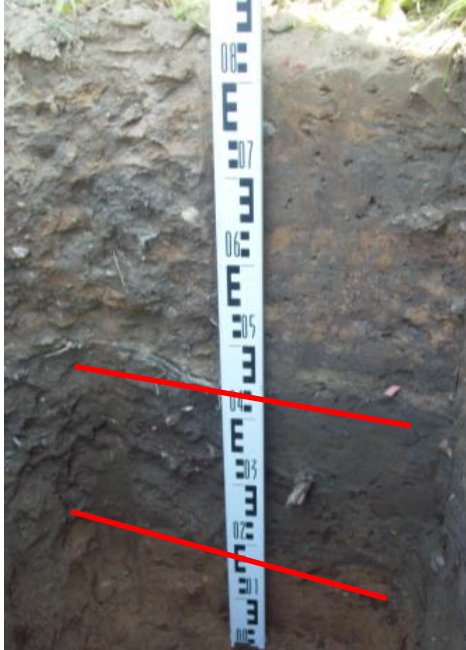
0-45 cm Aufschüttung aus anstehendem Ober- und Unterboden sowie Abfällen der Baustelle	
46-65 cm begrabener ehemaliger Oberboden	
66-85+ cm begrabener ehemaliger Unterboden	

Tabelle 13: Bodenprofil Baustelle G [Foto: B. Marx]

Laut BK 50 treten in der Region der Baustelle G häufig Parabraunerden bzw. Braunerden auf. Teilweise zeigen diese Merkmale der Pseudovergleyung. Dominierend sind die anstehenden Lössanwehungen aus der Saale-Kaltzeit (Pleistozän). Oberflächennah sind diese bereits häufig entkalkt. Typische Merkmale der Parabraunerden (Tonverlagerung) konnten nicht angesprochen werden. Niedrige pH-Werte von 6,1-6,5 weisen darauf hin, dass die Entkalkung fortgeschritten ist.

Auf der Baustelle G wurden folgende Prozesse untersucht:

- Zementrückstände unter Kran
- Übergangsbereich BE zur Bodenmiete
- Sägearbeiten Steine
- Bitumenabdichtung, Mörtel und Dämmung

Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

Die Mangangehalte der verschiedenen Probenahmepunkte der Baustelle G sind in Abbildung 29 dargestellt. Auffällig ist hier zunächst einmal das relativ hohe Niveau von knapp $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mangan vor

Beginn der Bautätigkeiten. Die meisten Werte sinken in Bezug auf diesen Wert ab. Die Probe G-7 hingegen enthält 2222,1 mg·kg⁻¹ Mangan. Die Proben G-4 und G-10 zeigen eine weitaus geringere Zunahme.

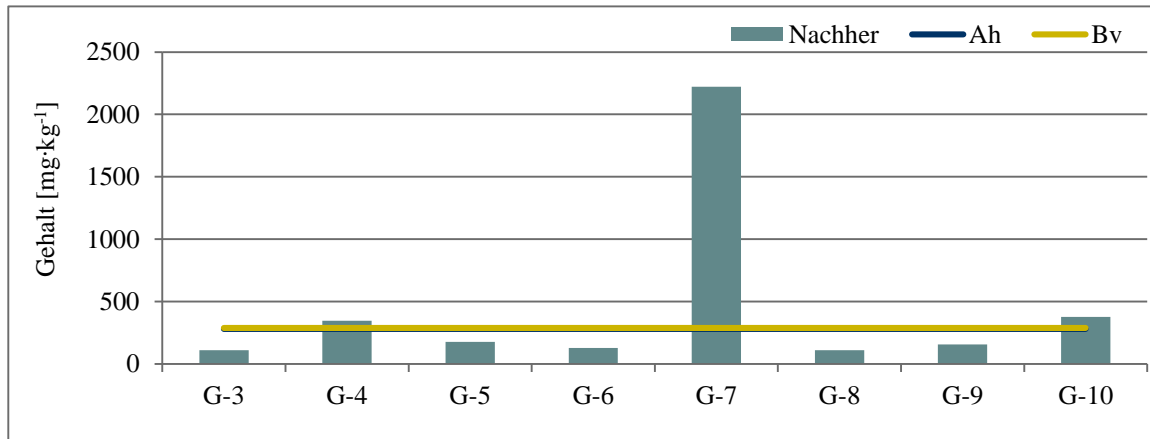


Abbildung 29: Übersicht der Mangangehalte Baustelle G

Die Analyseergebnisse für den Prozess „Zement unter Betonmischer“ zeigen Abnahmen der Gehalte mit Ausnahme von Schwefel. Hier steigt der Wert von 36,6 bzw. 111,5 auf 380,9 mg·kg⁻¹ an.

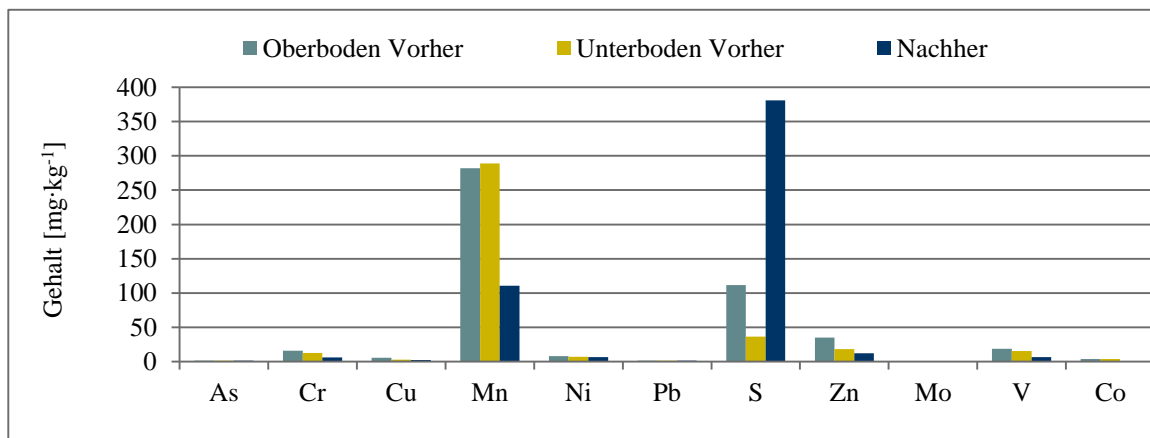


Abbildung 30: Zement unter Betonmischer Baustelle G

Der Prozess „Zementrückstände unter Kran“ zeigt eine deutliche Zunahme der Bleigehalte von 1,3 mg·kg⁻¹ auf 105 mg·kg⁻¹. Der Schwefelgehalt steigt im Vergleich zur Ausgangssituation deutlich an (310,2 mg·kg⁻¹). Auch die Zinkgehalte steigen von 18,4 bzw. 35 mg·kg⁻¹ auf 145,8 mg·kg⁻¹ an. Die Molybdängehalte nehmen von 0,4 mg·kg⁻¹ auf 10,4 mg·kg⁻¹ zu.

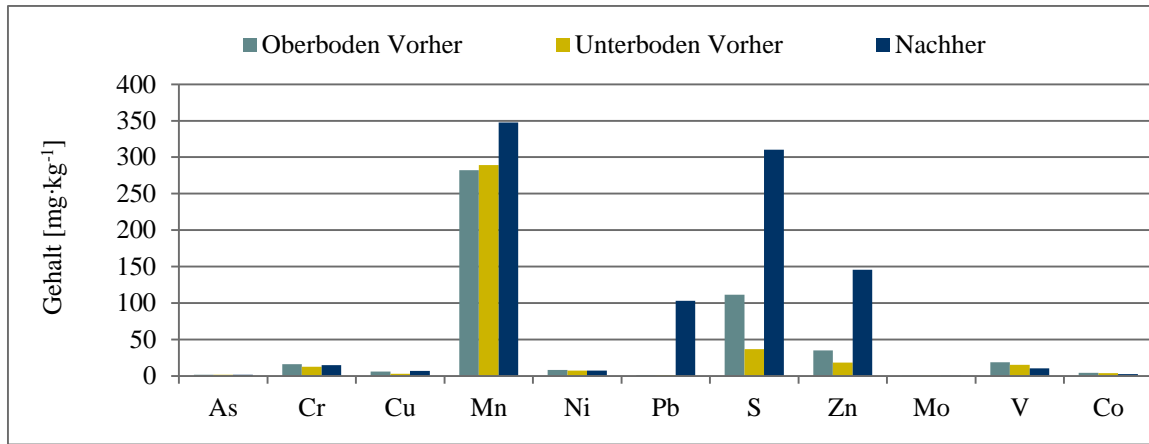


Abbildung 31: Zementrückstände unter Kran Baustelle G

Die Gehalte für Arsen zeigen im Übergangsbereich der Baustelleneinrichtungsfläche zur Bodenmiete eine leichte Zunahme (Abbildung 32) im Vorher-Nachher-Vergleich. Eine ähnliche Zunahme zeigt sich auch für den Parameter Blei. Für andere Parameter wie Chrom, Zink und Vanadium zeigen sich leichte Erhöhungen der Elementgehalte.

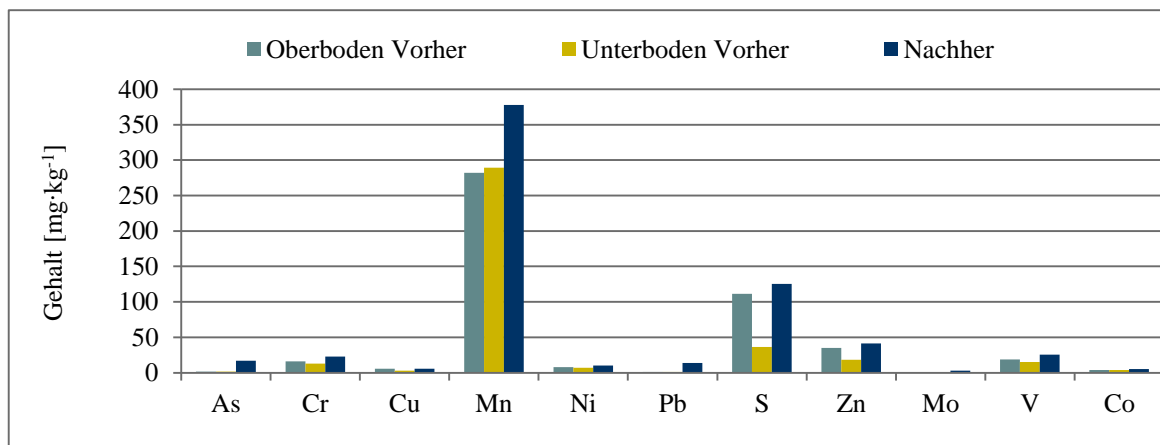


Abbildung 32: Übergangsbereich BE zur Bodenmiete Baustelle G

Der Prozess „Sägearbeiten Steine“ (Abbildung 33) zeigt eine Zunahme der Elementgehalte für Kupfer (Faktor 10) und Mangan (von knapp 300 auf 2221 mg·kg⁻¹). Für Zink und Vanadium zeigt sich eine geringfügige Abnahme in den Gehalten. Arsen, Blei und Molybdän bleiben unverändert.

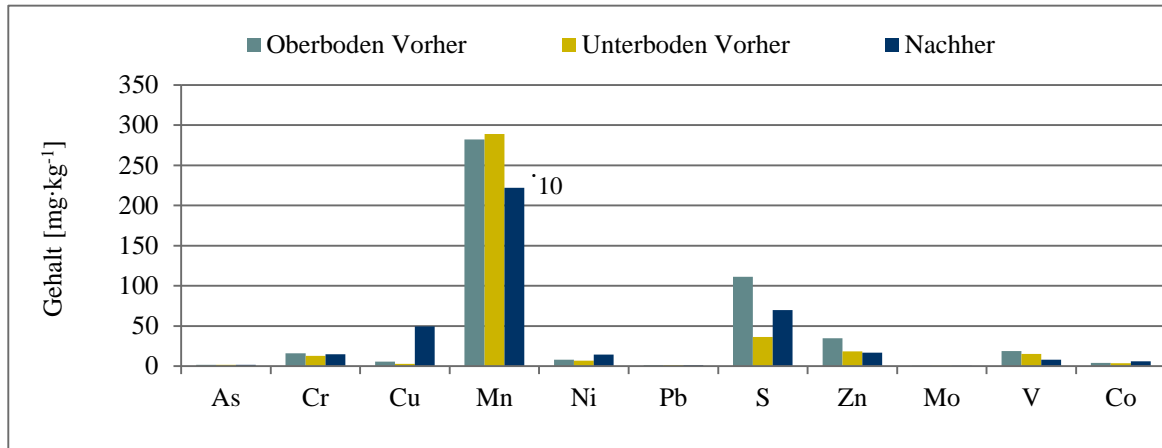


Abbildung 33: Sägearbeiten Steine Baustelle G

In Abbildung 34 zeigen sich sinkende Gehalte für alle Parameter mit Ausnahme von Kupfer und Mangan. Für diese beiden Elemente waren die Gehalte „Nachher“ zwei- bis dreimal höher als zu Beginn.

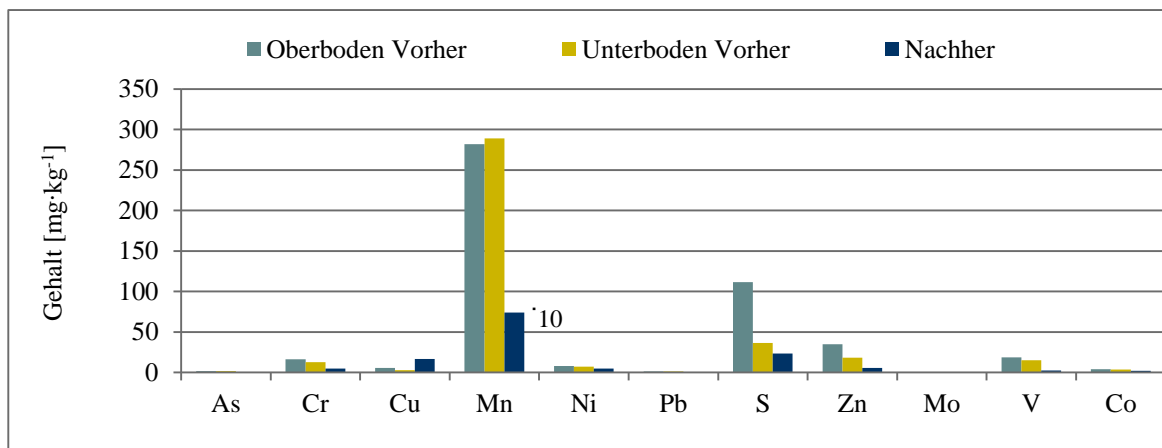


Abbildung 34: Bitumenabdichtung, Mörtel und Dämmung Baustelle G

Die Gehalte der Sonderprobe zeigen durchgehend abnehmende Tendenzen mit Ausnahme der Schwefelwerte.

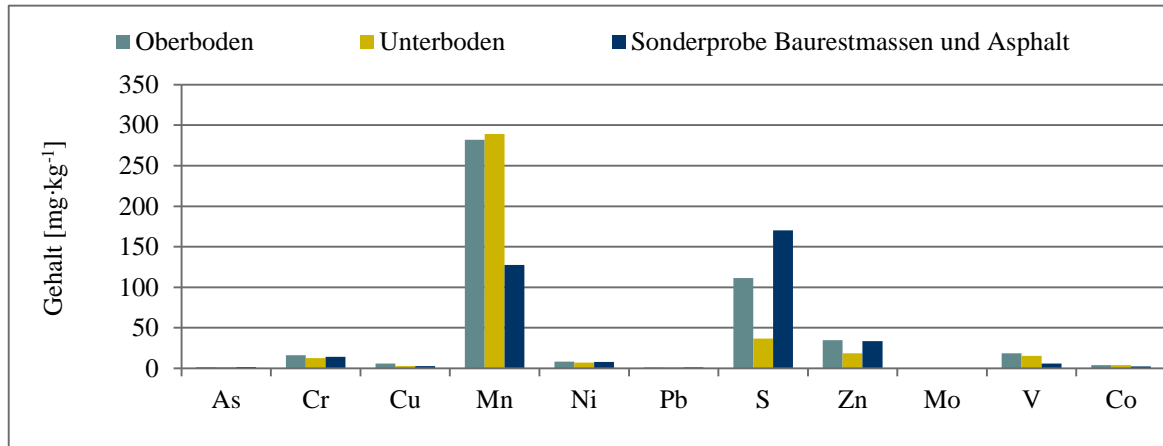


Abbildung 35: Sonderprobe Baurestmassen und Abfall Baustelle G

Die PAK-Gehalte für den Prozess Zement unter dem Betonmischer zeigen eine Erhöhung von 3,9 auf 8 mg·kg⁻¹. Die MKW-Werte zeigen eine geringfügige Abnahme der Werte von 12,9 auf 9,9 mg·kg⁻¹.

5.3 Baustelle E

5.3.1 Baustellenbeschreibung

Bei der untersuchten Baustelle handelte es sich um eine mittelgroße Hochbaubaustelle. Die Fläche wurde vor der Bebauung landwirtschaftlich genutzt und hat eine Bruttogrundfläche von 17.300 m². Bebaut wurde das Grundstück mit einem Fachmarktzentrum, bestehend aus Vollsortimenter, Discounter und Drogeriemarkt. Es wurde ein Flachbaukomplex zum Teil mit Fertigbauteilen errichtet. Dieser wird als Verkaufsfläche für Discounter und kleinere Geschäfte genutzt. Des Weiteren wurden eine Lieferzone mit Rampe und eine große Parkplatzfläche für PKWs geschaffen. Neben den Parkplätzen wurde ein Regenrückhaltebecken mit Sandfang errichtet, um die Entwässerung der Flächen zu gewährleisten.

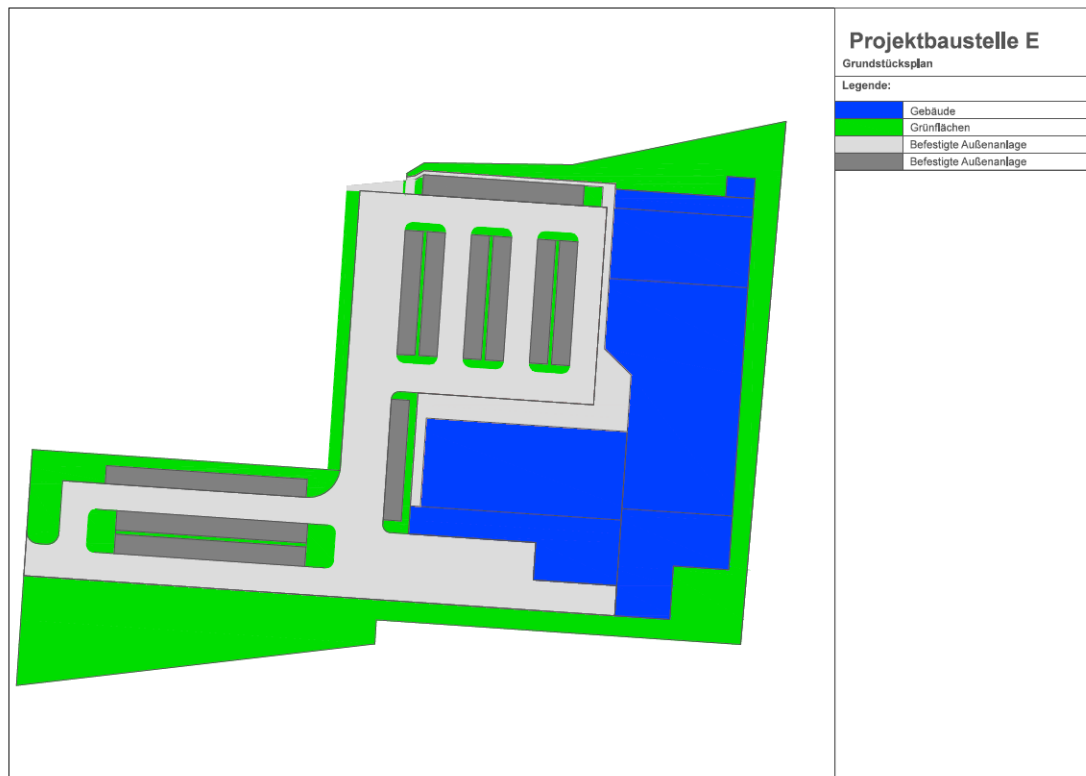


Abbildung 36: Grundstücksplan Baustelle E

Für die Baumaßnahme wurde der anstehende Mutterboden abgeschoben (ca. 25 cm) und die erforderlichen Bodenbewegungen durchgeführt. Nachdem das Baufeld hergerichtet war, wurden die Grund- und Versorgungsleitungen in Sand verlegt. Bei den Leitungen handelte es sich um Frischwasser-, Abwasser-, Gas-, Strom- und Telekommunikationsleitungen. Darauf folgten weitere Erdbauarbeiten. Die Baugruben für die Fundamente und für die Bodenplatten wurden mittels Bagger, Radlader, Raupen und Erdbauwalzen ausgehoben. Die Fundamente und Bodenplatten wurden eingeschalt und betoniert. Stützen und Unterzüge wurden als Fertigteile auf die Baustelle geliefert und in vorhandene Anschlüsse eingebaut. Insgesamt wurden 1.500 m³ Beton als Fertigteile, Fundamente und Decken verbaut. Die Dämmung der Fassade erfolgte als Wärmedämmverbundsystem bestehend aus 1.775 m² Polystyrol-Platten. Abschließend erhielt die Fassade als letzte Schicht einen Auftrag von Silikonharzputz mit 3-mm-Körnung. 1.330 m³ Boden, der während der Baumaßnahme gelagert wurde, konnte nach Fertigstellung des Gebäudes wiederverwendet werden, 3060 m³ Boden wurden abgefahren.

5.3.2 Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse

Für die Prozessanalyse standen ein Grobtermin- und ein Baustelleneinrichtungsplan zur Verfügung. Die gesamte Bauzeit betrug 8 Monate, die Baustellenarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes bis zum Beginn der Erstellung der Außenanlagen untersucht (vgl. Abbildung 37).

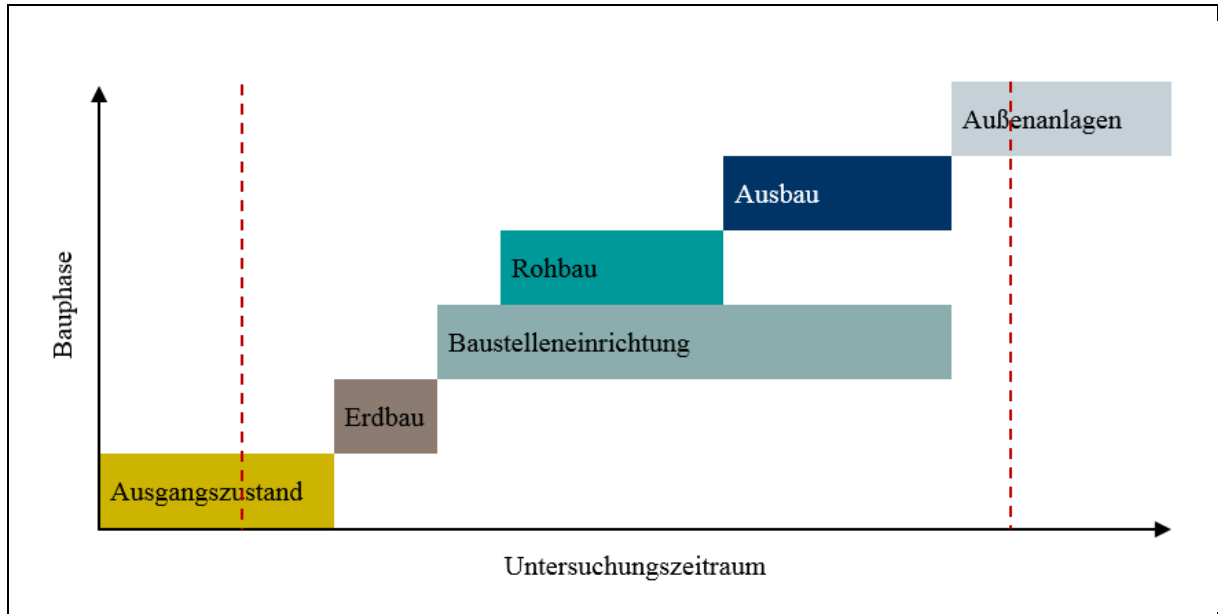


Abbildung 37: Untersuchte Prozesse auf Baustelle E

Mit Ausführungsbeginn der Baumaßnahme wurden zunächst Erdarbeiten durchgeführt. Der vorhandene Oberboden wurde mittels Planierraupe und Hydraulikbagger mit Kettenlaufwerk sowie einem Radlader abgeschoben. Der abgetragene Boden wurde auf drei mittelgroße Bodenmieten abseits der Baustelle verfrachtet und dort bis zur Erstellung der Außenanlagen gelagert. Die Bodenmieten waren ca. 2,50 m bis 4 m hoch und wiesen teilweise einen Krautbewuchs auf.



Abbildung 38: Erdarbeiten und Bodenmiete Baustelle E [Fotos: B. Marx]

Nach Herrichtung des Geländes und den notwendigen Ausschachtungsarbeiten wurde die Baustelleneinrichtung vorgenommen, diese bestand zunächst aus geschotterten und verdichteten Baustraßen rund um das gesamte Baugelände sowie Sozial- und Bürocontainern, Materiallagern und der Medienversorgung.

Der Rohbau wurde aus Betonfertigteilen und gemauertem Kalksandstein erstellt. Für die Rohbauphase charakteristisch waren u. a. folgende Baustoffe, Hilfsmittel und Baugeräte:

- Schalbretter und Schalöl
- Bewehrungsstahl
- Bitumendickbeschichtung
- Kalksandstein und Dünnbettmörtel
- Kreissäge
- Polystyrol-Dämmplatten
- Hubbühnen
- Betonpumpen



Abbildung 39: Rohbauarbeiten Baustelle E [Fotos: B. Marx]

Nach Fertigstellung des Rohbaus wurde mit der Dämmung der Fassade und den Ausbauarbeiten begonnen. Diese sind i. d. R. durch mehrere parallel arbeitende Ausbaugewerke gekennzeichnet. Die Außenflächen wurden im Bereich der Gebäudeeingänge vielfach als Materiallager, für die Abfallentsorgung und als Arbeits- und Werkfläche genutzt. Die Dämmung bestand aus vollflächig verklebten Polystyrol-Dämmplatten, die anschließend mit Silikonharzputz versehen wurden.



Abbildung 40: Fassaden- und Ausbauarbeiten Baustelle E [Fotos: B. Marx]

Nach Fertigstellung des Fachmarktzentrums wurden die Außenanlagen gestaltet. Der auf den Bodenmieten gelagerte Oberboden wurde wieder aufgetragen, Gehwege und Parkplätze gepflastert sowie Grünflächen angelegt. Mit Hilfe einer Umkehrfräse als Anbaugerät wurden Steine und Schutt eingesammelt und der Boden geglättet. Durch die spezielle Funktion der Fräse, die sich entgegengesetzt zur Fahrrichtung der Räder bewegt, entstand ein saarfertiges Gelände ohne Steine.



Abbildung 41: Außenanlagen Baustelle E [Fotos: B. Marx]

Zu den untersuchten Bauprozessen gehörten

- Oberbodenabtrag und Befahrung
- Errichtung des Rohbaus (Betonfertigteile)
- Elemente der Baustelleinrichtung
- Fassadenarbeiten (Dämmung und Putzauftrag)
- Erstellung der Außenanlagen.

Zu beachten ist, dass es zu zeitlichen und räumlichen Überschneidungen der Bauprozesse gekommen ist. Dies war besonders in der Rohbau- und Ausbauphase der Fall.

Bauprozess	Mögliche Beeinflussung des Bodens
Oberbodenabtrag und Befahrung	Verdichtung
Rohbau/Betonfertigteile	Verdichtung durch Befahrung mit Baggern, Kranen und Hebebühnen, Verunreinigung durch Ortbeton
Baustelleneinrichtung	Verunreinigung durch Sägestaub, Bauchemikalien, Mörtel, Abfälle, Kraftstoffe und Baustoffe (Putzsilo)
Fassadenarbeiten	Verunreinigung mit geschäumten Kunststoffen, Bitumen-dickbeschichtung, Silikonharzputz

Tabelle 14: Prozessanalyse Baustelle E

5.3.3 Messnetz

In Abbildung 42 ist das Messnetz der Baustelle E dargestellt. Die Beprobung erfolgte zu sechs Zeitpunkten. Es konnten keine Referenzflächen angelegt werden.

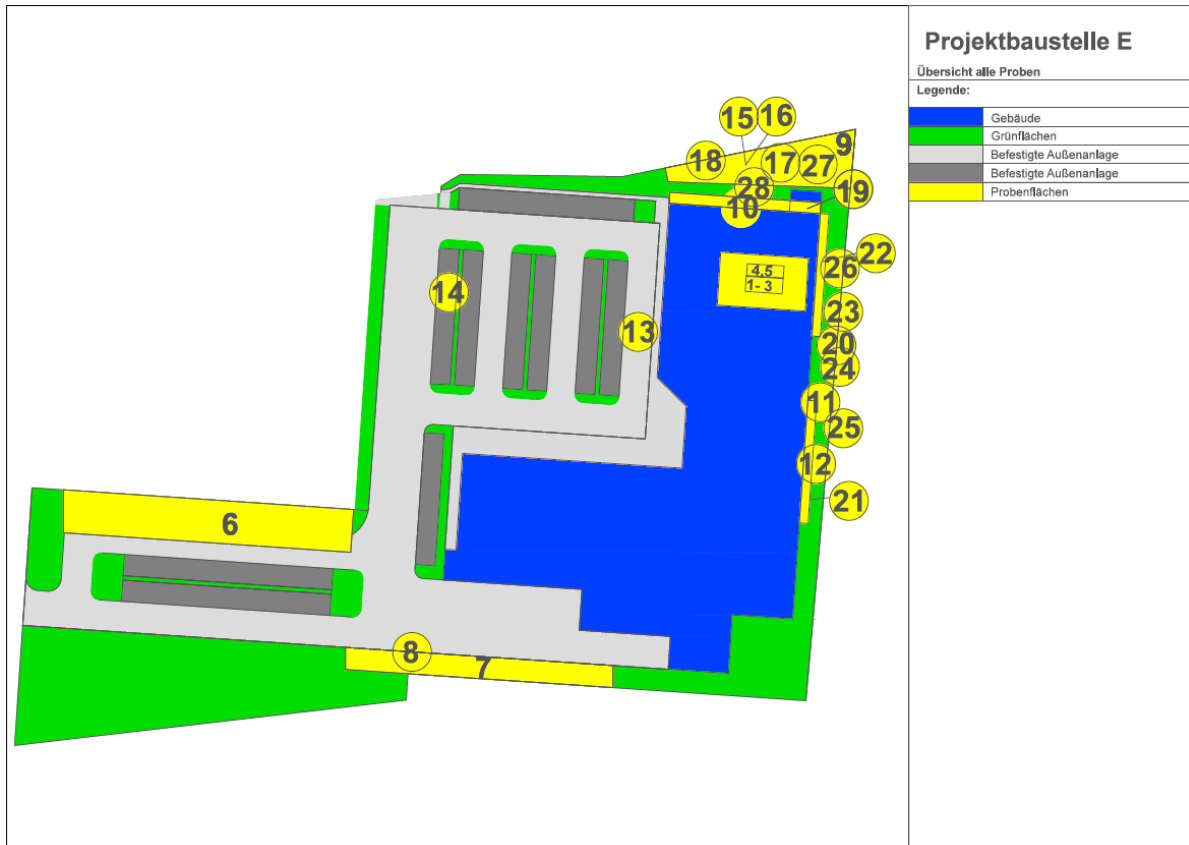


Abbildung 42: Messnetz Baustelle E

5.3.4 Ergebnisse der Bodenanalyse

Der anstehende Boden der Baustelle E ist homogen. Der humose Oberboden hat eine Mächtigkeit von 30 cm. Die Abgrenzung zum Unterboden ist scharf. Die Fläche wurde landwirtschaftlich genutzt und war zu Beginn der Bautätigkeit begrünt (Rasen). Es handelt sich hier um einen Braunerde-Pararendziner aus Löß. In der Region sind ebenso typische Parabraunerden häufig (BK50) vorzufinden. Nach GK100 ist der Löß den Prozessen der Weichselkaltzeit zuzuordnen.

Die Veränderungen der Bodenschichtung ist in Tabelle 15 dargestellt. Zu sehen sind der Ausgangszustand links, der gekappte Boden nach Abtrag des humosen Oberbodens und die Schichtung nach Abschluss der Bautätigkeiten. Nach Abschluss der Rohbauphase wurde der Oberboden nachträglich mit einem Ober- und Unterbodengemisch überlagert.









	Vor Beginn der Bautätigkeit	Nach Abtrag des Oberbodens	Nach Abschluss der Rohbauphase
0-30 cm Ap (Oberboden) Anstehender ungestörter Oberboden. Humos und hohe biologische Aktivität (Bioturbation).			
31-40 cm Bv (Unterboden)			
41-80+ cm eC (Untergrund) Hinweise auf hohe biologische Aktivität durch Regenwurmgänge und Wurzeln.			 Nach Auftrag von Oberboden (gelbe Markierung) und einem Ober- Unterbodenge- misch (grüne Markierung)

Tabelle 15: Bodeneigenschaften Baustelle E [Fotos: B. Marx]

Auf der Baustelle E wurden folgende Prozesse untersucht:

- Bodenabtrag und Bodenlagerung auf Bodenmiete
- Betonfertigteile, Befahrung mit Bagger, Kran und Bühne
- Bitumenabdichtung, Innenausbau, Bauschutt
- Säge- und Trennarbeiten (Flex)
- Schutt, Mörtelreste, Abfälle
- Putzsilo
- Dämmung (WDVS), Putzauftrag
- Drainagearbeiten, Elektroarbeiten, Entfernung von Steinen im Boden
- Bodenlagerung auf Miete
- Oberbodenauftrag zur Bepflanzung

Bodenchemische Parameter

Arsen (26 auf 41 mg·kg⁻¹) und Vanadium zeigen für den Prozess „Bodenabtrag und -lagerung auf Bodenmiete“ einen leichten Anstieg der Gehalte (Abbildung 43). Die Bleigehalte nehmen von 30 auf 13 mg·kg⁻¹ ab. Die anderen Elemente zeigen nur minimale Veränderungen.

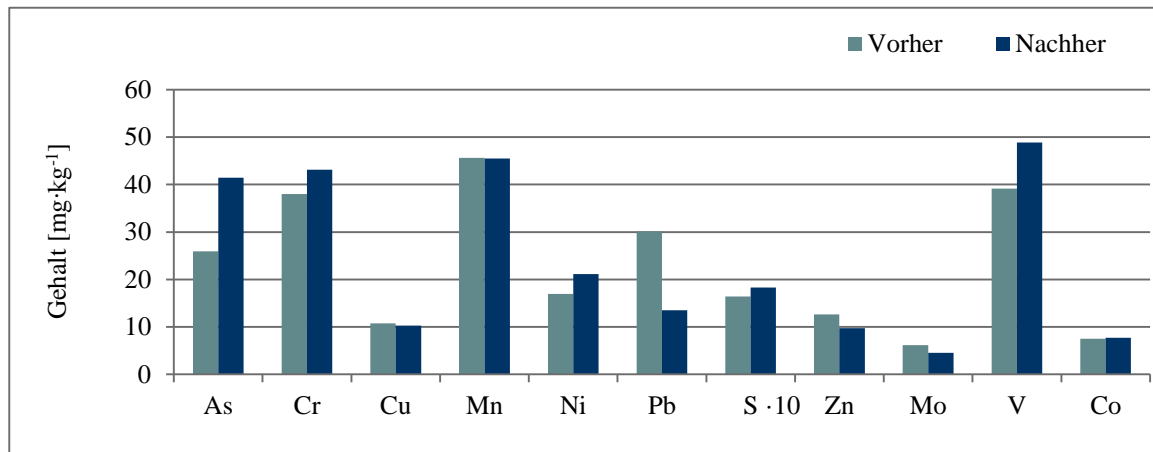


Abbildung 43: Bodenabtrag und -lagerung Baustelle E

In Abbildung 44 sind deutliche Zunahmen bei Chrom (38 auf 65 mg·kg⁻¹), Blei (30 auf 71 mg·kg⁻¹), Schwefel und Zink erkennbar. Weiterhin gibt es Zunahmen bei Kupfer und Nickel und Abnahmen bei Arsen. Die Elementgehalte von Molybdän und Kobalt sind bei dem Prozess Betonfertigteile, Befahrung mit Bagger, Kran und Bühne nahezu unverändert.

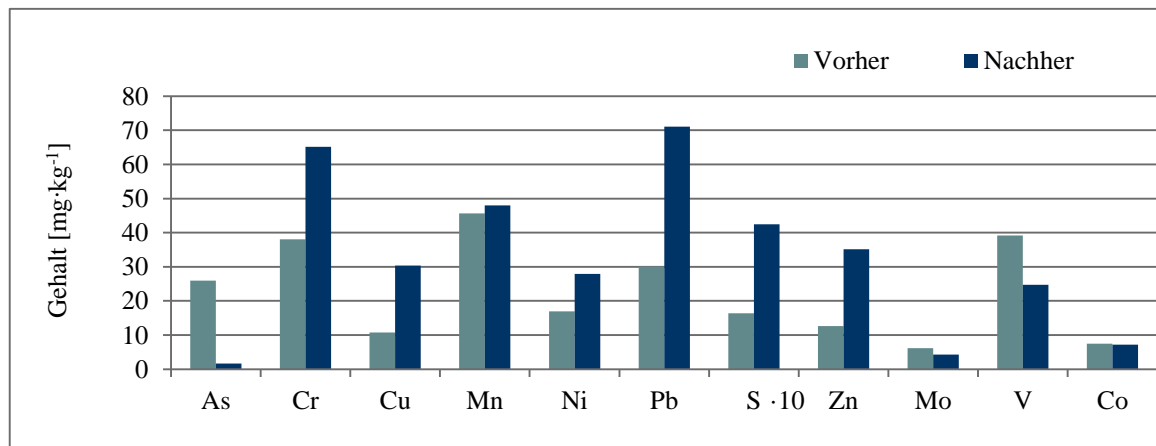


Abbildung 44: Betonfertigteile und Befahrung Baustelle E

Der Prozess „Bitumenabdichtung, Innenausbau, Bauschutt“ weist eine starke Zunahme bei dem Element Schwefel von 160 auf 1104 mg·kg⁻¹ auf. Mangan-, Blei- und Zinkgehalt steigen ebenfalls leicht an, wohingegen die anderen Elementgehalte nahezu unverändert sind. Einzig Chrom zeigt eine gut erkennbare Abnahme der Gehalte (Abbildung 45).

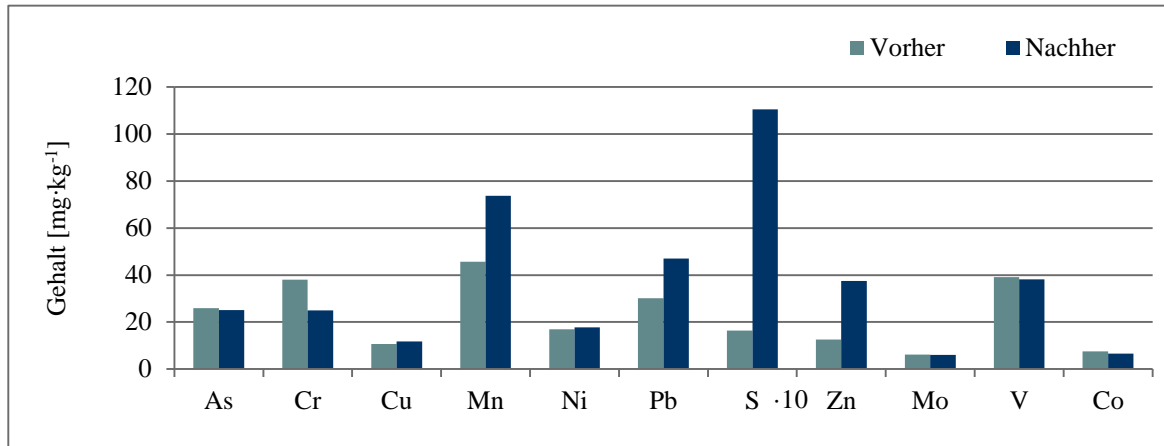


Abbildung 45: Bitumenabdichtung und Innenausbau Baustelle E

In Abbildung 46 sind deutliche Zunahmen für drei Elemente erkennbar. Der Mangengehalt steigt von 46 auf 88 mg·kg⁻¹. Der Bleigehalt verdreifacht sich von 30 auf 95 mg·kg⁻¹. Eine besonders große Steigerung zeigt zudem der Zinkgehalt, der von 13 auf 69 mg·kg⁻¹ steigt. Die sonstigen Elemente zeigen hierzu im Vergleich nur geringfügige Veränderungen.

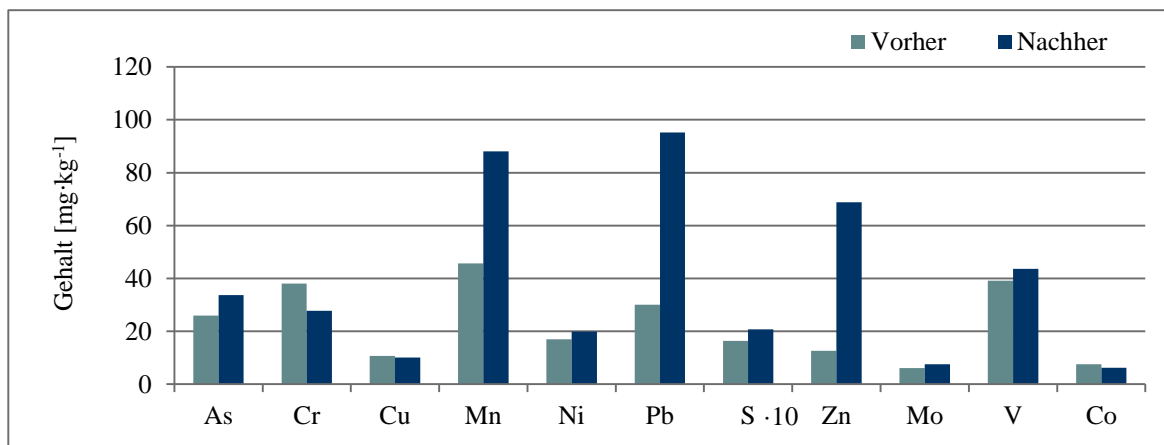


Abbildung 46: Säge- und Trennarbeiten Baustelle E

Für den Prozess „Schutt, Mörtelreste, Abfälle“ ist die Zunahme der Kupfergehalte von 11 auf 70 mg·kg⁻¹ die größte Veränderung. Nickel und Schwefel zeigen auch Zunahmen, wohingegen die Elementgehalte sonst eine sinkende Tendenz aufweisen. Deutliche Abnahmen gibt es zum Beispiel bei Chrom von 38 auf 15 mg·kg⁻¹ und Vanadium 39 auf 17 mg·kg⁻¹ (Abbildung 47).

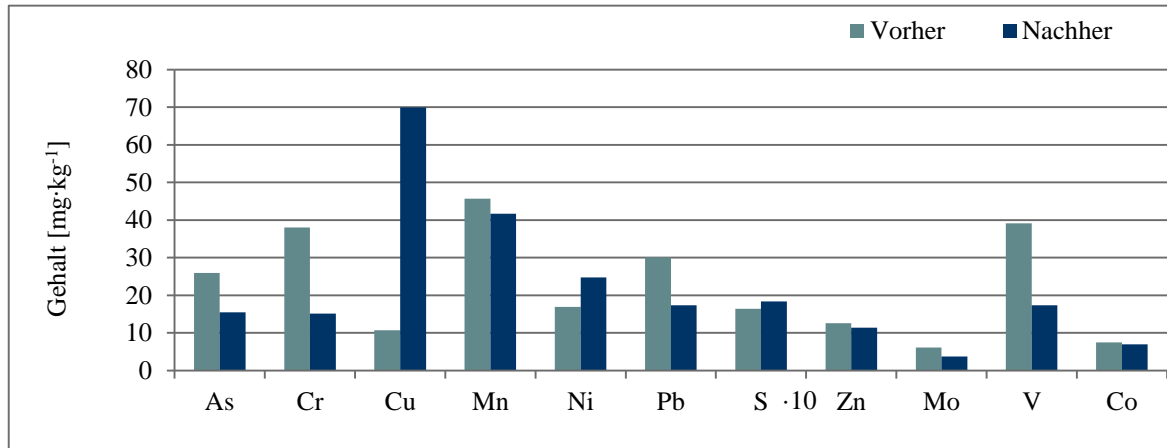


Abbildung 47: Schutt, Mörtelreste und Abfälle Baustelle E

Die sinkenden Elementgehalte in Abbildung 48 sind vor der extrem hohen Zunahme des Schwefelgehalts verschwindend gering. Dennoch sinken alle anderen Elementgehalte mit Ausnahme von Kupfer und Zink, die sich jedoch auch auf einem geringen Wertenniveau befinden.

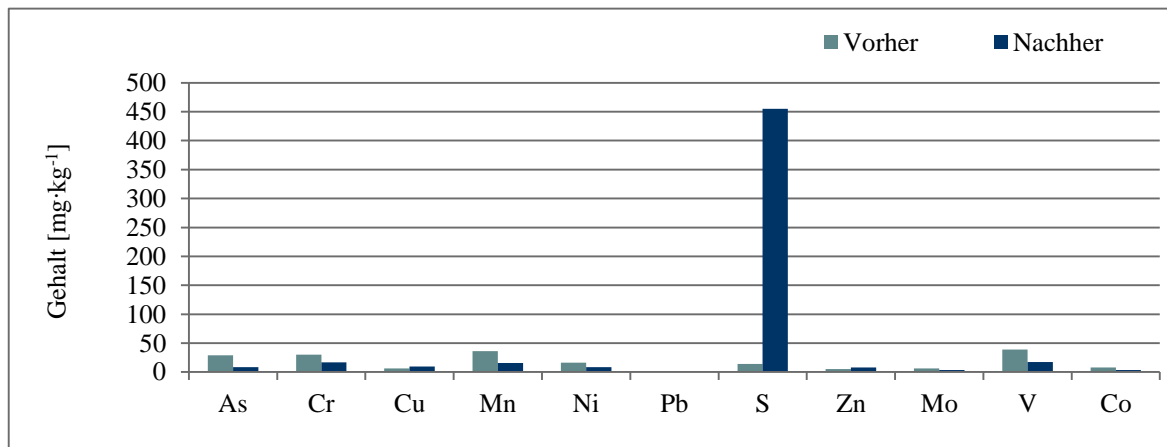


Abbildung 48: Putzsilo Baustelle E

Wie in Abbildung 48 zeigt sich in Abbildung 49 eine extrem starke Zunahme des Schwefelgehalts von 420 auf 5097 mg·kg⁻¹. Parallel dazu sinken auch hier die anderen Elementgehalte. Einzig für Arsen ist ebenfalls ein Anstieg von 2 auf 17 mg·kg⁻¹ erkennbar.

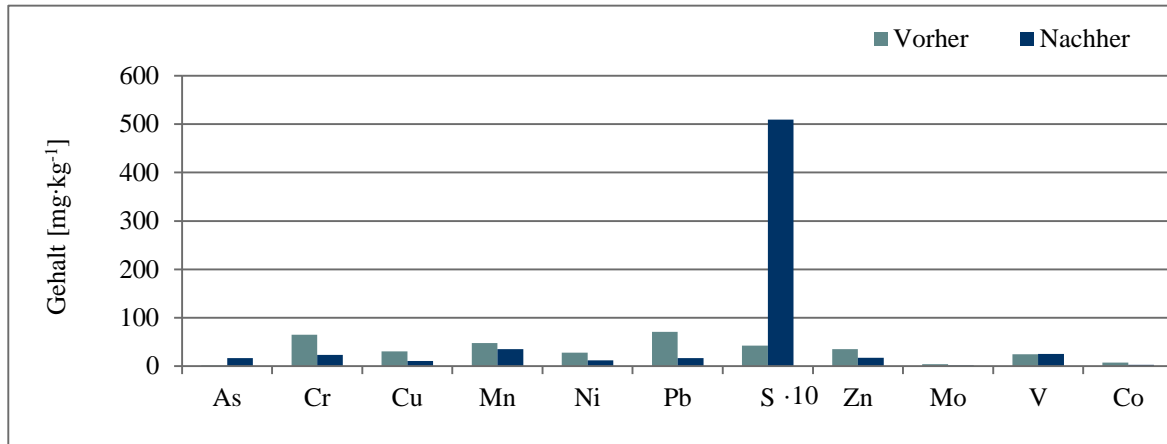


Abbildung 49: Dämmung und Putzauftrag Baustelle E

In Abbildung 50 zeigt sich eine umgekehrte Entwicklung als bei Abbildung 47 und Abbildung 48. Für den Prozess „Drainagearbeiten, Elektroarbeiten, Entfernung von Steinen im Boden“ ist eine Zunahme über alle Parameter mit Ausnahme des Schwefelgehaltes zu erkennen. Der Schwefelgehalt sinkt von 9719 auf 850 mg·kg⁻¹. Besonders der Mangangehalt steigt von 15 auf 60 mg·kg⁻¹ deutlich an.

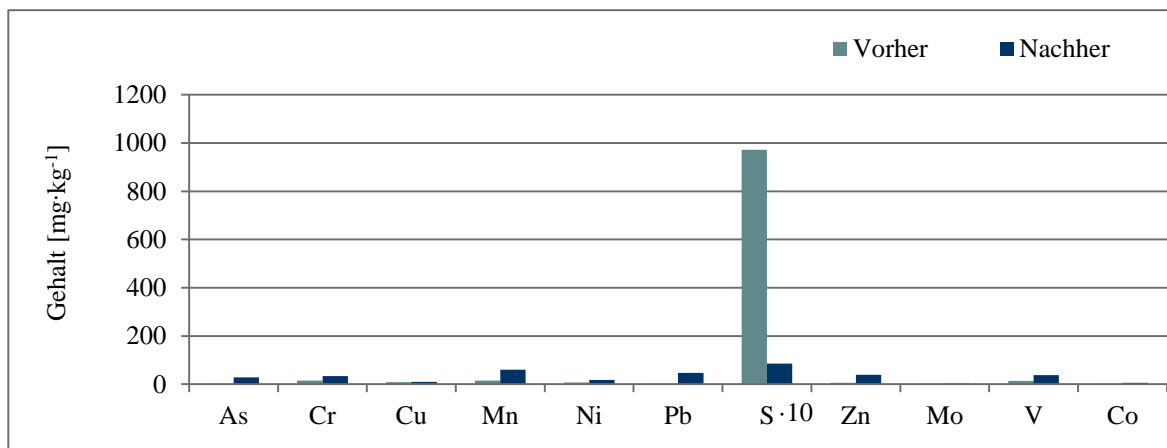


Abbildung 50: Drainage, Elektroarbeiten, Entfernung von Steinen Baustelle E

Der Prozess „Bodenlagerung auf Miete“ (Abbildung 51) zeigt wie der Prozess „Drainagearbeiten, Elektroarbeiten, Entfernung von Steinen im Boden“ (Abbildung 50) steigende Gehalte bei fast allen Elementen. Im Unterschied steigt jedoch auch der Schwefelgehalt. Besondere Zunahmen zeigen Mangan (22 auf 60 mg·kg⁻¹), Blei und Vanadium (24 auf 53 mg·kg⁻¹).

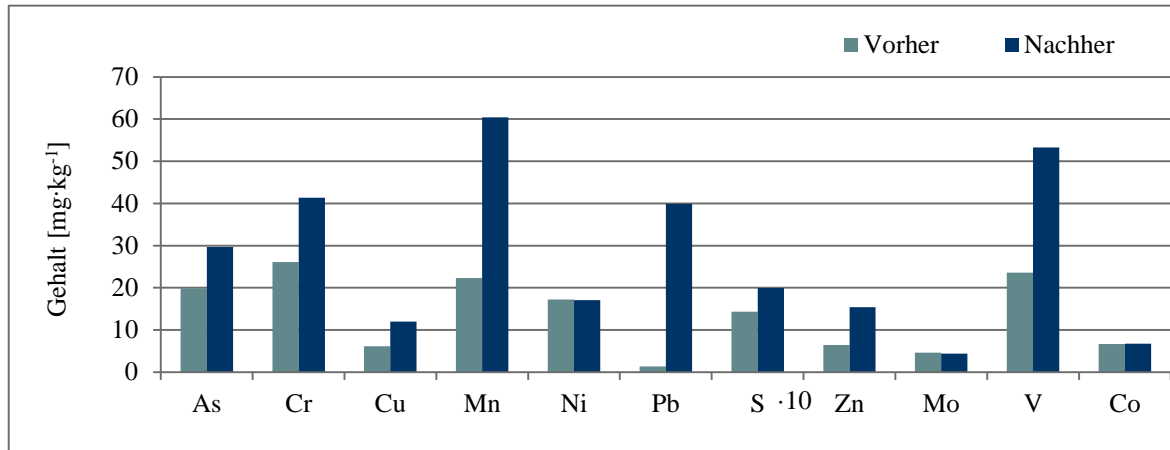


Abbildung 51: Bodenlagerung auf Miete Baustelle E

Die Elementgehalte für den Prozess „Oberbodenauftrag zur Bepflanzung“ zeigen nur geringe Veränderungen. Für Arsen (26 auf 41 mg·kg⁻¹) ist eine Zunahme und für Blei (30 auf 14 mg·kg⁻¹) eine Abnahme erkennbar.

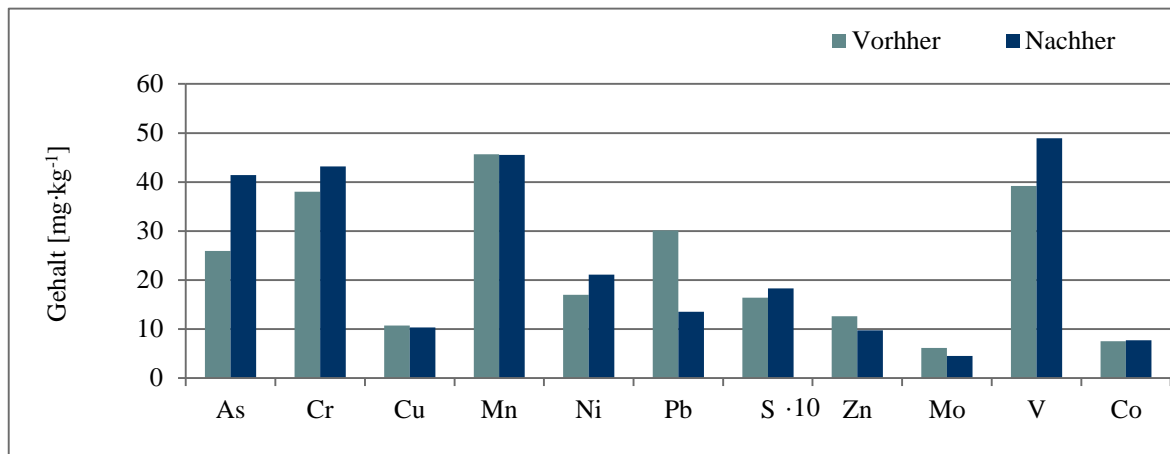


Abbildung 52: Oberbodenauftrag Baustelle E

Die Ergebnisse der Analyse auf organische Schadstoffe zeigen nur für Probe E-10 und E-11 leichte Veränderungen der Gehalte. In allen anderen untersuchten Proben lagen die Werte unter der Nachweisgrenze (Tabelle 16).

Probe	PAK Σ [mg·kg ⁻¹]	MKW c10-c22 [mg·kg ⁻¹]	MKW c10-c40 [mg·kg ⁻¹]
E-9	n.d.	n.d.	n.d.
E-10	0,730	21	170
E-11	n.d.	48	77
E-12	n.d.	n.d.	n.d.
E-19	n.d.	n.d.	23
E-21	n.d.	n.d.	13
E-22	n.d.	n.d.	n.d.
E-24	n.d.	n.d.	n.d.

Tabelle 16: Ergebnisse der Analyse auf org. Schadstoffe Baustelle E

Bodenphysikalische Parameter

Die Dichte des Bodens wurde vor (PN1) und nach (PN2) Abtrag des Oberbodens analysiert. Für jeden Zeitpunkt und Horizont wurden 16 Proben untersucht. Im Oberboden ist eine Veränderung der Dichte erkennbar. Die Veränderung ist signifikant. Im Unterboden gibt es keine signifikanten Unterschiede bei der Dichte.

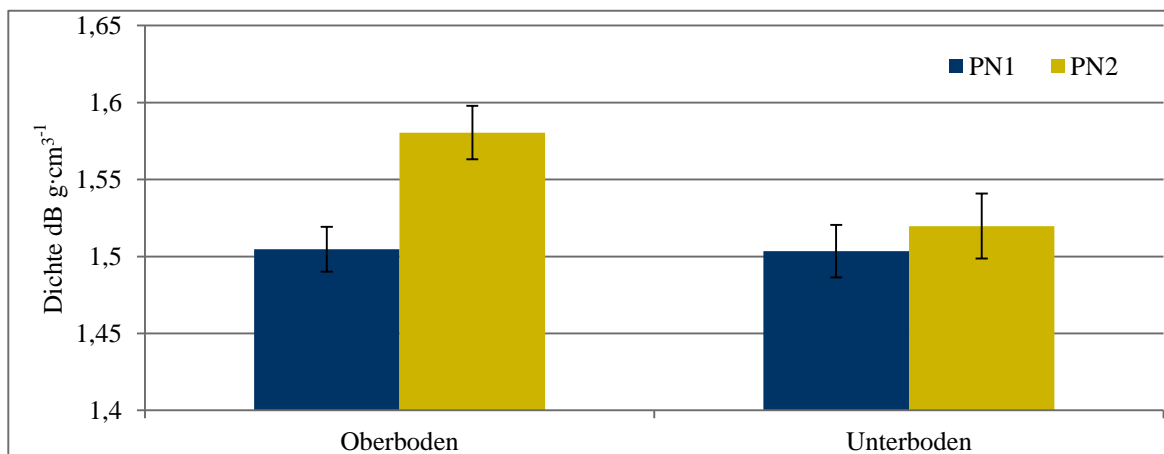


Abbildung 53: Lagerungsdichte E

Die Ergebnisse der gesättigten Leitfähigkeit zeigen keinen eindeutigen Trend. Die Werte haben sich verändert. Dabei scheinen sich die Werte aufzuspalten. Im Unterboden scheint die Leitfähigkeit zuzunehmen. Die Spannweite innerhalb eines Horizonts ist jedoch sehr groß, sodass trotz des Probenumfangs und der Wiederholungsmessungen nur eine begrenzte Aussage möglich ist.

Gesättigte Leitfähigkeit							
Stufe	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem	(n)
Leitfähigkeit [cm/d]	<1	1<10	10<40	40<100	100<300	≥300	
	Anzahl je Stufe						
Horizont							
B-Horizont vorher	-	3	4	1	-	-	8
B-Horizont nachher	2	3	1	-	2	-	8
C-Horizont vorher	-	4	3	-	-	1	8
C-Horizont nachher	-	3	-	-	2	2	7

Tabelle 17: Gesättigte Leitfähigkeit Baustelle E

Abbildung 54 und Abbildung 56 zeigen das Gesamtporenvolumen des B- und C-Horizonts. Im B-Horizont gibt es einen signifikanten Unterschied des Gesamtporenvolumens vor und nach Abtrag des Oberbodens. Das Gesamtporenvolumen im C-Horizont unterscheidet sich nicht signifikant. Es wurden jeweils 16 Proben analysiert.

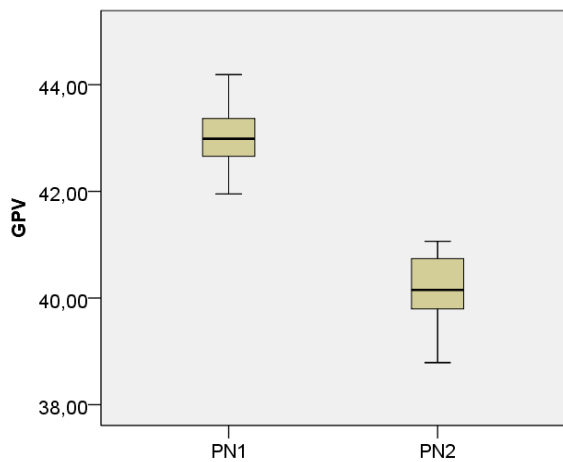


Abbildung 54: Gesamtporenvolumen B-Horizont

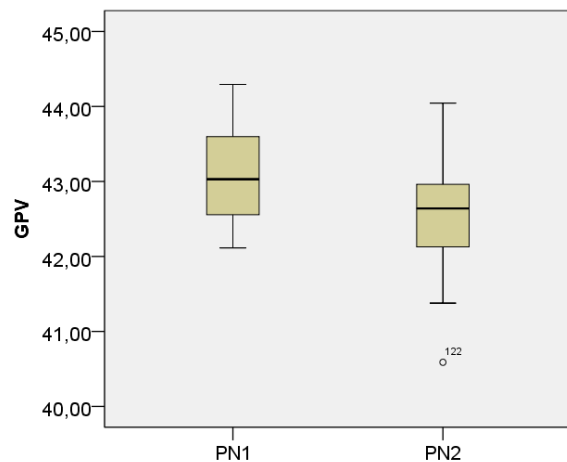


Abbildung 55: Gesamtporenvolumen C-Horizont

Bei Betrachtung der Porenverteilung im Oberboden fällt auf, dass die Abnahme des Gesamtporenvolumens insbesondere auf eine Abnahme der Grobporen zurückzuführen ist (Abbildung 56). Der Anteil der Mittel- und Feinporen bleibt unverändert. Im Unterboden ist das Gesamtporenvolumen annähernd konstant. Eine Zunahme des Feinporenanteils zulasten der Grob- und Mittelporen ist jedoch erkennbar. Es wurden jeweils 16 Proben analysiert.

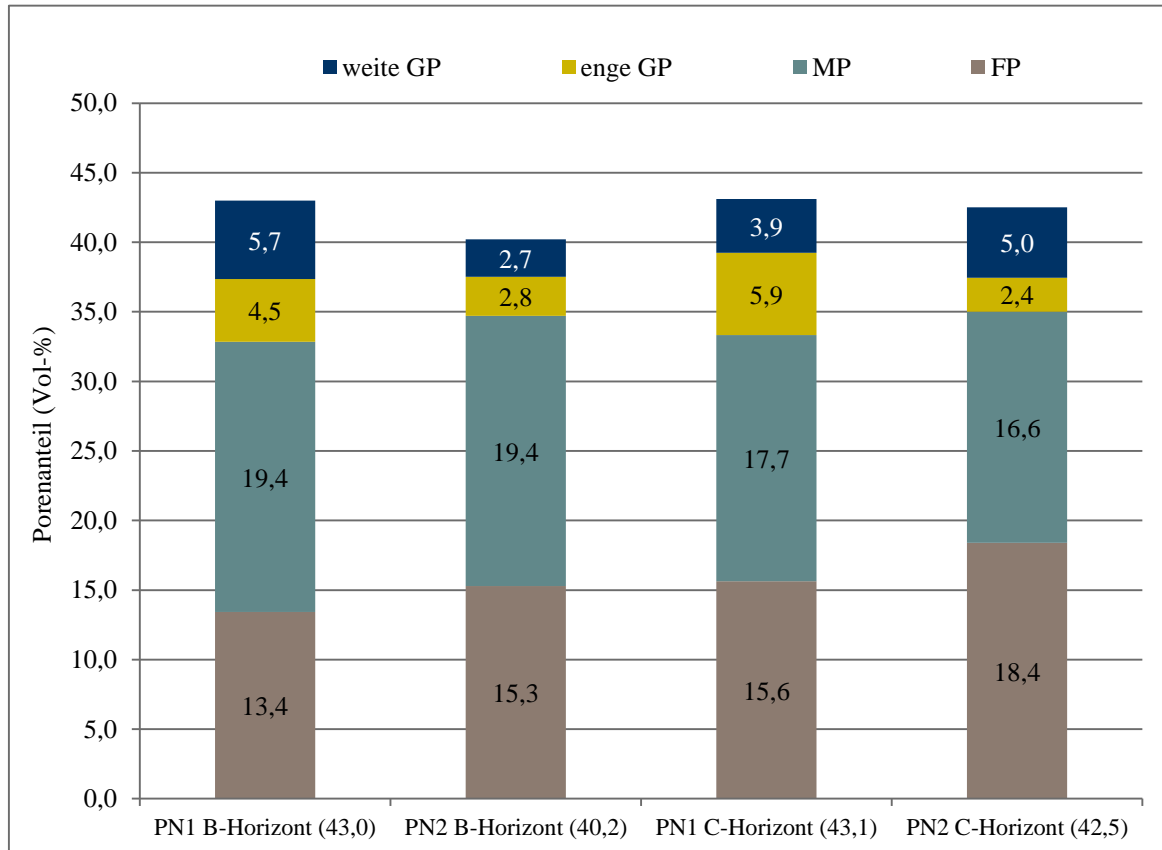


Abbildung 56: Porenverteilung B-Horizont und C-Horizont Baustelle E

In Abbildung 57 ist neben dem Eindringwiderstand der Wassergehalt im B-Horizont der Baustelle E vor und nach Abtrag des Oberbodens dargestellt. Zudem ist in gestrichelten Linien die jeweilige Standardabweichung für den ermittelten Eindringwiderstand angegeben. Pro Untersuchungspunkt wurden 10 Penetrationen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen keinen deutlichen Unterschied erkennen. Der Wassergehalt unterscheidet sich minimal.

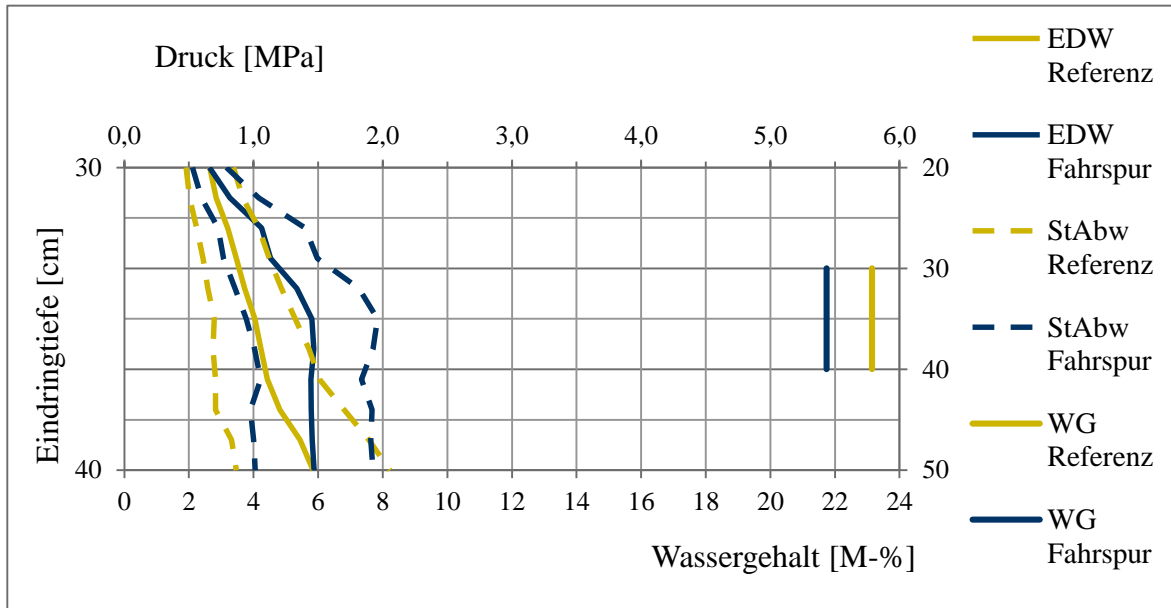


Abbildung 57: Mittelwerte Eindringwiderstand und Wassergehalte im B-Horizont Baustelle E

In Abbildung 58 sind Eindringwiderstand und Wassergehalt des C-Horizonts der Baustelle E vor und nach Abtrag des Oberbodens dargestellt. In gestrichelten Linien ist die jeweilige Standardabweichung für den ermittelten Eindringwiderstand angegeben. Pro Untersuchungspunkt wurden 10 Penetrationen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen keinen deutlichen Unterschied erkennen, der über die Standardabweichung hinausgeht.

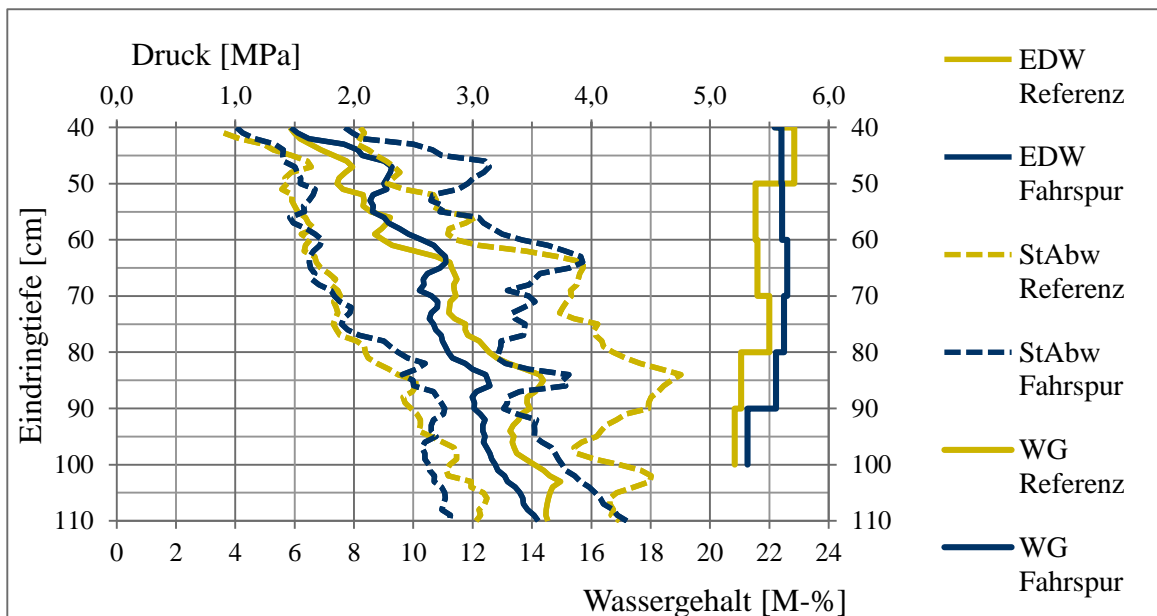


Abbildung 58: Mittelwerte Eindringwiderstand und Wassergehalte im C-Horizont Baustelle E

5.4 Baustelle L

5.4.1 Baustellenbeschreibung

Bei dieser Baumaßnahme handelte es sich um den Neubau eines Einfamilienhauses in Massivbauweise. Das Grundstück hat eine Größe von 543 m² und liegt in einem Neubaugebiet. Die bebaute Fläche wurde vormals landwirtschaftlich genutzt. Der Rohbau wurde aus Kalksandstein erstellt, das Fundament aus Ortbeton. Die Verblendung der Außenwände erfolgte mit Klinkersteinen.

Die Flächeninanspruchnahme für den Baukörper beträgt ca. 160 m². Zusätzlich zum Wohnhaus wurde eine Garage sowie eine Zufahrt zur Garage errichtet. Die Zugänge zum Haus sowie die Terrassen wurden aus versickerungsfähigem Pflaster erstellt. Eine mögliche Nutzung als Grünfläche obliegt den späteren Eigentümern.

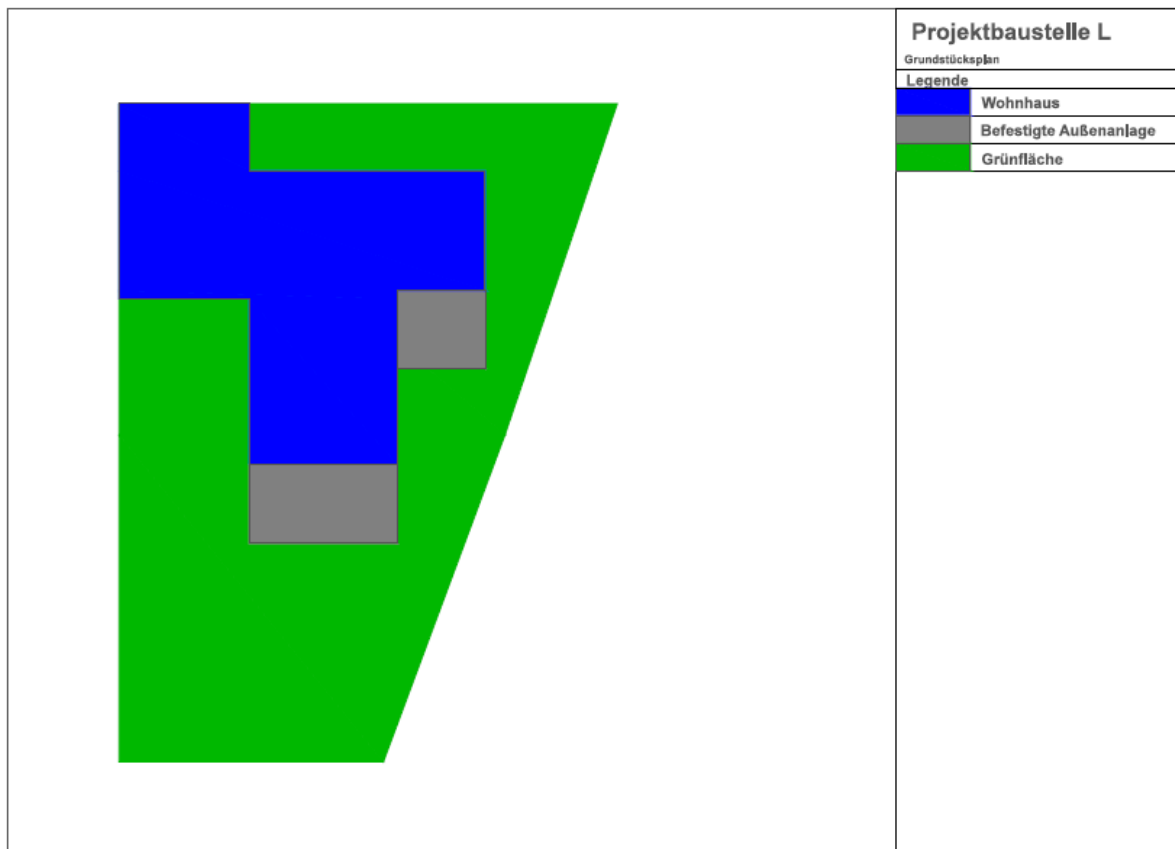


Abbildung 59: Grundstücksplan Baustelle L

Im Rahmen der Erdarbeiten wurde nach Entfernung der obersten Krautschicht ca. 30 cm des Oberbodens mit einem Raupenbagger abgetragen und seitlich auf dem Grundstück auf einer Bodenmitte gelagert. Die spätere Garageneinfahrt wurde geschottert und verdichtet und stand somit als Baustelleneinrichtungsfäche zur Verfügung. Die Streifenfundamente wurden aus Ortbeton erstellt. Das Außenmauerwerk besteht aus 17,5 cm starkem Kalksandsteinmauerwerk, die Wärmedämmung wurde als

Kerndämmung (Mineralwolle) ausgeführt. Die Verblendung der Außenwände erfolgte mit Klinkersteinen.

5.4.2 Ergebnisse der Prozess- und Stoffstromanalyse

Aufgrund der vergleichsweise kleinen Baumaßnahme wurden weder ein Termin-, noch ein Baustelleneinrichtungsplan erstellt. Die gesamte Bauzeit betrug 8 Monate. Die Baustelle wurde im Rahmen des Forschungsprojektes bis zum Beginn der Rohbauarbeiten untersucht (vgl. Abbildung 60).

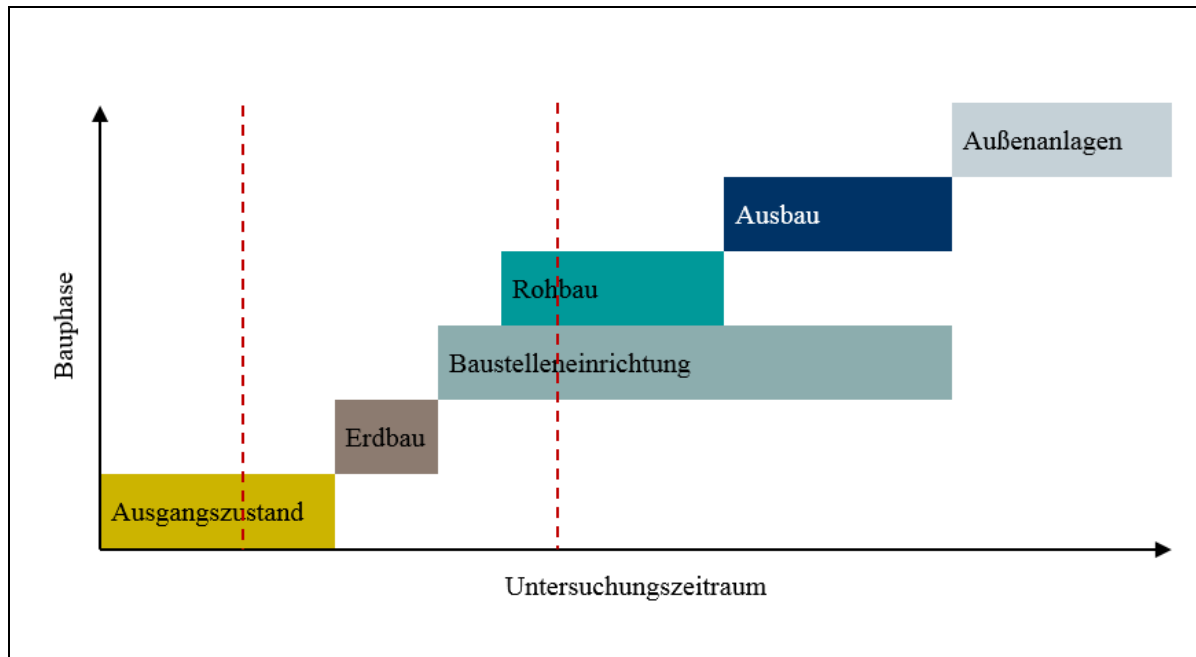


Abbildung 60: Untersuchte Prozesse auf Baustelle L

Für die Baufeldfreimachung wurde der anstehende Mutterboden abgetragen und seitlich auf dem Grundstück gelagert. Die Dicke der abgetragenen Schicht betrug ca. 35 cm. Der Bodenaushub der Streifenfundamente wurde ebenfalls seitlich auf einer Bodenmiete gelagert. Die Erdarbeiten wurden mit einem Raupenbagger ausgeführt, die Befahrung des Grundstücks folgte dabei keinem speziellen Überführungsmuster. Spätere Grün- und Freiflächen (Oberboden) wurden hierbei häufig überfahren.



Abbildung 61: Erdarbeiten Baustelle L [Fotos: A. Randel]

Für die Erstellung der Streifenfundamente wurden Schalbretter installiert und anschließend mit Beton aufgefüllt. Die Befüllung erfolgte per Kran und Betonkübel. Das Fundament wurde ebenfalls mittels Betonkübel befüllt. Der Bereich der späteren Garageneinfahrt und des Gartens wurde als Materiallager und Baustelleneinrichtungsfläche genutzt. Hier wurden bis zum Einbau Kalksandsteine auf Paletten und Schalbretter gelagert sowie ein Bauwagen abgestellt.



Abbildung 62: Streifenfundamente und Rohbauarbeiten Baustelle L [Fotos: A. Randel]

Nach Fertigstellung des Fundaments wurde mit der Erstellung des Mauerwerks begonnen. Zu den untersuchten Bauprozessen gehörten der Oberbodenabtrag im Rahmen der Erdarbeiten, die Schalung der Streifenfundamente, die anschließende Betonierung sowie die Baustelleneinrichtung.

Bauprozess	Mögliche Beeinflussung des Bodens
Oberbodenabtrag	Verdichtung
Schalung der Streifenfundamente	Verunreinigung mit Schalöl
Betonierung	Verunreinigung mit Beton
Baustelleneinrichtung	Verunreinigung mit Sägestaub, Bauchemikalien, Mörtel

Tabelle 18: Prozessanalyse Baustelle L

5.4.3 Messnetz

In Abbildung 63 ist das Messnetz der Baustelle L dargestellt. Die Beprobung erfolgte zu drei Zeitpunkten inklusive der Referenzflächen. Für die insgesamt vier gebäudenahen Flächen konnten nur zur ersten Probenahme Oberbodenproben gewonnen werden. Es war erforderlich, die Proben 28 und 41 sowie 31, 32, 44, 45 versetzt zu nehmen, da am ursprünglichen Beprobungsort Material gelagert wurde.

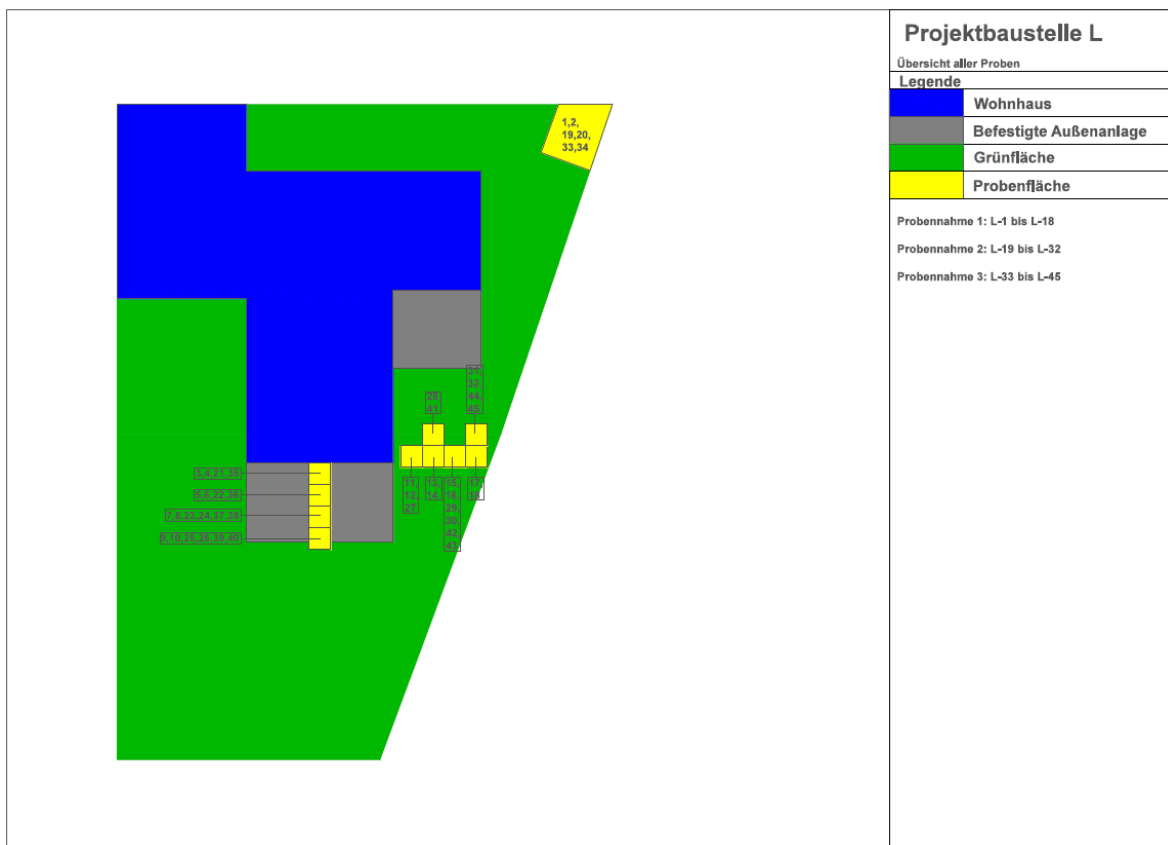


Abbildung 63: Messnetz Baustelle L

5.4.4 Ergebnisse der Bodenanalyse

In Tabelle 19 ist die Horizontierung des Bodens der Baustelle L dargestellt.


Beschreibung	Typische Horizontierung	Variationen der Mächtigkeiten
Ah 0-35 cm humoser Oberbodenhorizont mit variierender Mächtigkeit des humosen Oberbodens, untere Horizontgrenze zeigt eine beginnende Podsolierung (hellgraue Färbung).		
36-53 cm semiterestischer Unterbodenhorizont mit Grundwassereinfluss, Rostflecken in variierender Intensität, teilweise harte, stückige, walnussgroße Rostkonkretionen (Brauneisen bis Raseneisensteinkonkretionen)		
54-74 cm Unterbodenhorizont ohne Rostfleckung oder Konkretionen. Gr (semiterestischer Horizont mit Grundwassereinfluss, reduziert)		
75-100+ cm feinkörniger Horizont mit blassgrauer Farbe IIGr (Schichtwechsel (Ton aus Bachablagerung), semiterestischer Horizont mit Grundwassereinfluss, reduziert)		

Tabelle 19: Bodenhorizonte Baustelle L [Fotos: B. Marx]

Die oberen drei Horizonte werden durch grobsandigen Mittelsand dominiert. In etwa 70-80 cm schließt sich ein tondominierter Mineralbodenhorizont an. Die Horizontmächtigkeiten variieren ebenso wie die Ausprägung der charakteristischen Merkmale. Die linke Abbildung in Tabelle 19 zeigt die für diesen Standort typische Merkmalsausbildung. Das Grundwasser wurde bei der Beprobung bis 100 cm nicht angetroffen. Gemäß BK50 steht Grundwasser in der Region bei 8-13 dm an. Der Boden wird auf Grund der phänotypischen Merkmale als Brauneisengley aus grobsandigem Mittelsand angesprochen. Laut BK50 sind dies Sande aus Terrassenablagerungen über Ton aus Bachablagerungen.

In Tabelle 20 sind die untersuchten Prozesse der Baustelle L mit den zugehörigen Aspekten aufgeführt.

Untersuchter Prozess	Aspekte
Entfernung der Krautschicht, Oberbodenabtrag und Befahrung mit Raupenbagger, seitliche Lagerung auf Bodenmiete, Einmessung	Oberboden, Unterboden
Schalung für Streifenfundamente, Auffüllung mit Beton, Befahrung mit Bagger, Fundamenterstellung (Betonkübel per Kran), Mauern mit Kalksandstein	Oberboden gebäudefern, Unterboden gebäudenah, Unterboden gebäudefern
Materiallagerung (Kalksandstein), mobile Toilette, Sägearbeiten Holz	Oberboden, Unterboden

Tabelle 20: Untersuchte Prozesse und Aspekte Baustelle L

Bodenchemische Parameter

In Abbildung 64 sind die Ergebnisse der Laboranalytik für sämtliche Proben des Oberbodens der Baustelle L nach Probenahmezeitpunkt (PN1-PN3) dargestellt. Der Fehler ist als Standardabweichung (Stabw. N) angegeben.

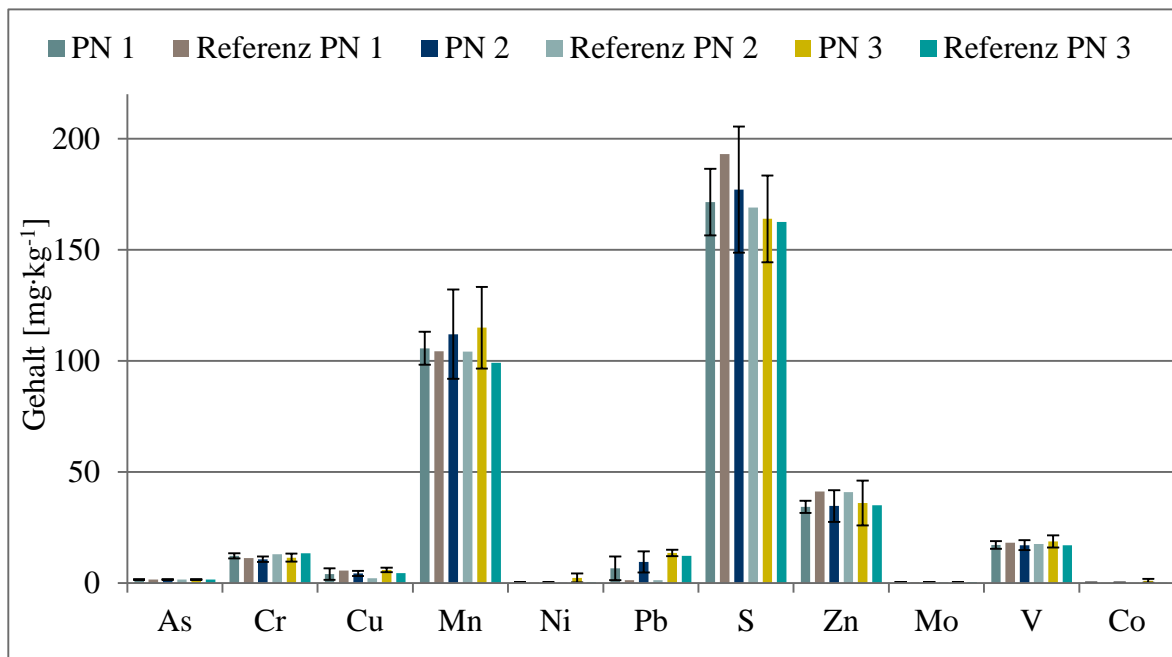


Abbildung 64: Elementgehalte im Oberboden Baustelle L

Die Werte im Oberboden unterscheiden sich zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten nur minimal. Es gibt keine Veränderungen, die die Heterogenität der Fläche an sich übersteigen. Erkennbar ist dies daran, dass Veränderungen zwischen Messzeitpunkt PN1, PN2 und PN3 zumeist geringer sind als die Änderungen im Bereich der Referenzfläche (vgl. Abbildung 64). Die Fläche insgesamt ist homogen

und das Wertenniveau an sich ist gering. Es kann kein Trend bei den Ergebnissen bezüglich einer Zu- oder Abnahme festgestellt werden.

In Abbildung 65 sind die Ergebnisse der Laboranalytik für sämtliche Proben des Unterbodens der Baustelle L nach Probenahmezeitpunkt (PN1-PN3) dargestellt. Der Fehler ist als Standardabweichung (Stabw. N) angegeben.

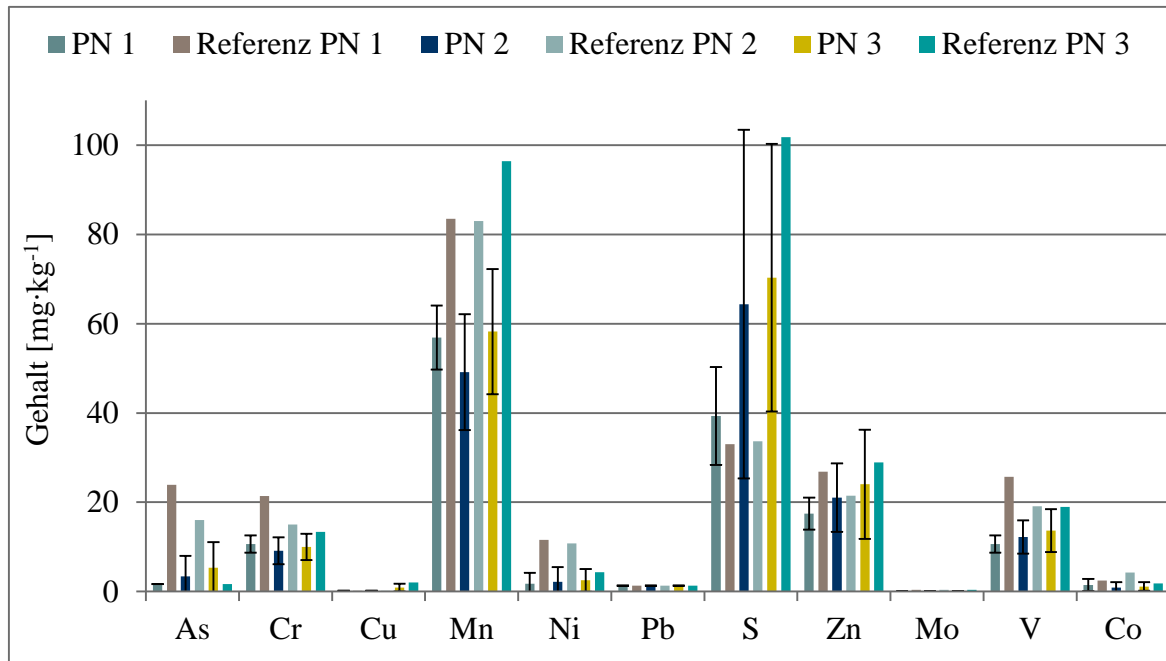


Abbildung 65: Elementgehalte im Unterboden Baustelle L

Die Werte im Unterboden unterscheiden sich zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten nur im Bereich der Standardabweichung. Das Wertenniveau ist nochmals geringer als im Oberboden. Es kann kein Trend bei den Ergebnissen bezüglich einer Zu- oder Abnahme festgestellt werden.

Wie für die hier gezeigten Ergebnisse ergaben auch die Untersuchungen einzelner Prozesse (vgl. Abbildung 66) keine eindeutigen Veränderungen, weshalb auf weitere Darstellungen verzichtet wurde. Die Angabe von Standardfehlern ist wegen geringer Wiederholungen (n) nicht sinnvoll.

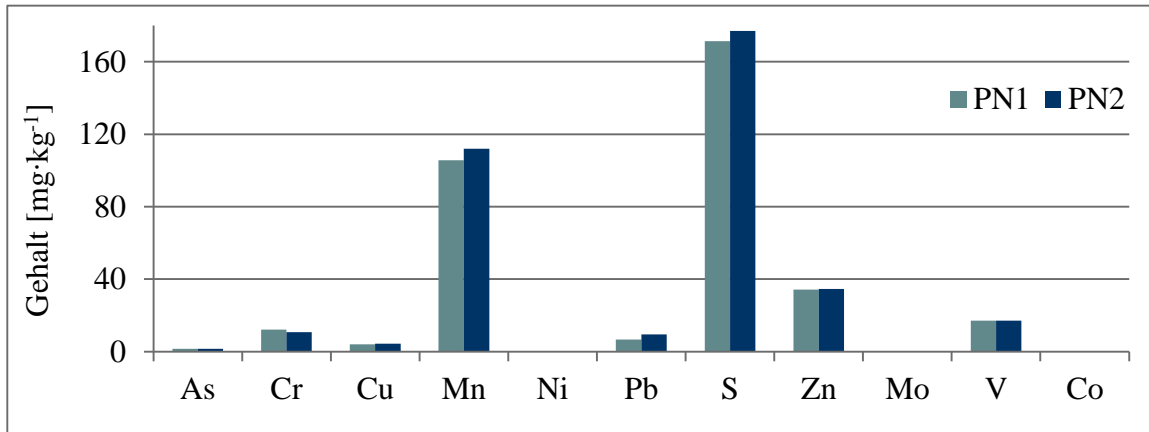


Abbildung 66: Elementgehalte Prozess Erdarbeiten und Einmessung im Oberboden Baustelle L

In Abbildung 67 sind die Gesamtkohlenstoffgehalte aller untersuchten Proben für die Baustelle L dargestellt. Zwischen den PN1, PN2 und PN3 gibt es keine Unterschiede. Dieses Ergebnis gilt gleichermaßen für Ober- und Unterboden. In Abbildung 68 sind die pH-Werte aller untersuchten Proben für die Baustelle L dargestellt. Zwischen den PN1, PN2 und PN3 gibt es keine Unterschiede. Dieses Ergebnis gilt gleichermaßen für Ober- und Unterboden.

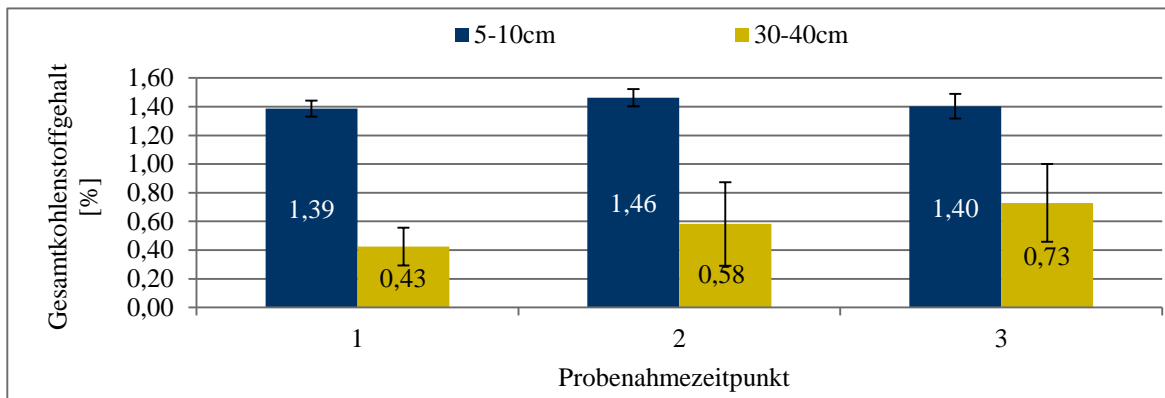


Abbildung 67: Gesamtkohlenstoff Baustelle L

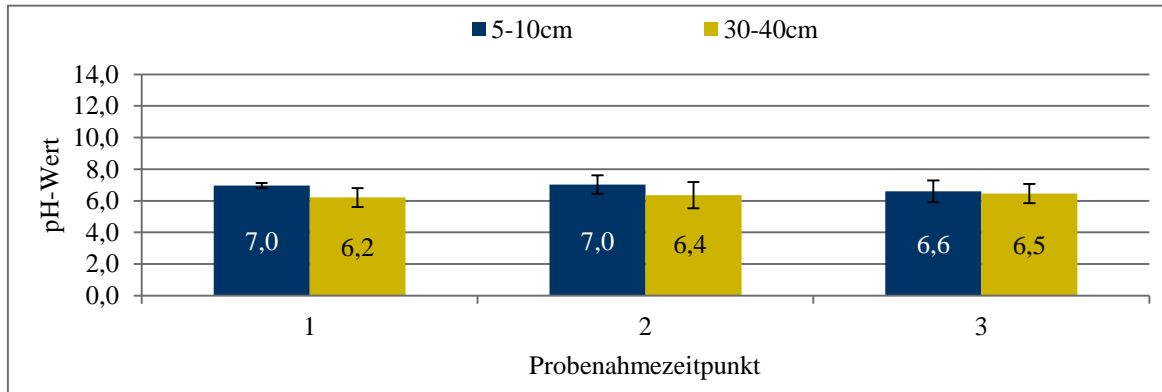


Abbildung 68: pH-Wert Baustelle L

In Abbildung 69 sind die Leitfähigkeitswerte aller untersuchten Proben für die Baustelle L dargestellt. Zwischen den PN1, PN2 und PN3 gibt es keine Unterschiede. Dieses Ergebnis gilt gleichermaßen für Ober- und Unterboden.

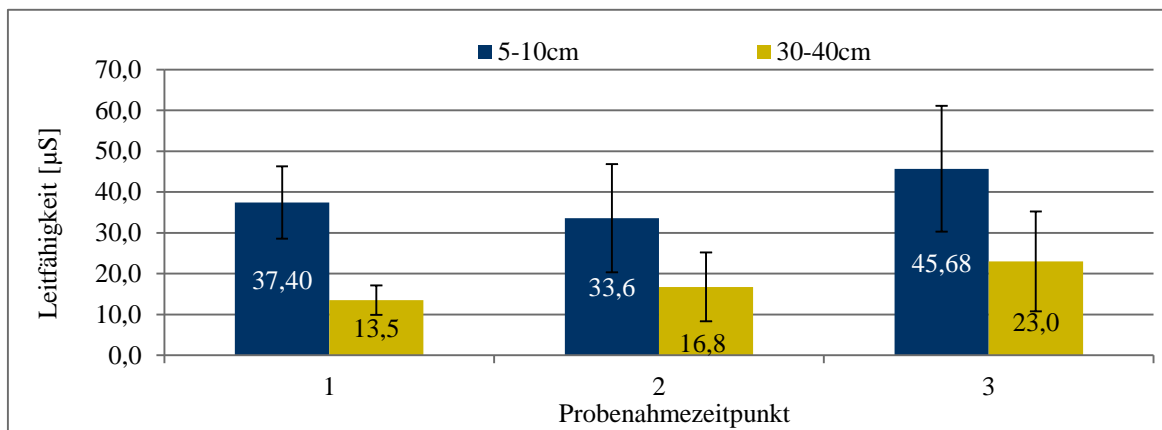


Abbildung 69: Leitfähigkeit Baustelle L

Die Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse der Analyse auf organische Schadstoffe. Es ist erkennbar, dass die zur PN1 gemessenen MKW-Gehalte im Untersuchungsbereich nicht wiedergefunden wurden. Für den Referenzbereich liegen für diesen Zeitpunkt keine Messwerte vor. Bezüglich der sonstigen Parameter gibt es keine auffälligen Veränderungen, die über die geringen Unterschiede der Fläche hinausreichen.

Probe	PAK Σ [mg·kg ⁻¹]	MKW c10-c40 [mg·kg ⁻¹]
Oberboden		
Mittelwert PN1	0,281 ± 0,02	95,63 ± 6,24
Mittelwert PN2	n.d.	n.d.
Mittelwert PN3	-	-
Referenz PN1	0,433	n.d.
Referenz PN2	-	-
Referenz PN3	-	-
Unterboden		
Mittelwert PN1	0,43 ± 0,13	6,22 ± 0,60
Mittelwert PN2	0,58 ± 0,29	6,36 ± 0,83
Mittelwert PN3	0,73 ± 0,27	6,45 ± 0,61
Referenz PN1	0,30	7,16
Referenz PN2	0,33	7,64
Referenz PN3	1,01	7,33

Tabelle 21: Chemische Eigenschaften im Oberboden Baustelle L

Bodenphysikalische Parameter

In Abbildung 70 ist die Dichte des Bodens vor (PN1) und nach (PN2) dem Entfernen der Krautschicht dargestellt. Die Werte der Probenahme­flächen 7 und 8 weisen nach dem Oberbodenabtrag eine höhere Dichte auf. Bei Fläche 7 steigt die Dichte von 1,63 um 0,08 auf 1,71g/cm³. Bei Fläche 8 beträgt die Zunahme 0,12g/cm³, sodass nachher eine Dichte von 1,69g/cm³ ermittelt wurde. Fläche 4 und die Referenzfläche zeigen keinen Unterschied, welcher größer als die Standardabweichung, unter Berücksichtigung der Probenanzahl, ist.

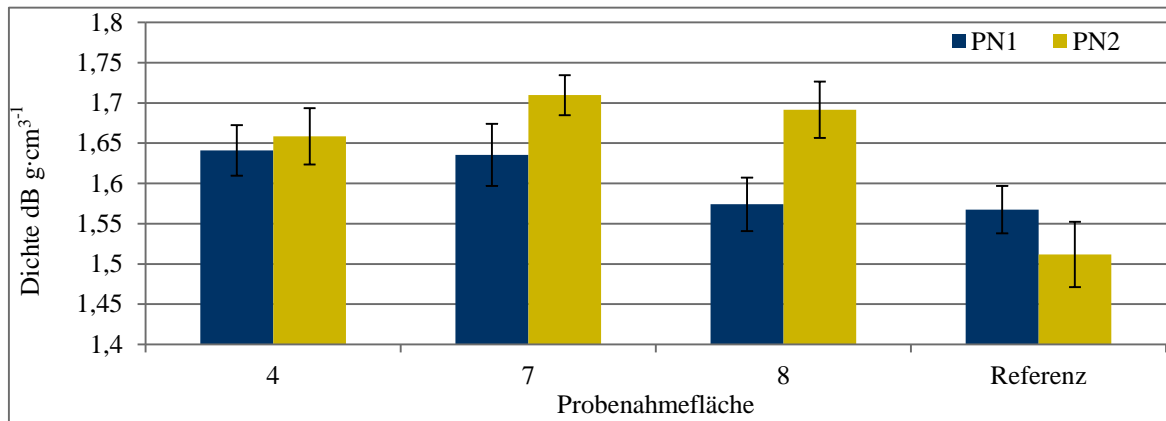


Abbildung 70: Dichte des Oberboden PN1 im Vergleich zu PN2 Baustelle L

6 Diskussion und Bewertung

Bearbeitet von A. Randel, B. Marx und J. Rinklebe

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, unterliegt die Bauwirtschaft im Gegensatz zu allen anderen Branchen ganz besonderen Bedingungen bei der Produktion. Sie ist durch eine instationäre Produktion gekennzeichnet, jedes neue Bauprojekt bringt neue örtliche Gegebenheiten mit sich, die die am Bau Beteiligten bewältigen müssen. Aufgrund der wechselnden Arbeitsstätten muss sowohl die Logistik, als auch die Baustelleneinrichtung stets neu geplant werden. Die Bauproduktion ist mindestens in der Rohbauphase intensiv den Witterungsbedingungen unterworfen, was bei der Terminplanung meist nicht berücksichtigt wird. Nicht nur die Arbeitsstätten, sondern auch die Arbeitsabläufe ändern sich von Bauprojekt zu Bauprojekt. Sich ändernde Anforderungen des Bauherrn erfordern meist auch Änderungen des Bauablaufs. Des Weiteren erfolgt die Herstellung von Bauwerken sowohl mit einem Wechsel der handelnden Personen von einer Phase zur nächsten, als auch mit von Baustelle zu Baustelle wechselnden Teams. Der Informationsfluss ist somit negativ beeinflusst. ([HO12], S. 21-27)

Im Rahmen des Projektes konnten vier Projektbaustellen untersucht werden, darunter zwei Großbaustellen und zwei kleinere Baustellen. Vergleichbar von der Größenordnung und vom Bauobjekt her sind Baustelle R und E sowie Baustelle G und L. Andere potenzielle Projektbaustellen erwiesen sich als ungeeignet für das Vorhaben, weil Flächen, auf denen eine Betrachtung relevanter Parameter vor und nach der Baumaßnahme hätte durchgeführt werden können, schlichtweg nicht vorhanden waren. Zu den wichtigsten Kriterien hinsichtlich der Baustellenauswahl gehörte das Vorhandensein von Außen- und Grünflächen im Anschluss an die Bauphase. Ebenso wichtig war es, dass mit den Baumaßnahmen (i. d. R. Erdbaumaßnahmen) noch nicht begonnen wurde, um den Ist-Zustand des Bodens korrekt abbilden zu können.

Zur Identifizierung der Hot Spots war sowohl die zeitliche, als auch die örtliche Dimension entscheidend. Diese ließen sich grob durch Terminpläne und Baustelleneinrichtungspläne ermitteln oder mussten tagesaktuell beim Bauleiter oder Polier in Erfahrung gebracht werden. Mit Hilfe des Baustelleneinrichtungsplans ließen sich die Prozesse Baustraße, Bitumenabdichtung, Putz und evtl. Silos und Abfallsammlung lokalisieren. Nicht abgebildet waren i. d. R. die Bodenmiete, Arbeitsbereiche für Säge- und Trennarbeiten sowie Bereiche für die mobile Betankung. Diese mussten bei Baustellenbegehungen vor Ort ermittelt werden. Für die kleineren Baumaßnahmen G und L wurden keine Baustelleneinrichtungspläne angefertigt, auf die zurückgegriffen werden konnte. Hier erfolgte die Ermittlung von Hot Spots spontan bei Baustellenbegehungen.

Die für die Untersuchung relevanten Bauprozesse haben sich sowohl räumlich, als auch zeitlich überschritten. Der folgende Ausschnitt aus einem Grobterminplan macht dies deutlich (Abbildung 71). Die Rohbauarbeiten überschneiden sich mit den Fassadenarbeiten, die wiederum zeitgleich mit den

Ausbauarbeiten stattfinden. Die Arbeiten an den Außen- und Grünanlagen beginnen meist schon während der Ausbauphase. Diese Gegebenheiten auf der Baustelle erschweren eine eindeutige Zuordnung einer Bodenprobe zu einem konkreten Bauprozess und erfordern eine präzise, aber zeitintensive Analyse vor Ort.

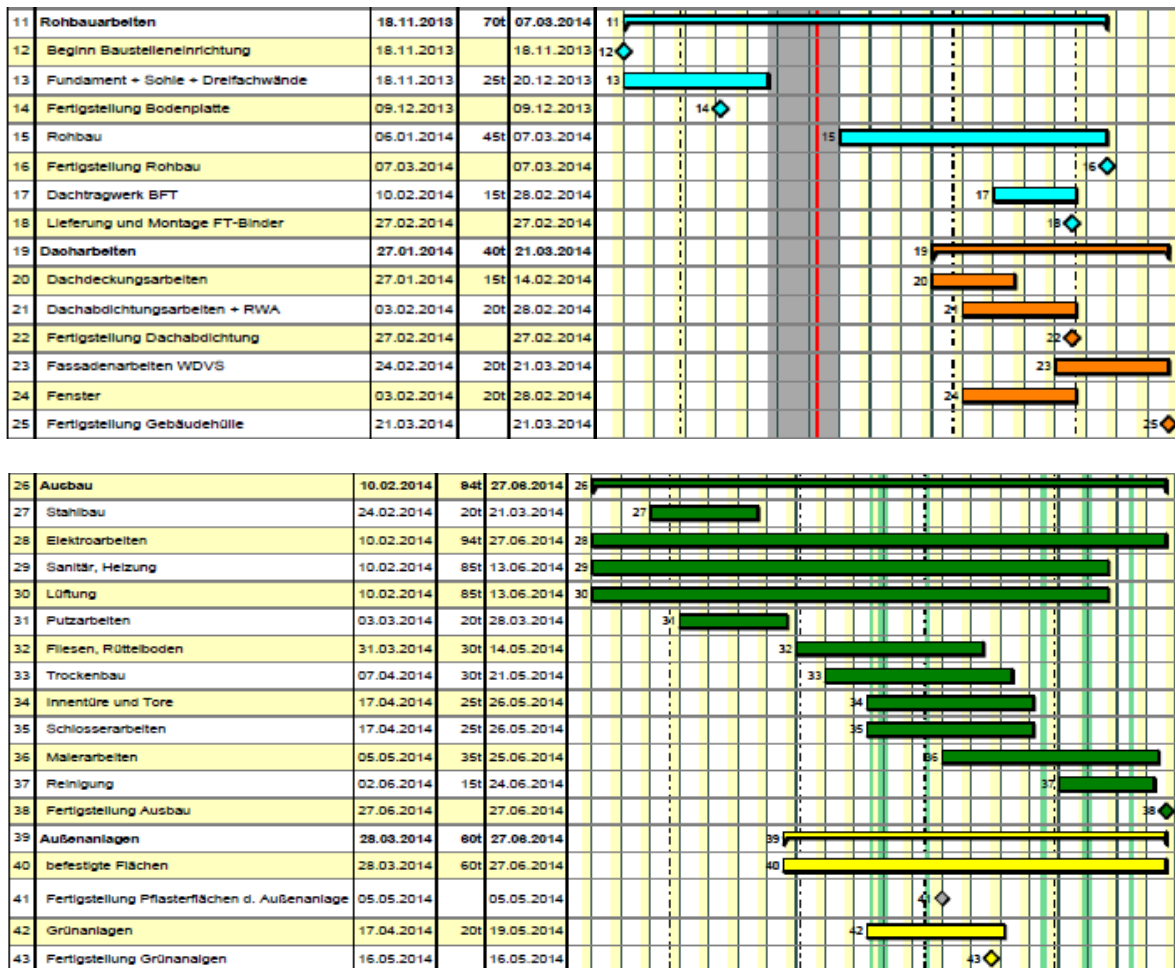


Abbildung 71: Überschneidung von Bauprozessen im Terminplan¹

Nachfolgend werden alle untersuchten Prozesse der jeweiligen Baustellen (R, G, E, L) dargestellt, um relevante Prozesse identifizieren zu können.

¹ Ausschnitt aus dem Grobterminplan der Baustelle E

Bauphase	Untersuchte Prozesse	Baustelle			
		R	G	E	L
Erdarbeiten	Oberbodenabtrag	X		X	X
	Befahrung	X		X	X
	Bodenlagerung auf Bodenmiete	X		X	
	Felsabtrag	X			
	Bodenverdichtung	X		X	X
Baustelleneinrichtung	Materiallagerung	X	X	X	X
	Säge- und Trennarbeiten	X	X	X	
	Baustoffherstellung		X		
	Abfälle	X	X	X	X
	Silos	X		X	
	Baustraßen	X		X	
	Sozial- und Materialcontainer	X			
	Parkplätze	X			
	mobile Betankung	X			
Rohbau	Fundamentherstellung	X		X	X
	Mauerarbeiten	X			X
	Befahrung			X	X
	Abfälle	X		X	X
Fassadenarbeiten	Bitumenabdichtung	X	X	X	
	Dämmung	X	X	X	
	Putzauftrag			X	
	Drainage			X	
	Materiallagerung	X	X	X	
	Verfugung	X	X		
	Abfälle	X	X	X	
Außenanlagen	Oberbodenauftrag zur Bepflanzung	X		X	

X = signifikante Erhöhung chemischer Parameter

Tabelle 22: Gesamtübersicht der untersuchten Bauprozesse

Auffällig ist, dass viele Prozesse übertragbar zu sein scheinen, da sie sich auf mehreren Baustellen abspielen. Zu beachten ist hierbei, dass nicht auf allen Baustellen alle Prozesse untersucht werden konnten. Beim Abgleich mit den tatsächlich durchgeführten Laboranalysen kristallisieren sich als besonders relevant folgende Prozesse heraus:

Bauphase	Relevanter Prozess	Ursache
Erdarbeiten	Bodenlagerung auf Bodenmiete	Eintrag durch Befahrung und Abfälle
Baustellen- einrichtung	Säge- und Trennarbeiten	Bearbeitungsabfälle und Staubentwicklung
	Baustoffverwendung (Zement)	Tropfverluste
	Baustofflagerung in Silos	Tropfverluste
	Abfälle	Entsorgung von Baustellenabfällen
	Baustraßen	Eintrag durch Befahrung und Abfälle
	Sozial- und Materialcontainer	Abfälle und Tropfverluste
	Mobile Betankung	Tropfverluste
Rohbau	Befahrung	Eintrag durch Befahrung und Abfälle
Fassadenar- beiten	Bitumenabdichtung	Abfälle
	Putzauftrag	Abfälle

Tabelle 23: Relevante Prozesse und Ursachen

Die für den Boden relevanten Prozesse traten in allen Phasen der Bauwerkserstellung auf und wiederholten sich zum Teil auf den anderen Baustellen. Die Prozesse aus Tabelle 23 führten zu einer signifikanten Erhöhung chemischer Parameter (vornehmlich Schwermetalle). Dies ist vor allem auf Tropfverluste (Zement, Gips, Kraftstoffe, Schmierstoffe, Bitumen, Putz) und die mangelhafte Entsorgung von Baustellenabfällen (z. B. Dämmstoffe, Metallspäne und -stäube, Verpackungen, Baustoffe) zurückzuführen.

Beispielhaft sei hier auf eine Probe der Baustelle R (Probe R-21) hingewiesen. Die Probe wurde auf einer Baustelleneinrichtungsfläche gewonnen, auf der Trennarbeiten von Metall mit einem Trennschneider durchgeführt wurden.

Probe R-21	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]
Vorsorgewerte für Böden	30	20	-	15	40	-	60
Probe R-21	98,9	158,4	1087,7	60,9	20,7	745,1	106,3

Tabelle 24: Elementgehalte der Probe R-21

In Abbildung 72 ist der graue Trennstaub erkennbar.



Abbildung 72: Probenahmeort der Probe R-21 [Foto: B. Marx]

Allgemein zählen zu Metallarbeiten das Trennen, Entgraten, Glätten mit handgeführten Bearbeitungsgeräten. Dafür werden u. a. Sägen, Winkel-, Geradschleifer, Bandschleifer oder Powerfeilen eingesetzt. Dabei entstehen Späne und Staub aus metallischem Abrieb und dem Verschleiß des Schleifwerkzeugs [WSL08]. Die resultierenden Partikelgrößen und Massen der Stäube und Späne sind insbesondere vom Bearbeitungsverfahren abhängig. Welche Elemente die Einträge enthalten, ist dabei primär durch den bearbeiteten Werkstoff dominiert. Üblicherweise werden entstehende Stäube und Späne nicht gesondert erfasst oder entsorgt. Teilweise verbleiben auch verbrauchte Trennscheiben und Abschnitte von Baumaterialien in Arbeitsbereichen. Bei der hier untersuchten Probe stiegen vor allem die Messwerte von Chrom, Kupfer und Nickel an. Chrom, Nickel, Kupfer, Molybdän, Kobalt, Zink und Mangan kommen in unterschiedlichen Anteilen in Stählen beziehungsweise Legierungen zum Einsatz. Teilweise werden auch große Oberflächen aus Kupfer und Zinkblechen gefertigt. Verchromte Elemente werden ebenfalls verbaut, jedoch meist nicht auf Baustellen selbst bearbeitet.

Die beobachteten Veränderungen der Schwermetallgehalte sind durch Trennarbeiten von Metall verursacht worden und somit plausibel erklärbar.

Für den Prozess „Mobile Betankung“ ist eine deutliche Zunahme von Arsen, Chrom und Vanadium erkennbar. Die Messwerte für Kupfer, Nickel, Zink, Molybdän und Kobalt steigen in einem geringeren Maße an.



Abbildung 73: Prozess Mobile Betankung Baustelle R [Foto: B. Marx]

Die Erhöhung der genannten Elemente lässt sich durch einen Eintrag von Schmierstoffen erklären. In Mineralölen liegt der Anteil der Metalle (V, Ni, Cu, Na, Al und Fe) unter 1 Gew.-% [Möl04]. Schmierstoffe enthalten jedoch häufig Additive, um besondere Spezifikationen zu erfüllen. Additive enthalten teilweise Elemente in Konzentrationen, die einen Einfluss auf den Boden haben können. Hinzu kommt, dass trotz des Einsatzes von Schmierstoffen ein Abrieb an den geschmierten Teilen entsteht. Gelangen Schmierstoffe und Abrieb auf den Boden, kann es Veränderungen der Elementgehalte bedingen, die messtechnisch nachweisbar sind. Die Elemente Eisen, Chrom, Zinn, Aluminium, Nickel, Kupfer, Blei und Molybdän werden auch als Indikatoren genutzt, um die Abnutzung bei Maschinen im Schmierstoff zu bestimmen. Kalzium, Magnesium, Bor, Zink, Phosphor, Barium, Schwefel lassen Rückschlüsse auf die Additive zu [Hac15]. Erhöhte Werte von Cr, Cu, Ni, Mo und Vanadium ließen sich somit durch einen Eintrag von Schmierstoffen erklären. Die dominierende Kettenlänge der Mineralkohlenwasserstoffe lag bei C22-C40. Dies ist ein zusätzliches Indiz, dass es sich um Schmiermittel handelt und nicht um Treibstoffe. Für MKW gibt es gemäß Gesetz keinen Anforderungswert im BBodSchG für den Feststoffgehalt. Bei geringen Einträgen von wenigen Litern ist eine messbare Veränderung im Grundwasser eher unwahrscheinlich. Dennoch können Anforderungswerte zur Entsorgung herangezogen werden, um die Belastung zu bewerten. Hier bieten sich zum Beispiel die Werte nach LAGA M 20 an (Tabelle 25):

LAGA	Z0	Z1.1	Z1.2	Z2
MKW [mg/kg]	100	300	500	1000

Tabelle 25: Zuordnungswerte nach LAGA M 20 für MKW

Die untersuchte Probe für den Prozess „Mobile Betankung“ weist einen MKW-Wert von 3800 mg/kg auf. Sie ist nach LAGA M 20 somit als Abfall nach Klasse größer Z2 zu entsorgen. Die Einschätzung nach ALEX 02 sieht für die Nutzung bei einer Wohnbebauung einen Sanierungszielwert von 300 mg/kg vor.

Der Schwefelgehalt steigt in etwa bei einem Drittel der Proben an. Der Prozess „Baustellenabfälle/Bauschutt“ zeigt einen extremen Anstieg des Schwefelgehaltes von 0,49 g auf 22,7 g/kg. Auf Baustellen ist grundsätzlich mit Erhöhungen der Schwefelgehalte zu rechnen. In Tabelle 26 sind beispielhaft äquivalente Schwefeltrioxid- und Calciumoxidgehalte verschiedener Proben von Baustellen aufgeführt.

Baustellenprobe	SO ₃ [%] grav./wl.
Gips	38,80 / 14,3
Deckenoberseite	1,98 / 0,50
Gipsestrich trocken	22,80 / 16,00
Gipsestrich nass	
Porenbeton	1,30 / 0,06
Außenwand Keller	0,60 / 0,12
Bohrkern 1 Keller Treppenhaus	0,41 / 0,19
Bohrkern 2 Keller Treppenhaus	2,04 / 0,61
Porenbeton EG	43,90 / 13,97
Weißbeton Außenwand außen	0,89 / 0,13

Tabelle 26: Schwefeltrioxidgehalte verschiedener Baustellenproben [Sei12]

Ziel der Bodenanalysen in diesem Projekt war es, mögliche chemische und physikalische Veränderungen während der Bauphase zu erfassen. Für einen Vorher-Nachher-Vergleich sollten daher vor Baubeginn und nach Abschluss der Bauphase Proben gewonnen werden. Es war geplant, diese in 3 Tiefenstufen bis maximal einem Meter Tiefe zu nehmen. Die Probenahmen 2 und 3 sollten an sechs Hot Spots oberflächennah erfolgen, um so die Eintragspfade zu identifizieren. Zwei weitere Proben waren an Referenzpunkten ohne Einfluss durch den Bau geplant. Die vierte Probenahme sollte an den bereits zum Zeitpunkt 2 und 3 beprobten Hot Spots in drei Tiefen erfolgen.

Die Probenahme erfolgte aus verschiedenen Gründen nicht wie geplant. Insbesondere fehlten Informationen zur räumlichen und zeitlichen Abgrenzung einzelner Prozesse. Die Auswahl der Hot Spots erfolgte daher nach visuellen Aspekten im Freiland. Die Probenahmen 2 und 3 orientierten sich zudem an der zum Zeitpunkt der Probenahme aktuellen Oberfläche der Baustelle². Diese kann in ihrer Höhenlage in Bezug zum Ausgangszustand bzw. zu anderen Probenahmen jedoch variieren. Weiter werden durch die Betrachtung der aktuell anstehenden Oberfläche potenziell auch unterschiedliche Substrate miteinander verglichen. Folglich werden nicht zwangsweise Veränderungen eines Materials beschrieben, sondern mit dem Vorgehen auch Veränderungen erfasst, die auf dem Austausch der untersuchten Substrate beruhen.

Auf einigen Baustellen wurden Sonderproben gewonnen. Diese sind als Beprobung von Reinsubstrat zu verstehen und keine klassischen Bodenproben oder Boden-Abfallgemische. Diese Proben können mit den Vorher-Beprobungen verglichen werden, stellen aber keine Veränderungen des anstehenden Bodens dar, sondern müssen eigenständig bewertet werden.

Des Weiteren ist zu beachten, dass anstehender Oberboden im Rahmen der Erdbauarbeiten nahezu komplett abgetragen wird. Teilweise wird der abgetragene Boden auf Mieten nahe des Baugrundstücks gelagert. Prozesse der Bauphasen Baustelleneinrichtung, Rohbau und Außenanlagen wirkten somit auf die neu entstandene Oberfläche ein. Zwischengelagerter Oberboden wird i. d. R. erst gegen Ende der Bautätigkeit wieder aufgebracht. In der Roh- und Ausbauphase kann somit nur ein Vergleich der aktuellen Baustellenoberfläche mit dem Ausgangszustand erfolgen.

Im Verlauf der Projektdurchführung ist deutlich geworden, dass die Analyse von Bauprozessen erheblich aufwendiger ist, als zuvor angenommen. Die als relevant identifizierten Bauprozesse (Hot Spots) konnten hinsichtlich der flächenhaften Auswirkungen und der zeitlichen Abgrenzung nach Termin- und Baustelleneinrichtungsplänen nicht ausreichend erfasst werden. Dies lag auch daran, dass

² Vgl. Glossar

sich häufig kurzfristige Änderungen im entsprechenden Baustellenterminplan ergeben haben. Demzufolge konnten die gewonnenen Bodenproben oftmals einem Komplex von Bauprozessen/Bauphasen und weniger einem einzelnen Vorgang zugeordnet werden. Eine ausführlichere Prozess- und Stoffstromanalyse wäre faktisch nicht leistbar gewesen, so dass vermutlich nicht vier Projektbaustellen hätten untersucht werden können. Dann wäre auch eine baustellenübergreifende Analyse von relevanten Prozessen nicht umsetzbar gewesen. Dennoch konnten im Rahmen der Projektdurchführung Gesetzmäßigkeiten aus der Untersuchung der Bauprozesse abgeleitet werden, die wertvolle Hinweise zum Bodenschutz auf Baustellen liefern.

Charakteristisch für große Baustellen (vgl. Baustelle R und E) ist ein großflächiger Bodenabtrag, der mit immensen Bodenbewegungen einhergeht. Der Boden wird sowohl mit Baggern, als auch mit LKW in Form von Muldenkippern befahren, um das abgetragene Bodenmaterial abzutransportieren. Ebenso werden meist mehrere Bodenmieten am Rand der Baustellenfläche eingerichtet, auf denen der Oberboden bis zum Ende der Baumaßnahme lagert. Im Rahmen des Erdbaus werden Baustraßen angelegt, die verdichtet werden. Orte für Werkplätze, Lagerflächen, Sozialeinrichtungen und die Abfallentsorgung sind im Baustelleneinrichtungsplan festgelegt. Die Betankung von Baumaschinen findet mobil statt. Im Anschluss an die Baumaßnahme wird der gelagerte Oberboden wieder aufgetragen, mit Hilfe einer Steinsammelschaufel bearbeitet und anschließend geglättet.

Bei kleinen Baustellen (vgl. Baustelle G und L) wird ebenfalls zu Beginn der Oberboden abgetragen, allerdings mit kleinen Baumaschinen (im Fall der Baustelle L: Kompaktbagger mit 8,5 t Gesamtgewicht). Die Überfrequentierung ist gering, der Oberboden wird ebenfalls am Rande des Grundstücks bis zum Wiedereinbau gelagert. Es werden keine Baustraßen angelegt, der Boden wird im Rahmen der Erdbauarbeiten überall befahren. Für kleine Baumaßnahmen werden i. d. R. keine Baustelleneinrichtungspläne erstellt, Elemente der Baustelleneinrichtung werden je nach Gegebenheit vor Ort platziert. Eine Betankung von Baumaschinen findet nicht statt, da die maschinenintensiven Arbeiten meist in kurzer Zeit erledigt sind, so dass keine Betankung notwendig ist.

Die Prozesse von großen Baustellen unterscheiden sich in der Dimension, Dauer und Intensität von kleinen Baustellen. Die Prozesse der Bauphasen Erdbau, Baustelleneinrichtung, Rohbau, Ausbau und Außenanlagen unterscheiden sich untereinander hauptsächlich abhängig von den Bauverfahren (Mauerwerk oder Betonfertigteile).

Vergleicht man die Messergebnisse einzelner Parameter unterschiedlicher Baustellen, so lassen sich Zusammenhänge feststellen. In der nachfolgenden Tabelle sind einzelne Parameter für die als relevant identifizierten Prozesse Säge- und Trennarbeiten, Putzsilo und Baustellenabfälle jeweils für die Baustelle R und E aufgeführt.

Prozess/Ursache	Parameter	Baustelle R		Baustelle E	
		vorher [mg/kg]	nachher [mg/kg]	vorher [mg/kg]	nachher [mg/kg]
Säge- und Trennarbeiten	Cadmium	0,1	0,1	0,1-1,1	4,5
	Chrom	50,1	98,9	26,1-45,3	27,7
	Kupfer	26,3	158,4	6,1-13,4	10,0
	Mangan	883,3	1087,7	223,2-579,1	881,2
	Nickel	26,1	60,9	16,8-17,2	19,9
	Blei	37,1	20,7	1,3-48,4	95,2
	Schwefel	314,0	745,1	143,1-174,9	207,3
	Zink	118,9	106,3	64,0-162,2	687,6
	Molybdän	9,2	15,3	4,6-7,1	7,5
Putzsilo	pH-Wert	6,86	11,64	8,52	11,88-12,96
	Kupfer	26,3	30,6	6,4	8,3-11,2
	Schwefel	314,0	1584,2	142,3	1740-7358
	Zink	118,9	85,8	49,9	58,8-98,4
Baustellenabfälle	pH-Wert	7,57	9,52	6,5-8,08	9,11
	Kupfer	17,4	54,5	6,1-13,4	69,9
	Nickel	28,8	20,6	16,8-17,2	24,7
	Schwefel	43,8	22698,3	143,1-174,9	184,2
	Zink	39,7	474,8	64,0-162,2	114,1

Tabelle 27: Vergleich der Laborergebnisse für ausgewählte Prozesse

Für den Prozess Säge- und Trennarbeiten konnten Erhöhungen einzelner Schwermetalle festgestellt werden (v. a. Mangan, Kupfer, Schwefel, Zink), allerdings ergibt sich kein eindeutiges Bild. Erhöhte Messwerte von Schwermetallen sind auf die verwendeten Kreis- und Trennsägen auf der Baustelle sowie das bearbeitete Baumaterial zurückzuführen.

Im Bereich der Stellflächen für Putzsilos konnten auf Baustelle R und E pH-Wert-Erhöhungen des Bodens festgestellt werden. Dies ist auf Tropfverluste von Mörtel und Putz zurückzuführen. Dafür spricht auch die Erhöhung der Schwefelwerte.

In Arbeitsbereichen, in denen vermehrt Baustellenabfälle anfallen (vor allem im Bereich der Fassade), ist ebenfalls eine pH-Wert-Erhöhung des Bodens ermittelt worden, ebenso stiegen die Werte von Schwefel, Zink und Kupfer stark an.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass bei den betrachteten Bauprozessen gewisse Gesetzmäßigkeiten bestehen. Zu nennen ist eine pH-Wert-Erhöhung in Arbeitsbereichen, in denen Putz oder Mörtel aus Silos entnommen wird; auch können Schwermetalle in teilweise hohen Konzentrationen im Boden auftreten. Für die Identifizierung von grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten hätte jedoch ein Vielfaches an Baustellen untersucht werden müssen. Die zwei untersuchten Großbaustellen (R und E) sind zwar bauverfahrenstechnisch vergleichbar, hinsichtlich chemischer Bodenveränderungen gilt dies jedoch nicht zwingend.

7 Resümee und Fazit

Bearbeitet von J. Rinklebe, A. Randel und B. Marx

Der Boden ist ein bedeutendes Umweltmedium und zählt zusammen mit Wasser und Luft zu den wichtigsten Ressourcen unseres Naturhaushaltes. Aufgrund seiner begrenzten Verfügbarkeit und Gefährdung durch menschliche Tätigkeiten ergibt sich eine hohe Schutzbedürftigkeit. Dies ist insbesondere der Fall, da anthropogene Eingriffe in den Boden und die daraus resultierenden Veränderungen häufig langfristige Konsequenzen haben.

Vor Beginn des Projekts lagen bereits einige Erkenntnisse über die Wirkung von einzelnen Bauprodukten auf den Boden vor.³ Bekannt sind die Verdichtung von Böden durch das Befahren mit schwerem Gerät (LKW, Lader, Bagger etc.) sowie die Kontamination von Böden z. B. durch organische und/oder anorganische Schadstoffe. Potenzielle Auswirkungen von Bauprozessen und kompletten Baumaßnahmen auf die Bodeneigenschaften sind bisher wenig untersucht worden.

Besonders im Hinblick auf die stofflichen Einträge auf und in den Boden bestehen Defizite und Wissenslücken hinsichtlich der verursachenden Baumaßnahmen und -prozesse. Dies betrifft zum einen die Berücksichtigung der Problematik vor und während der Baumaßnahme, zum anderen die daraus resultierende Wirkung hinsichtlich eines nachhaltigen Boden- und Grundwasserschutzes.

Ziel des Forschungsprojektes war es, den Baustellenbetrieb einschließlich aller Bauphasen hinsichtlich des nachhaltigen Boden- und Gewässerschutzes zu analysieren, um gegebenenfalls Vorschläge zu dessen Optimierung zu unterbreiten. Dabei standen die Analyse baugelastischer Prozesse sowie deren Auswirkungen auf die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften im Vordergrund. Um die Auswirkungen von konkreten Bauprozessen auf den Boden zu erfassen, erfolgte eine Betrachtung relevanter Parameter vor, während und nach der Baumaßnahme. Die chemischen Parameter umfassten, neben gängigen Parametern (z. B. pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit), sowohl organische (PCB und PAK), als auch anorganische Schadstoffe (Schwermetalle und Arsen). Die physikalischen Parameter wurden erhoben, um beispielsweise Verdichtungen zu identifizieren. Beimengungen von Fremdmaterialien im Boden wurden makroskopisch abgeschätzt. Zusätzlich war eine Erhebung der Bodenart notwendig, um die chemischen Parameter hinsichtlich der bestehenden Gesetzgebung zu bewerten und das Material entsprechend der Bodenklassen nach DIN 18300 einzuordnen.

³ Vgl. Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, Deutsches Institut für Bautechnik DIBt.

Vor der Durchführung der Probenahmen wurden bauphasenspezifische Hot Spots sowie weitgehend unbeeinflusste Flächen auf den Projektbaustellen bestimmt. Die tatsächliche Probenahme erfolgte aufgrund fehlender Informationen zur räumlichen und zeitlichen Abgrenzung einzelner Prozesse nicht wie geplant, sondern nach visuellen Aspekten im Freiland. Die zur Verfügung gestellten Lagepläne und Blockzeitpläne reichten in ihrer Detailschärfe nicht aus, um eine mögliche Beeinflussung des Bodens durch den Baubetrieb im Vorhinein erfassen zu können. Die Analyseergebnisse beziehen sich somit auf die am Ort der Probenahme zeitlich und räumlich überlagernden Bauprozesse. Die Probenahmen 2 und 3 orientierten sich zudem an der zum Zeitpunkt der Probenahme aktuellen Oberfläche der Baustelle. Ein direkter Bezug zum vorher anstehendem Ober- oder Unterboden konnte in vielen Fällen nicht gewährleistet werden. Eine durchgängige Vorher-Nachher-Analyse des Baustellenbetriebs mit belastbaren Aussagen zur Bodenbeeinflussung konnte systemimmanent nicht realisiert werden. Dennoch konnten einzelne Baustellenprozesse als besonders relevant für den Boden identifiziert werden.

Bodenphysikalische Veränderungen sind vor allem in Form einer Verdichtung zu erwarten. Die Ergebnisse zeigen auch für vermeintlich schonende Verfahrensweisen Optimierungspotenziale. Eine Priorisierung von Teilflächen, auf denen eine Verdichtung tolerabel ist, könnte ein Lösungsansatz sein. Insbesondere Zufahrten und befestigte Wege für Instandsetzungsmaßnahmen sollten während der Baumaßnahme für Befahrungen genutzt werden. So lassen sich Bodenbereiche, die in der Nutzungsphase weiterhin Träger der natürlichen Bodenfunktionen (z. B. Regenwasserversickerung) sein sollen, gezielt schützen (sog. Tabuflächen). Dieser Schutz während der Bauphase bedarf allerdings einer effektiven Absperrung bzw. einen Verantwortlichen, der die Einhaltung des Befahrungsverbots von Tabuflächen kontrolliert. Andernfalls ist im Gebäudenahbereich und an Zu- und Ausfahrten mit einer Verdichtung durch Befahrung zu rechnen. **Eine Verdichtung ist speziell im Gebäudenahbereich durch die Befahrung während des Ausbaus relevant.** Von den auf Baustellen genutzten Fahrzeugen sind es jedoch primär größere LKW, die über Straßenbereifung verfügen und hohe Achslasten aufweisen. Dies können unter anderen Transport-LKW für Betonfertigteile oder Erdbaumaschinen sowie LKW zum Transport von Erdaushub oder Baustoffen sein, die aufgrund ihrer Reifendimensionen und Radlasten hohe Kontaktflächendrücke aufweisen, was entscheidend für die Verdichtung durch Befahrung ist.

Auf Baustellen kommt hinzu, dass der Oberboden häufig flächig abgetragen wird. Eindeutig ist, dass auf Flächen, auf denen bauliche Anlagen errichtet werden, das Entfernen des Oberbodens unabdingbar ist. Auch kann durch das Entfernen des Oberbodens dieser, wenn er sachgerecht gelagert wird, vor übermäßiger Befahrung geschützt werden. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die natürlich gebildete Struktur, insbesondere das Porensystem, gestört wird. Grundsätzlich sollten die Flächen des Oberbodenabtrages auf ein notwendiges Minimum beschränkt werden. Parallel hierzu können Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen für die übrigen Flächen ausgesprochen werden.

Nachteilige physikalische Veränderungen im Unterboden sind aufgrund der im Vergleich zum Oberboden geringeren biologischen Aktivität oft problematischer, dementsprechend sind längerfristige Verdichtungsprobleme eher zu erwarten. **Da der Unterboden empfindlicher hinsichtlich der Verdichtung ist, sollte der Oberbodenabtrag auch im Hinblick auf dieses Problemfeld kritisch hinterfragt werden.**

Bei vielen Baustellenprozessen wurden potenzielle stoffliche Einträge in den Boden während des Bauens identifiziert, die bodenchemische Veränderungen zur Folge haben können. Hierzu gehören alle Prozesse, bei denen es meist unbeabsichtigt zu Tropfverlusten, wie z. B. bei der Baustofflagerung in Silos, Bitumenabdichtung, Putzauftrag bei Fassadenarbeiten oder zu Bearbeitungsabfällen (Säge- und Trennarbeiten) kommt. Auch kommen bei den organischen Stoffen Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) als Quellen-Belastungen aus Betriebsstoffen und Schmiermitteln in Frage. Diese können durch Tropfverluste beim Tanken oder Wartungsarbeiten und durch schlecht gewartete Maschinen in den Boden gelangen. Parallel hierzu wird ein Großteil potenzieller Schadstoffe in Form von Abfällen, Spänen und Stäuben in den Boden eingetragen; dies betrifft gleichermaßen organische und anorganische Stoffe. Die Einträge erfolgen meist unbewusst und akkumulieren sich typischerweise in Vertiefungen, gebäudenah und auf Flächen der Baustelleneinrichtung (Magazine und Abfallentsorgung). Diese Bauprozesse sollten zukünftig im Fokus stehen, wenn es darum geht, den vorsorgenden Bodenschutz auf Baustellen voranzutreiben.

Ferner konnte festgestellt werden, dass die meisten stofflichen Einträge durch ordnungsgemäßes Handeln vermeidbar sind. Ob diese oft einfach zu ergreifenden Maßnahmen den Beschäftigten auf Baustellen nicht bekannt sind oder als unwichtig eingestuft werden, kann nur gemutmaßt werden. Nichtsdestotrotz kann ein teilweise massiver Einfluss auf Bodeneigenschaften angenommen werden.

Im Wesentlichen gibt es zwei Gründe, warum Einträge von Fremdstoffen in der (Fach-)Öffentlichkeit nicht wahrgenommen werden. Zum einen wird vor dem abschließenden Auftrag des Oberbodens die aktuelle Baustellenoberfläche oft nochmals abgetragen; dies erfolgt insbesondere dann, wenn eine Angleichung der Höhe erforderlich ist. Zum anderen werden Einträge unter dem Oberbodenauftrag häufig einfach begraben und sind somit für die Öffentlichkeit nicht mehr sichtbar; es handelt sich um eine „**verborgene Umweltproblematik**“. Die Einträge tauchen häufig erst Jahre oder Jahrzehnte später wieder auf, z. B. wenn Bäume gepflanzt werden oder nachträglich Drainagen installiert werden.

Die auftretenden Probleme wie Staunässe durch Verdichtung oder stoffliche Bodenbelastungen werden dann - aufgrund des oft langen zeitlichen Abstandes - häufig nicht mehr mit der Bauphase in Verbindung gebracht. Im Zweifel wird eher die Qualität der angepflanzten Bäume, der angewendeten Pflanztechnik oder der gelieferten Bodenqualität in Frage gestellt. Eine hohe Bauqualität zeichnet sich demzufolge nicht allein durch die verwendeten Materialien und die angewendete Technik aus. Im

Hinblick auf den Nutzungszyklus eines Grundstücks und dem dazugehörigen Gebäude sind nachteilige Veränderungen, die während der Bauphase entstehen können, als langfristig problematisch zu bewerten. **Daher sollte zukünftig die Nachhaltigkeit einer Baumaßnahme auch hinsichtlich der Bodenqualität bewertet werden.**

Im Laufe der Projektdurchführung wurde ebenfalls deutlich, dass der Boden aus Sicht der Bauwirtschaft vor allem die Nutzungsfunktion als Siedlungsfläche ermöglichen muss. Boden wird auf Baustellen entweder als Baustoff oder als tragender Baugrund genutzt, wozu eine Verdichtung, die die Standsicherheit gewährleistet, zwingend unerlässlich ist. Bauvorhaben werden oft unabhängig vom anstehenden Bodenmaterial umgesetzt. Der Bauprozess an sich erfolgt derzeit leider weitgehend unabhängig von den vorherrschenden Bodenverhältnissen, auch bei hoher Bodenfeuchte. Aus Sicht eines tragfähigen Bodenschutzes sollte zukünftig eine Anpassung an die aktuellen Witterungsbedingungen, insbesondere den Wassergehalt des Bodens, stattfinden, damit der Boden nach Beendigung der Bauaktivitäten die natürliche Funktion als Pflanzenstandort übernehmen kann.

Eine nachhaltige Nutzung und der schonende Umgang mit Boden auf Baustellen müsste im Interesse des jeweiligen Bauherrn sein und kontinuierlich überprüft werden. Die Verursacherstruktur in der Bauwirtschaft ist jedoch komplex, da über einen längeren Zeitraum mehrere Akteure an unterschiedlichen Prozessen beteiligt sind. Für den vorsorgenden Bodenschutz auf Baustellen sind Schutzmaßnahmen während des Baustellenbetriebs erforderlich. Das notwendige Bewusstsein, Wissen und die Sachkenntnis hierfür ist beim Baustellenpersonal allerdings nur selten vorhanden. **Daher wird ein großer Handlungsbedarf in der sachgerechten Aus- und Weiterbildung sowie im Studium gesehen, um den praktischen Bodenschutz auf Baustellen zukünftig besser in die Planung, das Baumanagement und die praktischen Bauabläufe zu integrieren.**

Zukünftiges Ziel im Sinne eines praktikablen Bodenschutzes muss es sein, Umweltaspekte bereits in der Arbeitsvorbereitung zu berücksichtigen, denn bereits zu diesem frühen Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung können entsprechende Maßnahmen ihre volle Wirkung entfalten. Die Beeinflussbarkeit ökologischer Aspekte nimmt mit dem Baufortschritt erheblich ab. Es besteht die Gefahr, dass auf wechselnde Randbedingungen nur noch reagiert wird, anstatt diese bereits im Vorfeld zu erkennen und angepasste Schutzmaßnahmen einzuleiten. Wichtigster Bestandteil in diesem Zusammenhang ist die Baustelleneinrichtungsplanung, da hier die Gegebenheiten der Fertigungsstätte „Baustelle“ im Voraus festgelegt werden können. Aus diesem Grund sollte der Baustelleneinrichtungsplanung, sowohl bei kleinen Baumaßnahmen (z. B. Einfamilienhausbau), als auch bei Großbaustellen mehr Beachtung geschenkt werden.

Die Vorgaben des Bodenschutzrechts sind sehr allgemein formuliert und erfordern aus juristischer Sicht derzeit keine bodenkundliche Baubegleitung. Freiwillige Maßnahmen seitens der Bauunternehmen, d. h. eine mögliche Übertragung der Aufgaben auf das Baustellenpersonal (z. B. Bauleiter oder

Polier), scheitern oft an fehlenden pedologischen Fachkenntnissen. Die Integration eines weiteren Aufgabenfeldes (Bodenmanagement) in das Aufgabenspektrum der Baustellenführungskräfte erscheint aufgrund der vielfältigen Anforderungen, raschen Tätigkeitswechsel, hohen Verantwortung und des starken Termindrucks als nicht einfach umsetzbar. **Hierfür müssten die politischen Rahmenbedingungen angepasst und deutschlandweit einheitlich gestaltet werden, um keine Wettbewerbsverzerrungen zu verursachen.**

Zukünftig ergeben sich möglicherweise durch die Novellierung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung neue Anforderungen. Im 3. Arbeitsentwurf der BBodSchV in § 4 Absatz 6 Mantelverordnung sieht die Novellierung aktuell die Möglichkeit vor, dass bei erheblicher Betroffenheit des Bodens bei einer Baumaßnahme vom Pflichtigen die Beauftragung einer Bodenkundlichen Baubegleitung (BBB) verlangt werden kann. Parallel hierzu wird an der entsprechenden DIN 19639 "Baubegleitender Bodenschutz" gearbeitet. Diese Instrumente können, wenn sie kombiniert angewendet werden, sowohl für den vorsorgenden Bodenschutz hinsichtlich des Schutzniveaus, als auch gleichzeitig für die mit dem Bau Beauftragten hinsichtlich der Vertragssicherheit einen Gewinn bedeuten.

Quellenverzeichnis

- [ABD15] ANDRES, C., BAUER, T., DIEBEL, J., FAUTH, C., LORENZ, M., SCHELHORN, C., WINNINGHOFF, S.: *Das Baustellenhandbuch für den Garten- und Landschaftsbau*. Forum Verlag, Mering, 2015
- [AdH05] AD-HOC-AG BODEN: *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Schweizerbart'scher Verlag, Hannover, 2005
- [BauGB60] BAUGESETZBUCH. *Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414)*, 1960
- [BBodSchG98] BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ: *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17.3.1998*. BGBl. I, S. 502-510, 1998
- [BHT11] BLUME, H.-P., HORN, R. und THIELE-BRUHN, S.: *Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und -belastung – Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen*. 4., vollständig überarbeitete Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2011
- [Bis06] BISANI, K: *Terminplanung – Skript zur Vorlesung*. Fachhochschule München – Fachbereich 02 Bauingenieurwesen, München, 2006
- [BKS08] BERNER, F., KOCHENDÖRFER, B. und SCHACH, R.: *Grundlagen der Baubetriebslehre 2: Baubetriebsplanung*. 1. Auflage – B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008
- [Dan14] DANKOWSKI, K.: *Messtechnische Erfassung ungewollter physikalischer Bodenveränderungen durch typische Bauprozesse anhand von zwei Modellbaustellen*. Bachelorarbeit am Lehrstuhl Boden- und Grundwassermanagement der Bergischen Universität Wuppertal, 2014
- [Gar09] GARSTKA, B.: *Skript zur Vorlesungsreihe Bauproduktionsmittel*. Sommersemester 2009 Teil 3, Bergische Universität Wuppertal
- [Gir14] GIRMSCHIED, G.: *Bauproduktionsprozesse des Tief- und Hochbaus*. Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement – ETH Zürich, 6. Auflage, Zürich, 2014

- [GMS00] GREINER, P., MAYER, P. und STARK, K.: *Baubetriebslehre – Projektmanagement*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2000
- [Gra11] GRALLA, M.: *Baubetriebslehre Bauprozessmanagement*. 1. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2011
- [Hac15] HACKLÄNDER, A.: *Limitwerte für Verschleißmetalle*, URL: <https://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/uebersichten-und-tabellen/limitwerte/limitwerte-fuer-verschleissmetalle.html>, Stand: 12.08.15
- [HDB13] HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE E.V.: *Bauwirtschaft im Zahlenbild*. Ausgabe 2013, Berlin
- [HK11] HOFFMANN, M. und KRAUSE, T. (Hrsg.): *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. Teubner Verlag, 8. Auflage, 2011
- [HNR11] HELMUS, M., NISANCIOGLU, S. und RANDEL, A.: *Entwicklung von Energiekonzepten zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes auf Baustellen*, DBU-Abschlussbericht, AZ: 25780-24
- [HO12] HELMUS, M. und OFFERGELD, B.: *Qualität des Bauens – Eine Studie über den Begriff und die Wahrnehmung von Bauqualität bei privaten und öffentlichen Bauherren und Bauunternehmen*. Initiative Neue Qualität der Arbeit, Bericht 44, Berlin, 2012
- [Kön08] KÖNIG, H.: *Maschinen im Baubetrieb – Grundlagen und Anwendungen*. 2. erw. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [Möl04] MÖLLER, U.: *Altölentsorgung durch Verwertung und Beseitigung*. Kontakt & Studium, Band 253, Expert Verlag, Renningen
- [Pro08] PROPOROWITZ, A.: *Baubetrieb – Bauverfahren*. Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [SB08] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen*. Wiesbaden, 2008

- [Sei12] SEIFERT, G.: *Methoden zur Sulfatanalyse für den selektiven Rückbau von Plattenbauten*, Präsentation im Rahmen des 2. Wissenschaftskongress der DGAW am 29.03.2012 in Rostock, URL: <http://www.dgaw.de/files/uploaded/Seifert.pdf>, Stand: 12.08.2015
- [SO11] SCHACH, R. und OTTO, J.: *Baustelleneinrichtung Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln. 2.*, überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [SSB10] SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., WILKE, B.-M.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage, Spektrum Verlag, Heidelberg, 2010
- [Wit09] WITT, K.: *Grundbau – Taschenbuch – Teil 2: Geotechnische Verfahren*. Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2009
- [WSL08] WEHDE, J., SIEWERT, E., LAUTERWALD, H., TIGLER, A., MOELLER, K.: *Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis - Schutz der Beschäftigten vor Stäuben und Aerosolen an Gießereiarbeitsplätzen*. Hessisches Sozialministerium (Hrsg.), Wiesbaden, 2008, URL: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Arbeiten-mit-Gefahrstoffen/pdf/Giesserei.pdf;jsessionid=04DB41AE7729CCBA681637596948B931.1_cid353?__blob=publicationFile&v=3
- [ZDKB13] ZILCH, K., DIEDERICHS, C. J., KATZENBACH, R. und BECKMANN, K. J.: *Bauwirtschaft und Baubetrieb*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013

Anhang 1: Chemie

Proben-Nr.	Farbe	Textur	Gesamt- kohlenstoff- gehalt [%]	Scheibler C [%]	Scheibler Carbonat [%]	pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Baustelle R												
R-1	7,5 YR 4/4	U14	1,06	0,00	0,04	5,11	39,4	32144,5	37,3	0,1	49,2	5,3
R-2	7,5 YR 4/4	U13	1,37	0,00	0,02	5,12	51,4	28389,1	34,1	0,1	39,9	5,4
R-3	10 YR 4/4	U13	2,57	1,00	8,31	7,53	824	15490,3	19,0	0,1	22,8	11,7
R-4	10 YR 3/4	U14	2,42	0,00	0,00	5,16	62	24319,8	32,6	0,1	36,7	10,6
R-5	2,5Y 4/3	U13	1,99	0,08	0,66	6,86	149,4	39328,5	50,9	0,1	50,1	26,3
R-6	10 YR 6/6	LS2	0,73	0,24	1,98	7,23	105,6	17101,6	19,7	0,1	20,3	7,0
R-7	2,5Y 5/6	U1s	0,46	0,30	2,46	7,57	108,8	52699,6	57,2	0,1	55,1	17,4
R-8	10 YR 3/3	U14	2,13	0,03	0,22	6,67	148,5	15673,0	18,5	0,1	22,6	9,0
R-9	10 YR 4/4	U12	9,4	3,21	26,71	7,28	78,1	6857,1	1,7	0,1	8,7	2,8
R-10	7,5 YR 3/2	U14	1,13	0,61	5,05	7,5	69,7	12664,9	1,7	0,1	28,6	8,6
R-11	10 YR 4/	Su4	9,76	1,92	15,99	7,56	74,8	4191,5	1,7	0,1	5,5	0,2
R-12	10 YR 4/3	U14	2,82	1,30	10,84	7,44	226	18240,9	22,4	0,1	30,8	11,3
R-13	2,5 Y 5/4	Su4	2,03	1,53	12,72	10,45	407	17638,8	21,2	0,1	20,9	12,8
R-14	10 YR 8/4	-	1,39	1,29	10,73	9,73	357	8788,2	14,4	0,1	11,6	70,0
R-15	10 YR 5/4	Ss	1,83	0,96	7,98	8,74	114	8042,8	1,7	0,1	12,0	8,2
R-16	10 YR 5/4	Tt	6,56	6,49	54,06	8,1	96,8	14940,3	18,9	0,1	15,3	6,6
R-17	2,5 Y 5/6	Su3	1,35	0,81	6,77	9,45	312	6656,0	1,7	0,1	12,2	6,2
R-18	2,5 Y 8/2	U14	0,59	0,37	3,10	9,32	131,4	2011,1	1,7	0,1	5,5	28,9
R-19	2,5Y 4/6	Su2	7,74	6,14	51,17	7,69	70,1	15393,0	18,9	0,1	17,5	8,7
R-20	10 YR 3/2	Ss	1,35	0,88	7,33	8,57	86,6	31061,1	38,5	0,1	45,8	22,6
R-21	10 YR 3/3	-	3,12	0,34	2,86	7,76	109,9	22114,1	44,8	0,1	98,9	158,4
R-22	10 YR 5/3	-	5,88	3,39	28,23	7,81	62,8	3972,0	1,7	0,1	7,3	2,7
R-23	10 YR 4/4	Ss	9,11	8,70	72,46	7,83	63,5	3253,4	1,7	0,1	4,1	0,2
R-24	10Yr 5/4/4	Tu2	2,34	0,79	6,54	7,32	256	43357,2	53,1	0,1	58,8	19,8
R-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-26	2,5Y 5/2	gS	2,07	1,73	14,39	8,31	98,1	5524,7	1,7	0,1	10,7	10,7
R-27	2,5Y 4/3	Lu	1,61	0,24	2,03	7,5	121,9	31404,2	44,6	0,1	47,9	23,4
R-28	2,5Y 5/3	gS	3,14	2,52	21,00	8,49	535	7465,9	1,7	0,1	14,6	22,6
R-29	2,5Y 4/2	St2	5,2	4,32	36,01	11,64	844	15383,0	20,6	0,1	29,2	30,6
R-30	2,5Y 4/6	Su2	2,16	0,80	6,70	8,36	299	31690,4	41,8	0,1	41,1	14,8

Proben-Nr.	Fe [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	V [mg/kg]	Co [mg/kg]	Se [mg/kg]	PAK	MKW c10-c22	MKW c10-c40
Baustelle R														
R-1	23142,7	n.d.	564,7	25,5	1,3	112,8	65,4	7,1	46,1	10,7	23,7			
R-2	19545,2	n.d.	687,0	21,4	1,3	165,1	61,9	6,6	43,1	10,6	21,7			
R-3	10113,7	n.d.	459,4	14,9	1,3	268,1	44,4	0,4	22,7	6,5	2,3	9,937	83,8	n.d.
R-4	15930,9	n.d.	719,3	16,7	37,3	289,9	90,2	6,0	42,1	8,6	2,3			
R-5	21782,9	n.d.	883,3	26,1	37,1	314,0	118,9	9,2	58,1	13,4	27,5			
R-6	8999,9	n.d.	400,9	14,6	1,3	29,5	15,0	4,1	21,3	6,5	2,3	2,079	n.d.	n.d.
R-7	19138,6	n.d.	738,6	28,8	1,3	43,8	39,7	10,9	59,7	13,0	32,6			
R-8	9918,3	n.d.	437,6	12,1	18,2	122,8	50,7	0,4	23,6	5,8	2,3	0,929	n.d.	n.d.
R-9	5885,2	n.d.	574,0	13,6	1,3	74,2	32,4	0,4	13,3	4,6	2,3			
R-10	14905,0	n.d.	581,9	23,7	1,3	286,7	26,3	0,4	17,6	8,4	2,3			
R-11	3703,3	n.d.	415,6	7,3	1,3	78,6	25,7	0,4	8,1	2,9	2,3	0,264	n.d.	n.d.
R-12	16054,2	n.d.	583,1	23,7	13,0	490,4	61,8	0,4	25,1	8,9	2,3	4,240	66,9	112,9
R-13	7025,5	n.d.	278,6	14,5	1,3	82,1,1	46,9	3,2	26,4	5,5	2,3	0,122	60,43	352,31
R-14	5977,3	n.d.	125,6	16,6	1,3	725,4	32,9	0,4	13,8	20,0	2,3	0,03	148,71	318,58
R-15	6417,5	n.d.	221,4	9,6	1,3	233,7	129,3	0,4	11,7	5,0	2,3	n.d.	260	480
R-16	8483,3	n.d.	485,4	12,7	1,3	147,6	42,6	3,4	19,6	5,1	2,3	0,140	12	57
R-17	4803,9	n.d.	112,0	7,6	1,3	400,6	33,1	0,4	11,0	3,0	2,3			
R-18	1666,9	n.d.	41,0	5,4	1,3	36,8	5,0	0,4	2,8	0,2	2,3			
R-19	8385,2	n.d.	549,9	13,5	57,3	193,2	75,0	3,5	20,7	5,4	2,3	0,501	38,61	89,75
R-20	20463,8	n.d.	720,8	29,3	1,3	832,5	52,8	7,3	38,8	12,2	23,0			
R-21	57669,9	n.d.	1087,7	60,9	20,7	745,1	106,3	15,3	37,9	18,0	19,2	11,834	30,7	86,12
R-22	3417,7	n.d.	222,4	5,7	16,2	81,5	26,3	0,4	6,3	1,9	2,3	0,56	207,78	4274,79
R-23	2816,9	n.d.	285,5	5,7	1,3	33,7	22,8	0,4	5,4	0,2	2,3	n.d.	n.d.	18
R-24	22694,6	n.d.	425,3	24,5	1,3	161,2	58,0	13,0	57,2	10,4	33,5	0,080	660	3800
R-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n.d.	140	360
R-26	3638,6	n.d.	132,1	9,2	1,3	685,2	90,8	0,4	14,5	2,7	2,3			
R-27	22169,3	n.d.	740,0	28,8	22,8	242,8	94,9	10,4	50,6	14,9	25,4			
R-28	5961,4	n.d.	230,6	12,9	1,3	1489,0	140,4	0,4	17,3	7,2	2,3			
R-29	13137,9	n.d.	369,8	15,1	22,3	1584,2	85,8	6,2	28,6	6,2	2,3			
R-30	14796,1	n.d.	511,1	20,1	1,3	697,6	57,4	9,7	48,0	12,2	24,0	n.d.	39	1200

Proben-Nr.	Fe [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	V [mg/kg]	Co [mg/kg]	Se [mg/kg]	PAK	MKW c10-c22	MKW c10-c40
Baustelle R														
R-31	1961,0	n.d.	62,9	7,5	1,3	1550,0	65,4	0,4	22,8	0,2	2,3			
R-32	4385,6	n.d.	123,3	8,6	1,3	4995,1	48,3	0,4	10,4	2,9	2,3	n.d.	n.d.	51
R-33	3445,4	n.d.	103,1	6,8	1,3	65143,8	113,9	0,4	6,6	3,8	2,3			
R-34	1586,7	n.d.	68,3	0,3	1,3	510,8	8,2	0,4	4,3	0,2	2,3			
R-35	14046,9	n.d.	237,4	20,6	1,3	22698,3	474,8	4,2	14,8	16,6	2,3			
R-36	19196,5	n.d.	1169,8	23,4	38,8	374,8	117,7	8,5	49,6	11,9	21,4			
R-37	8048,6	n.d.	762,8	19,7	1,3	115,5	40,1	3,4	20,1	6,5	2,3			
R-38	23729,4	n.d.	1045,5	25,4	40,0	292,4	112,2	9,5	52,8	12,9	26,2	n.d.	5200	5600
R-39	21744,7	n.d.	1008,3	23,7	39,7	303,4	110,3	9,6	52,2	12,0	27,4			
R-40	21984,6	n.d.	923,7	23,0	37,3	303,5	112,3	10,5	54,7	11,6	29,9			
R-41	19132,5	n.d.	1040,0	19,8	53,1	403,9	139,2	8,8	54,6	10,6	25,0			
R-42	9714,7	n.d.	419,7	13,1	1,3	307,8	38,2	3,5	23,0	5,5	2,3			
R-43	24538,9	n.d.	938,7	25,6	35,4	300,8	121,6	12,2	61,9	13,8	33,1			
Baustelle G														
G-1	7747,2	n.d.	282,1	8,2	1,3	111,5	35,0	0,4	18,8	4,0	2,3			
G-2	7010,1	n.d.	289,1	7,1	1,3	36,6	18,4	0,4	15,3	3,8	2,3			
G-3	4697,3	n.d.	110,7	6,8	1,3	380,9	12,3	0,4	6,4	0,2	2,3			
G-4	5904,8	n.d.	347,4	7,3	103,1	310,2	145,8	0,4	10,4	2,5	2,3			
G-5	4821,9	n.d.	177,3	8,6	1,3	974,9	42,7	0,4	7,4	3,9	2,3			
G-6	4474,7	n.d.	127,6	7,9	1,3	170,4	33,5	0,4	6,0	2,5	2,3			
G-7	8550,7	n.d.	2221,3	14,4	1,3	70,0	16,9	0,4	8,1	6,1	2,3			
G-8	4880,1	n.d.	109,5	7,0	1,3	198,5	36,0	0,4	5,6	2,7	2,3			
G-9	5474,9	n.d.	156,4	7,7	1,3	122,8	20,9	0,4	8,9	3,8	2,3			
G-10	10098,9	n.d.	377,9	10,3	13,9	125,3	41,4	3,1	25,6	5,0	2,3			
Baustelle E														
E-1	18233,6	n.d.	625,7	16,9	32,3	183,8	139,1	7,0	51,2	8,6	2,3			
E-2	28546,6	n.d.	537,6	24,5	1,3	50,6	55,6	9,9	58,6	11,9	27,0			
E-3	23219,7	n.d.	543,9	20,5	1,3	65,3	54,7	9,1	50,0	10,4	23,6			
E-4	23969,8	n.d.	539,2	20,3	1,3	67,1	49,7	9,8	49,8	10,3	21,5			
E-5	26848,5	n.d.	373,7	24,4	1,3	41,7	48,6	9,7	54,7	8,5	25,7			

Proben-Nr.	Farbe	Textur	Gesamt- kohlenstoff- gehalt [%]	Scheibler C [%]	Scheibler Carbonat [%]	pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Baustelle E												
E-6	2,5Y 3/3	Ut3	1,49	0,00	0,02	6,7	41,3	21038,2	29,9	1,1	45,3	13,4
E-7	2,5Y 3/3	Ut4	1,51	0,00	0,00	6,5	32,2	22073,1	28,1	0,9	42,6	12,7
E-8	2,5Y 3/3	Ut3	1,39	0,58	4,84	6,4	39	21645,6	26,3	0,1	41,8	10,7
E-9	2,5Y 4/6	Sl3	0,60	2,89	24,05	8,08	87,7	15610,7	19,9	0,1	26,1	6,1
E-10	2,5Y 3/3	Sl2	6,08	1,25	10,45	7,65	150,9	9197,0	1,7	1,4	65,1	30,3
E-11	10Yr 3/4	Su2	2,03	5,39	44,88	10,6	285	17030,8	28,2	1,1	29,1	15,1
E-12	10Yr 4/4	Sl3	7,22	4,85	40,45	8,45	110,2	14831,9	22,0	3,1	20,8	8,4
E-13	10Yr 4/4	Lu	5,88	1,35	11,24	8,38	168,6	21570,7	33,7	4,5	27,7	10,0
E-14	10Yr 4/6	Su2	1,82	1,72	14,31	9,11	18,1	9208,5	15,5	0,8	15,2	69,9
E-15	2,5Y 6/3	Su3	3,16	0,88	7,35	11,88	1423	9838,5	14,9	0,1	17,4	11,2
E-16	2,5Y 6/3	Su3	1,43	0,12	0,98	12,96	5740	7835,9	1,7	0,1	16,1	8,3
E-17	10Yr 4/3	Lu	0,54	0,13	1,06	8,52	152,3	19114,1	28,7	0,1	30,1	6,4
E-18	2,5Yr 5/6	Su2	0,15	0,01	0,10	8,66	46	6264,5	1,7	0,1	14,2	2,3
E-19	2,5Yr 5/4	Su2	6,8	5,38	44,84	9,05	1841	8334,1	1,7	0,1	14,4	8,4
E-20	2,5Y 7/3	Tl	2,08	1,05	8,78	8,86	2140	4998,9	1,7	0,1	8,9	11,8
E-21	10Yr 5/3	Uls	4,35	2,64	22,03	8,54	558	17545,7	28,6	0,9	32,8	10,2
E-22	2,5Y 5/3	Su3	3,01	2,09	17,40	9,47	873	12942,8	19,7	0,1	21,9	13,8
E-23	10Yr 3/2	Ut3	1,07	0,08	0,64	7,63	84,1	22722,9	40,9	0,1	43,4	10,0
E-24	2,5Y 3/3	Lu	1,38	0,00	0,01	6,85	56,8	19974,2	36,4	0,1	44,1	13,3
E-25	10Yr 4/4	Su3	0,5	0,01	0,12	8,05	92,6	33145,7	53,4	0,1	52,3	8,9
E-26	10Yr 4/3	Lu	0,24	0,00	0,02	7,26	27,4	16887,2	35,0	0,1	32,8	8,9
E-27	10Yr 3/2	Us	1,44	0,03	0,22	7,24	75,6	19052,8	29,6	0,1	41,4	11,9
E-28	10Yr 4/3	Ut2	1,16	0,54	4,49	8,35	118,5	20486,4	34,6	0,1	36,9	7,3
Baustelle L												
L-1	10Yr 2/1	mSgs	1,54	0,01	0,08	6,62	43,9	5643,2	1,7	0,1	11,2	5,7
L-2	2,5Y 4/6	Sl2	0,3	0,01	0,06	7,16	34	8750,2	23,9	0,1	21,4	0,2
L-3	10Yr 2/2	mSgs	1,4	0,03	0,22	6,99	30,3	4546,3	1,7	0,1	10,8	6,7
L-4	2,5Y 4/6	mSgs	0,23	0,00	0,00	5,93	10	4429,1	1,7	0,1	10,1	0,2
L-5	10Yr 2/1	mSgs	1,29	0,05	0,40	7,34	41,4	5094,7	1,7	0,1	14,6	5,9
L-6	2,5Y 4/6	mSgs	0,39	0,00	0,00	5,71	10,3	3977,8	1,7	0,1	8,3	0,2

Proben-Nr.	Fe [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	V [mg/kg]	Co [mg/kg]	Se [mg/kg]	PAK	MKW c10-c22	MKW c10-c40
Baustelle E														
E-6	18544,5	n.d.	579,1	16,9	40,5	174,9	162,2	6,7	48,8	8,2	2,3			
E-7	17726,3	n.d.	567,4	16,8	48,4	173,6	152,2	7,1	45,1	7,7	2,3			
E-8	18954,8	n.d.	621,7	18,2	78,3	182,9	135,4	7,3	51,6	9,0	2,3			
E-9	15013,3	n.d.	223,2	17,2	1,3	143,1	64,0	4,6	23,6	6,6	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
E-10	12961,2	n.d.	479,4	27,9	71,0	424,1	351,4	4,3	24,7	7,2	2,3	0,730	21	170
E-11	13479,5	n.d.	490,6	16,4	25,1	2019,3	173,2	6,8	46,5	6,9	2,3	n.d.	48	77
E-12	15690,6	n.d.	984,3	19,1	68,9	188,2	571,4	5,4	30,0	6,3	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
E-13	16061,6	n.d.	881,2	19,9	95,2	207,3	687,6	7,5	43,7	6,2	19,4			
E-14	10547,3	n.d.	416,7	24,7	17,3	184,2	114,1	3,7	17,4	7,0	2,3			
E-15	8283,5	n.d.	189,3	9,3	1,3	1740,4	98,4	4,0	19,7	3,9	2,3			
E-16	5511,0	n.d.	128,0	7,5	1,3	7358,6	58,8	3,3	15,4	3,7	2,3			
E-17	16442,6	n.d.	361,6	16,4	1,3	142,3	49,9	6,3	39,1	7,9	2,3			
E-18	5114,4	n.d.	135,2	5,7	1,3	52,5	15,7	0,4	12,4	2,5	2,3			
E-19	6367,5	n.d.	149,3	6,8	1,3	9718,6	56,3	0,4	13,7	0,2	2,3	n.d.	n.d.	23
E-20	3732,0	n.d.	96,1	0,3	1,3	127563,9	157,4	0,4	8,1	0,2	2,3			
E-21	16194,6	n.d.	602,8	18,0	46,8	854,8	389,3	3,4	36,9	5,2	2,3	n.d.	n.d.	13
E-22	10917,6	n.d.	303,7	11,4	1,3	4717,6	78,9	0,4	24,7	3,5	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
E-23	20611,1	n.d.	526,5	18,7	18,0	174,3	121,6	4,9	51,2	7,5	2,3			
E-24	19139,0	n.d.	636,1	17,3	33,3	224,5	155,5	5,1	52,9	7,2	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
E-25	30436,8	n.d.	452,7	27,7	1,3	67,8	65,7	7,6	64,7	9,5	26,2			
E-26	20095,9	n.d.	205,3	20,7	1,3	264,1	46,9	0,4	26,9	6,5	2,3			
E-27	17785,9	n.d.	604,1	17,1	39,9	199,7	154,0	4,4	53,3	6,7	2,3			
E-28	18918,0	n.d.	425,5	18,7	1,3	160,5	103,5	3,7	41,5	6,2	2,3			
Baustelle L														
L-1	6232,0	n.d.	104,3	0,3	1,3	193,1	41,2	0,4	18,2	0,2	2,3	0,433	93,96851	n.d.
L-2	19381,6	n.d.	83,5	11,6	1,3	33,0	26,8	0,4	25,7	2,5	2,3	0,032	94,97844	n.d.
L-3	3517,2	n.d.	93,5	0,3	13,7	180,3	36,0	0,4	17,8	0,2	2,3			
L-4	5473,0	n.d.	65,3	0,3	1,3	18,1	14,0	0,4	9,7	0,2	2,3	0,024	n.d.	68,66726
L-5	3786,9	n.d.	108,0	0,3	10,6	166,9	30,0	0,4	17,6	0,2	2,3			
L-6	3302,2	n.d.	51,5	0,3	1,3	37,2	13,7	0,4	7,0	0,2	2,3			

Proben-Nr.	Farbe	Textur	Gesamt- kohlenstoff- gehalt [%]	Scheibler C [%]	Scheibler Carbonat [%]	pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit [μ S/cm]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]
L-7	10Yr 2/1	mSgs	1,37	0,05	0,44	7,11	51,1	4844,5	1,7	0,1	12,5	5,8
L-8	10Yr 3/4	mSgs	0,67	0,00	0,00	5,67	11,7	4768,0	1,7	0,1	8,2	0,2
L-9	10Yr 2/1	mSgs	1,49	0,05	0,41	6,88	47,3	5511,0	1,7	0,1	11,4	6,9
L-10	10Yr 2/3	mSgs	0,54	0,00	0,00	5,36	9,9	4501,6	1,7	0,1	9,5	0,2
L-11	10Yr 2/1	mSgs	1,42	0,01	0,05	6,91	29,7	4891,2	1,7	0,1	11,3	0,2
L-12	2,5Y 4/6	Sl2	0,49	0,00	0,00	6,99	19	7882,0	1,7	0,1	12,2	0,2
L-13	10Yr 2/1	mSgs	1,36	0,00	0,02	6,79	25,5	4862,9	1,7	0,1	11,8	0,2
L-14	2,5Y 4/6	Su2	0,38	0,00	0,00	6,98	18	7015,9	1,7	0,1	11,6	0,2
L-15	10Yr 2/1	mSgs	1,41	0,01	0,07	6,91	43	5209,6	1,7	0,1	12,7	3,8
L-16	2,5Y 4/6	Su2	0,28	0,00	0,00	6,75	16,9	5295,2	1,7	0,1	14,3	0,2
L-17	10Yr 2/1	mSgs	1,35	0,01	0,09	6,85	30,9	5025,7	1,7	0,1	12,8	3,1
L-18	2,5Y 5/4	mSgs	0,42	0,00	0,00	6,33	12,2	5747,6	1,7	0,1	10,9	0,2
L-19	10Yr 2/1	mSgs	1,18	0,01	0,05	7,25	23,8	5779,0	1,7	0,1	13,0	2,2
L-20	10Yr 2/3	Su2	0,33	0,01	0,07	7,64	22,8	8425,9	16,0	0,1	15,0	0,2
L-21	2,5Y 5/4	mSgs	0,28	0,00	0,00	5,79	6,9	3357,7	1,7	0,1	5,0	0,2
L-22	2,5Y 5/4	mSgs	0,38	0,00	0,04	4,79	7,3	3715,3	1,7	0,1	7,3	0,2
L-23	10Yr 2/1	mSgs	1,46	0,01	0,07	6,58	28,2	4701,6	1,7	0,1	12,1	3,2
L-24	10Yr 2/3	mSgs	0,89	0,00	0,00	5,99	12	4487,6	1,7	0,1	7,1	0,2
L-25	10Yr 2/1	mSgs	1,56	0,00	0,00	6,34	20,9	5255,8	1,7	0,1	11,0	6,3
L-26	10Yr 2/3	mSgs	0,88	0,00	0,00	5,91	12,2	4619,7	1,7	0,1	7,6	0,2
L-27	2,5Y 4/6	Su2	0,47	0,00	0,04	7,19	20,2	8107,1	1,7	0,1	11,6	0,2
L-28	10Yr 2/3	mSgs	1,07	0,01	0,05	7,34	33,4	9744,3	1,7	0,1	12,4	0,2
L-29	10Yr 2/1	mSgs	1,43	0,05	0,45	7,76	55,9	5789,0	1,7	0,1	10,9	3,6
L-30	2,5Y 4/4	Sl2	0,34	0,00	0,00	7,17	23,2	7187,8	15,6	0,1	14,3	0,2
L-31	10Yr 2/1	mSgs	1,4	0,01	0,07	7,43	29,3	4001,9	1,7	0,1	8,8	4,3
L-32	2,5Y 4/6	Su2	0,35	0,00	0,00	6,72	18,8	4586,2	1,7	0,1	7,9	0,2
L-33	10Yr 2/1	mSgs	1,31	0,01	0,05	6,91	48,1	5433,2	1,7	0,1	13,4	4,4
L-34	2,5Y 4/4	mSgs	1,01	0,09	0,74	7,33	62,4	6342,3	1,7	0,1	13,4	2,0
L-35	10Yr 2/3	mSgs	0,31	0,00	0,00	5,73	12,8	5038,1	1,7	0,1	11,1	0,2
L-36	2,5Y 3/3	mSgs	0,42	0,00	0,00	6,03	12,4	3515,6	1,7	0,1	6,6	0,2

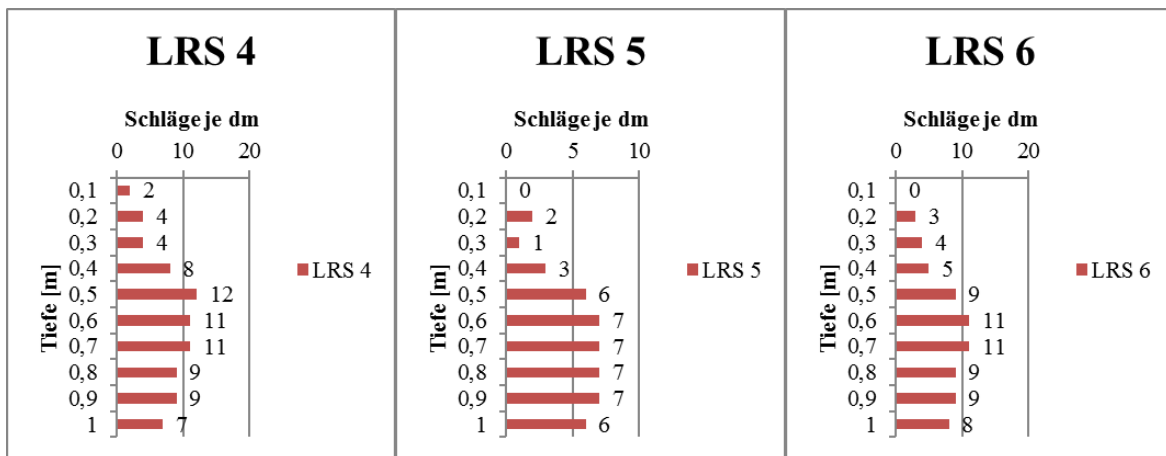
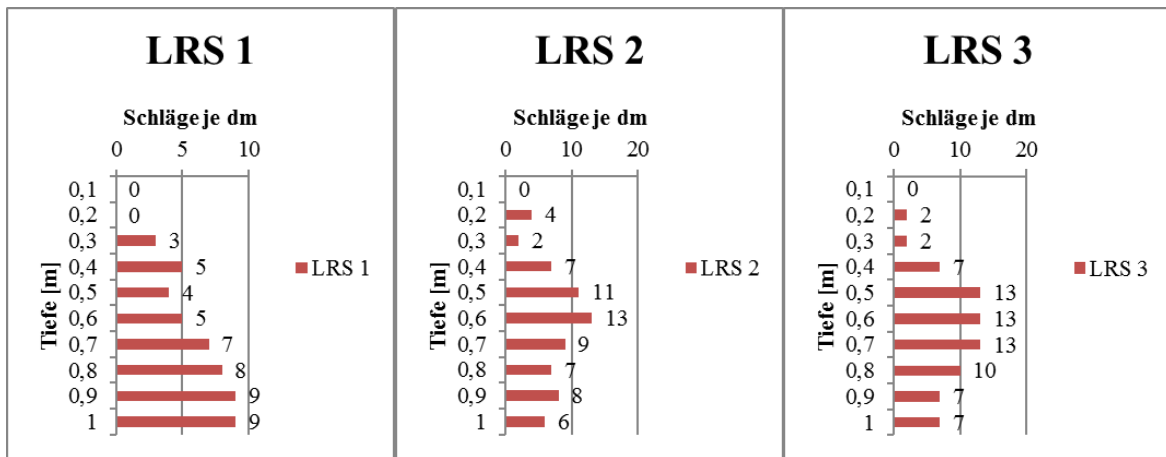
Proben-Nr.	Fe [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	V [mg/kg]	Co [mg/kg]	Se [mg/kg]	PAK	MKW c10-c22	MKW c10-c40
L-7	3571,7	n.d.	102,9	0,3	1,3	169,5	32,2	0,4	18,1	0,2	2,3	0,265	122,1953	101,8726
L-8	4801,3	n.d.	47,8	0,3	1,3	56,3	15,5	0,4	10,2	0,2	2,3	0,028	77,51745	n.d.
L-9	4281,9	n.d.	121,6	0,3	12,0	205,4	38,6	0,4	20,6	0,2	2,3			
L-10	3219,4	n.d.	55,2	0,3	1,3	49,0	15,0	0,4	9,0	0,2	2,3			
L-11	3722,6	n.d.	100,8	0,3	1,3	155,0	32,5	0,4	15,1	0,2	2,3			
L-12	17364,2	n.d.	69,3	5,4	1,3	45,7	19,8	0,4	13,0	3,2	2,3	0,025	80,00916	n.d.
L-13	3279,6	n.d.	105,3	0,3	1,3	159,8	37,4	0,4	15,2	0,2	2,3			
L-14	16559,9	n.d.	57,6	6,6	1,3	39,5	24,6	0,4	12,6	3,6	2,3			
L-15	3802,8	n.d.	108,0	0,3	11,6	174,3	34,9	0,4	16,6	0,2	2,3	0,298	93,7058	89,38843
L-16	8949,8	n.d.	59,5	0,3	1,3	30,2	16,6	0,4	10,8	2,0	2,3	0,023	114,8082	127,0156
L-17	3643,3	n.d.	105,2	0,3	1,3	160,3	32,5	0,4	15,9	0,2	2,3			
L-18	11767,0	n.d.	48,9	0,3	1,3	38,8	20,5	0,4	12,8	2,0	2,3			
L-19	6008,5	n.d.	104,2	0,3	1,3	169,0	40,9	0,4	17,5	0,2	2,3			
L-20	14396,3	n.d.	83,0	10,8	1,3	33,7	21,4	0,4	19,1	4,2	2,3			
L-21	3615,3	n.d.	33,0	0,3	1,3	29,5	13,7	0,4	7,1	0,2	2,3			
L-22	4086,5	n.d.	35,0	0,3	1,3	34,3	14,9	0,4	7,7	0,2	2,3			
L-23	3419,4	n.d.	104,6	0,3	12,3	178,2	34,3	0,4	16,7	0,2	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
L-24	3619,2	n.d.	54,9	0,3	1,3	134,0	19,9	0,4	11,9	0,2	2,3			
L-25	3586,7	n.d.	125,9	0,3	12,9	211,7	39,6	0,4	18,3	0,2	2,3			
L-26	3236,1	n.d.	66,0	0,3	1,3	87,2	19,6	0,4	13,5	0,2	2,3			
L-27	9217,4	n.d.	41,1	5,9	1,3	45,6	23,2	0,4	13,5	2,2	2,3			
L-28	5689,4	n.d.	69,8	0,3	1,3	115,1	37,4	0,4	18,1	0,2	2,3			
L-29	4298,4	n.d.	134,6	0,3	11,5	185,4	41,6	0,4	19,7	0,2	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
L-30	13206,0	n.d.	52,5	9,6	1,3	37,7	27,0	0,4	16,6	3,5	2,3			
L-31	3156,6	n.d.	82,7	0,3	1,3	133,0	23,3	0,4	13,6	0,2	2,3			
L-32	7124,2	n.d.	40,7	0,3	1,3	31,6	12,7	0,4	9,4	0,2	2,3			
L-33	6485,5	n.d.	99,2	0,3	12,3	162,5	35,0	0,4	17,0	0,2	2,3			
L-34	8433,7	n.d.	96,4	4,3	1,3	101,8	28,9	0,4	18,9	1,8	2,3			
L-35	5565,9	n.d.	63,7	0,3	1,3	27,9	11,0	0,4	10,6	0,2	2,3			
L-36	3998,0	n.d.	35,1	0,3	1,3	37,0	13,3	0,4	7,8	0,2	2,3			

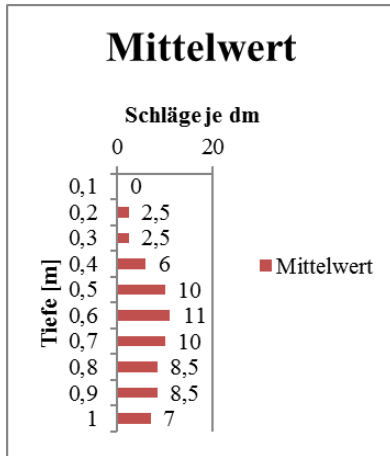
Proben-Nr.	Farbe	Textur	Gesamt- kohlenstoff- gehalt [%]	Scheibler C [%]	Scheibler Carbonat [%]	pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]
L-37	10Yr 2/1	mSgs	1,28	0,00	0,02	6,07	36,3	4446,7	1,7	0,1	9,5	4,6
L-38	10Yr 2/3	mSgs	0,62	0,00	0,00	6,02	15,2	3627,6	1,7	0,1	5,4	0,2
L-39	10Yr 2/1	mSgs	1,42	0,00	0,00	5,81	25,4	4504,9	1,7	0,1	10,0	5,4
L-40	10Yr 2/2	mSgs	0,75	0,00	0,00	6,01	17,9	4688,8	1,7	0,1	8,6	1,4
L-41	10Yr 3/2	Su2	0,92	0,01	0,08	7,4	47,3	7763,8	1,7	0,1	11,8	0,2
L-42	10Yr 2/1	mSgs	1,39	0,04	0,29	7,45	62,9	5815,0	1,7	0,1	12,8	7,0
L-43	10Yr 2/2	mSgs	1,04	0,00	0,01	7,14	35,2	7896,5	14,0	0,1	12,9	1,8
L-44	10Yr 2/1	mSgs	1,52	0,01	0,09	7,1	58,1	5538,8	1,7	0,1	13,6	6,7
L-45	10Yr 2/2	Su2	1,04	0,00	0,01	6,83	20,10	7831,3	14,8	0,1	13,6	2,3

Proben-Nr.	Fe [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	V [mg/kg]	Co [mg/kg]	Se [mg/kg]	PAK	MKW c10-c22	MKW c10-c40
L-37	3517,6	n.d.	96,2	0,3	12,2	134,6	26,4	0,4	15,9	0,2	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
L-38	2886,5	n.d.	47,1	0,3	1,3	49,4	12,9	0,4	8,2	0,2	2,3			
L-39	3297,7	n.d.	98,5	0,3	12,2	157,8	25,5	0,4	16,3	0,2	2,3			
L-40	3350,0	n.d.	49,3	0,3	1,3	77,3	22,6	0,4	12,5	0,2	2,3			
L-41	6946,8	n.d.	62,3	6,1	1,3	95,4	33,6	0,4	17,4	2,7	2,3			
L-42	5455,5	n.d.	140,1	4,6	14,0	181,0	47,6	0,4	22,1	2,1	2,3			
L-43	6837,8	n.d.	71,8	5,6	1,3	107,0	40,0	0,4	18,9	2,3	2,3	n.d.	n.d.	n.d.
L-44	5619,9	n.d.	124,9	3,9	15,7	182,2	44,5	0,4	20,8	1,8	2,3			
L-45	10239,2	n.d.	78,3	4,7	1,3	98,0	34,6	0,4	20,1	1,9	2,3			

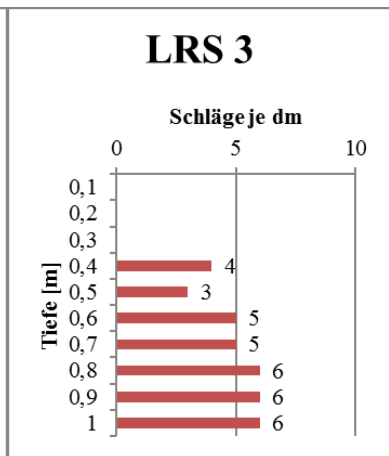
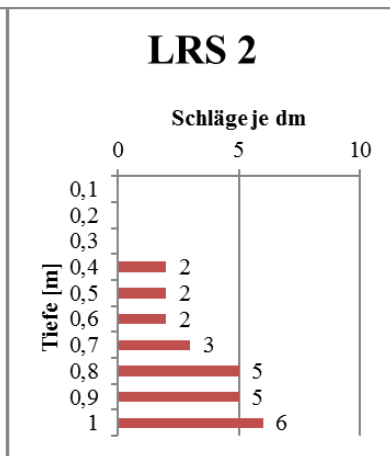
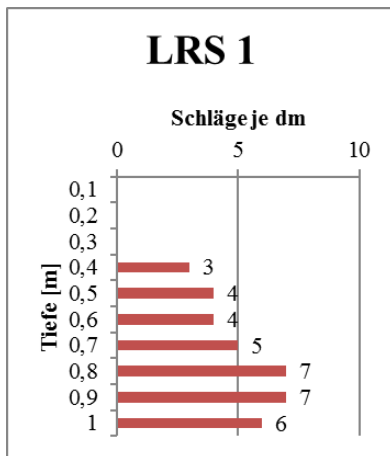
Anhang 3: LRS

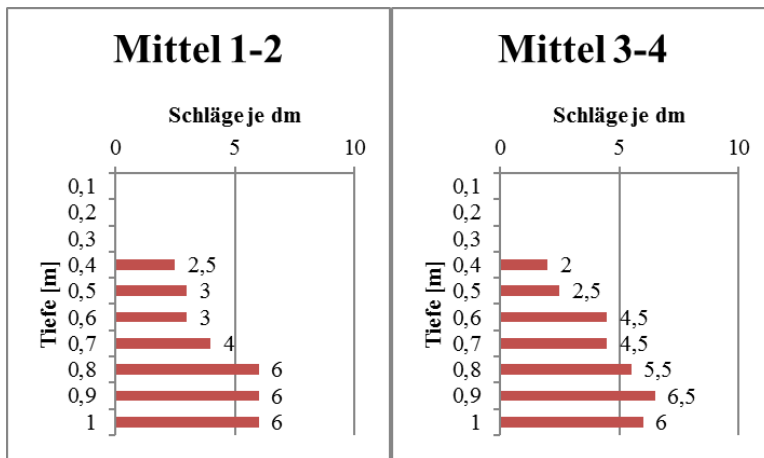
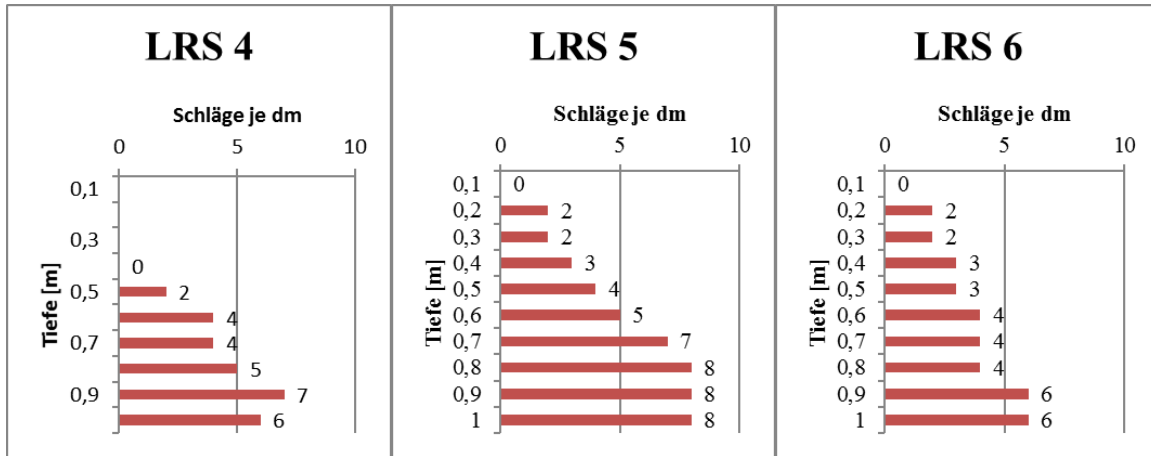
Vor Oberbodenabtrag							
	1-2	2-3	4-5	5-6	7-8	8-9	
Tiefe	LRS 1	LRS 2	LRS 3	LRS 4	LRS 5	LRS 6	Mittelwert
0,1	0	0	0	2	0	0	0
0,2	0	4	2	4	2	3	2,5
0,3	3	2	2	4	1	4	2,5
0,4	5	7	7	8	3	5	6
0,5	4	11	13	12	6	9	10
0,6	5	13	13	11	7	11	11
0,7	7	9	13	11	7	11	10
0,8	8	7	10	9	7	9	8,5
0,9	9	8	7	9	7	9	8,5
1	9	6	7	7	6	8	7



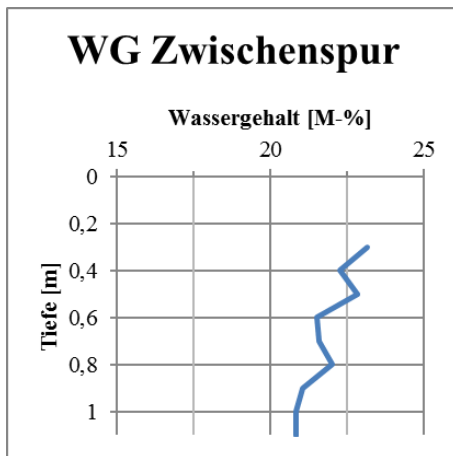
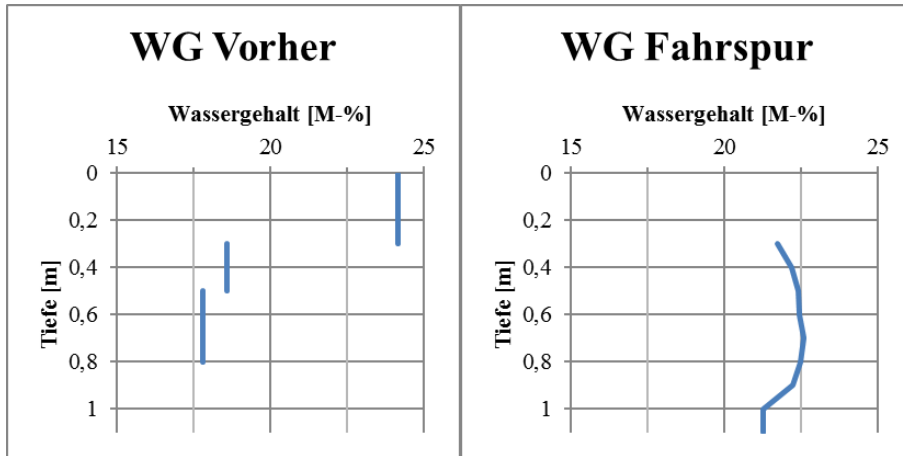


Nach Oberbodenabtrag								
	Fahrspur	Fahrspur	Referenz	Referenz	Kontrolle Wiese		Spur	Referenz
Tiefe	LRS 1	LRS 2	LRS 3	LRS 4	LRS 5	LRS 6	Mittel 1-2	Mittel 3-4
0,1					0	0		
0,2					2	2		
0,3					2	2		
0,4	3	2	4	0	3	3	2,5	2
0,5	4	2	3	2	4	3	3	2,5
0,6	4	2	5	4	5	4	3	4,5
0,7	5	3	5	4	7	4	4	4,5
0,8	7	5	6	5	8	4	6	5,5
0,9	7	5	6	7	8	6	6	6,5
1	6	6	6	6	8	6	6	6

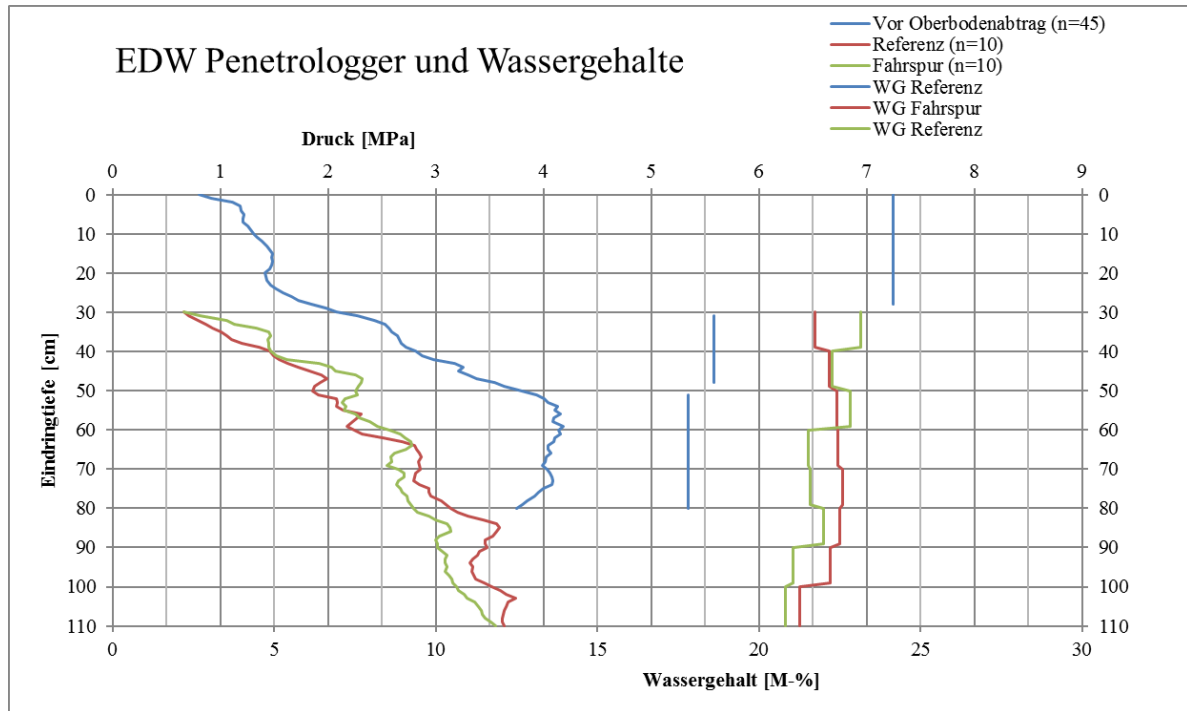




Tiefe	Vorher	Nachher Fahrspur	Nachher Zwischenspur
0	24,143		
0,1	24,143		
0,2	24,143		
0,3	24,143		
0,3	18,605	21,742	23,15
0,4	18,605	22,181	22,26
0,5	18,605	22,404	22,84
0,5	17,818	22,404	22,84
0,6	17,818	22,435	21,53
0,7	17,818	22,601	21,6
0,8	17,818	22,49	22
0,9		22,222	21,05
1		21,263	20,83
1,1		21,263	20,83



Anhang 4: Penetrologger-WG



Mittelwerte der Penetrologgemessungen				Mittelwert WG		
Tiefe	EDW Vorher	EDW Referenz	EDW Fahrspur	WG Vorher	WG Fahrspur	WG Referenz
0	0,80			24,14		
1	0,92			24,14		
2	1,12			24,14		
3	1,19			24,14		
4	1,19			24,14		
5	1,22			24,14		
6	1,21			24,14		
7	1,21			24,14		
8	1,26			24,14		
9	1,28			24,14		
10	1,31			24,14		
11	1,34			24,14		
12	1,39			24,14		
13	1,43			24,14		
14	1,46			24,14		
15	1,49			24,14		
16	1,48			24,14		
17	1,48			24,14		
18	1,48			24,14		
19	1,46			24,14		
20	1,42			24,14		

Mittelwerte der Penetrologgermessungen				Mittelwert WG		
Tiefe	EDW Vorher	EDW Referenz	EDW Fahrspur	WG Vorher	WG Fahrspur	WG Referenz
21	1,42			24,14		
22	1,44			24,14		
23	1,47			24,14		
24	1,52			24,14		
25	1,58			24,14		
26	1,66			24,14		
27	1,73			24,14		
28	1,85			24,14		
29	1,98					
30	2,08	0,66	0,66		21,74	23,15
31	2,27	0,71	0,82	18,61	21,74	23,15
32	2,43	0,80	1,06	18,61	21,74	23,15
33	2,53	0,87	1,13	18,61	21,74	23,15
34	2,57	0,93	1,34	18,61	21,74	23,15
35	2,59	1,01	1,45	18,61	21,74	23,15
36	2,64	1,06	1,47	18,61	21,74	23,15
37	2,66	1,11	1,45	18,61	21,74	23,15
38	2,69	1,20	1,45	18,61	21,74	23,15
39	2,73	1,36	1,45	18,61	21,74	23,15
40	2,81	1,46	1,47	18,61	22,18	22,26
41	2,87	1,50	1,52	18,61	22,18	22,26
42	2,99	1,54	1,62	18,61	22,18	22,26
43	3,18	1,63	1,92	18,61	22,18	22,26
44	3,25	1,72	2,03	18,61	22,18	22,26
45	3,22	1,83	2,07	18,61	22,18	22,26
46	3,30	1,94	2,26	18,61	22,18	22,26
47	3,38	1,99	2,32	18,61	22,18	22,26
48	3,55	1,93	2,31	18,61	22,18	22,26
49	3,63	1,88	2,28		22,18	22,26
50	3,80	1,86	2,25		22,40	22,84
51	3,94	1,91	2,28	17,82	22,40	22,84
52	4,01	2,08	2,16	17,82	22,40	22,84
53	4,04	2,09	2,14	17,82	22,40	22,84
54	4,14	2,08	2,16	17,82	22,40	22,84
55	4,11	2,14	2,15	17,82	22,40	22,84
56	4,15	2,31	2,26	17,82	22,40	22,84
57	4,10	2,28	2,29	17,82	22,40	22,84
58	4,09	2,23	2,39	17,82	22,40	22,84
59	4,19	2,18	2,46	17,82	22,40	22,84
60	4,14	2,25	2,57	17,82	22,44	21,53
61	4,16	2,32	2,67	17,82	22,44	21,53
62	4,10	2,51	2,72	17,82	22,44	21,53
63	4,10	2,69	2,77	17,82	22,44	21,53
64	4,04	2,81	2,77	17,82	22,44	21,53
65	4,04	2,83	2,72	17,82	22,44	21,53

Mittelwerte der Penetrologgermessungen				Mittelwert WG		
Tiefe	EDW Vorher	EDW Referenz	EDW Fahrspur	WG Vorher	WG Fahrspur	WG Referenz
66	4,07	2,85	2,62	17,82	22,44	21,53
67	4,03	2,87	2,58	17,82	22,44	21,53
68	4,02	2,84	2,59	17,82	22,44	21,53
69	3,99	2,85	2,55	17,82	22,44	21,53
70	4,04	2,86	2,65	17,82	22,60	21,60
71	4,06	2,81	2,70	17,82	22,60	21,60
72	4,08	2,81	2,70	17,82	22,60	21,60
73	4,08	2,80	2,65	17,82	22,60	21,60
74	4,08	2,85	2,64	17,82	22,60	21,60
75	4,00	2,94	2,67	17,82	22,60	21,60
76	3,96	2,94	2,69	17,82	22,60	21,60
77	3,92	2,96	2,74	17,82	22,60	21,60
78	3,85	3,06	2,75	17,82	22,60	21,60
79	3,81	3,10	2,77	17,82	22,60	21,60
80	3,75	3,14	2,80	17,82	22,49	22,00
81		3,20	2,83		22,49	22,00
82		3,30	2,94		22,49	22,00
83		3,44	3,00		22,49	22,00
84		3,56	3,11		22,49	22,00
85		3,60	3,13		22,49	22,00
86		3,57	3,14		22,49	22,00
87		3,53	3,03		22,49	22,00
88		3,46	3,00		22,49	22,00
89		3,46	3,02		22,49	22,00
90		3,48	3,01		22,22	21,05
91		3,41	3,06		22,22	21,05
92		3,39	3,10		22,22	21,05
93		3,34	3,09		22,22	21,05
94		3,31	3,09		22,22	21,05
95		3,35	3,11		22,22	21,05
96		3,33	3,09		22,22	21,05
97		3,35	3,12		22,22	21,05
98		3,37	3,15		22,22	21,05
99		3,45	3,16		22,22	21,05
100		3,52	3,19		21,26	20,83
101		3,60	3,21		21,26	20,83
102		3,65	3,27		21,26	20,83
103		3,74	3,29		21,26	20,83
104		3,67	3,36		21,26	20,83
105		3,65	3,40		21,26	20,83
106		3,64	3,42		21,26	20,83
107		3,63	3,43		21,26	20,83
108		3,62	3,46		21,26	20,83
109		3,62	3,52		21,26	20,83
110		3,63	3,55		21,26	20,83

Anhang 5: dB + PZ + GPV

Oberboden- abtrag Referenz	Probe-Nr.	SZ-Nr.	Methode	Zylinder	Boden + SZ (feldfeucht)	Boden netto (feldfeucht)	Boden + SZ (trocken)
	02.11.2013			[g]	05.11.2013 Ø90	[g]	25.11.2013 (kf) 28.11.2013 (pF)
Profil I 33-37	E-01	412	kf	99,25	278,60	179,35	249,5
	E-02	575	pF	103,14	283,18	180,04	252,93
	E-03	456	pF	103,56	282,88	179,32	255,16
	E-04	191	kf	103,7	282,56	178,86	254,41
	E-05	182	pF	106,72	286,37	179,65	260,55
	E-06	220	kf	110,53	294,74	184,21	262,84
	E-07	489	kf	102,56	282,09	179,53	254,59
	E-08	120	kf	99,82	278,25	178,43	247,72
	E-09	466	kf	104,12	284,79	180,67	252,52
	E-10	150	kf	111,21	291,59	180,38	262,09
	E-11	224	pF	108,52	289,34	180,82	258,43
	E-12	482	pF	103,03	282,86	179,83	253,88
	E-13	485	pF	103,18	282,86	179,68	255,02
	E-14	539	pF	107,21	289,00	181,79	258,5
	E-15	416	pF	98,57	277,06	178,49	250,53
	E-16	162	kf	102,85	281,92	179,07	254,81
Profil I 52-56	E-17	538	pF	103,59	279,19	175,60	255,71
	E-18	512	kf	107,52	283,23	175,71	257,02
	E-19	113	pf	102,69	278,37	175,68	251,79
	E-20	553	pf	97,21	269,68	172,47	246,64
	E-21	179	kf	113,78	293,33	179,55	265,66
	E-22	572	kf	108,2	283,25	175,05	255,82
	E-23	579	kf	102,31	278,28	175,97	255,71
	E-24	468	pF	99,46	274,67	175,21	252,7
	E-25	188	pF	112,84	290,89	178,05	265,23
	E-26	420	pF	101,58	276,03	174,45	252,03
	E-27	189	pF	108,96	284,45	175,49	256,99
	E-28	222	pF	104,67	280,63	175,96	255,48
	E-29	409	kf	103,54	278,59	175,05	255,48
	E-30	172	kf	99,58	275,00	175,42	251,91
	E-31	563	kf	103,76	279,33	175,57	254,89
	E-32	121	kf	101,73	276,94	175,21	251,88

Probe-Nr.	Boden netto (trocken)	Wassergehalt					
		[g]	[Vol-%]	Median Ø [Vol-%]	Mittelw Ø [Vol-%]	[M-%]	Ø [M-%]
02.11.2013	[g]	[g]	[Vol-%]	Median Ø [Vol-%]	Mittelw Ø [Vol-%]	[M-%]	Ø [M-%]
E-01	150,25	29,1	29,10	29,04	29,04	16,23	16,13
E-02	149,79	30,25	30,25			16,80	
E-03	151,6	27,72	27,72			15,46	
E-04	150,71	28,15	28,15			15,74	
E-05	153,83	25,82	25,82			14,37	
E-06	152,31	31,9	31,90			17,32	
E-07	152,03	27,5	27,50			15,32	
E-08	147,9	30,53	30,53			17,11	
E-09	148,4	32,27	32,27			17,86	
E-10	150,88	29,5	29,50			16,35	
E-11	149,91	30,91	30,91			17,09	
E-12	150,85	28,98	28,98			16,12	
E-13	151,84	27,84	27,84			15,49	
E-14	151,29	30,5	30,50			16,78	
E-15	151,96	26,53	26,53			14,86	
E-16	151,96	27,11	27,11			15,14	
E-17	152,12	23,48	23,48	24,75	24,81	13,37	14,12
E-18	149,5	26,21	26,21			14,92	
E-19	149,1	26,58	26,58			15,13	
E-20	149,43	23,04	23,04			13,36	
E-21	151,88	27,67	27,67			15,41	
E-22	147,62	27,43	27,43			15,67	
E-23	153,4	22,57	22,57			12,83	
E-24	153,24	21,97	21,97			12,54	
E-25	152,39	25,66	25,66			14,41	
E-26	150,45	24	24,00			13,76	
E-27	148,03	27,46	27,46			15,65	
E-28	150,81	25,15	25,15			14,29	
E-29	151,94	23,11	23,11			13,20	
E-30	152,33	23,09	23,09			13,16	
E-31	151,13	24,44	24,44			13,92	
E-32	150,15	25,06	25,06			14,30	

Probe-Nr.	Lagerungsdichte dB (Trockenrohddichte)			Porenziffer ε			Porenvolumen PV berechnet	
	[g/cm ³]	Median Ø [g/cm ³]	Mittelw Ø [g/cm ³]	[-]	Median	Mittelw	[%]	Ø [%]
02.11.2013								
E-01	1,50	1,51	1,51	0,76	0,75	0,76	43,30	43,03
E-02	1,50			0,77			43,48	
E-03	1,52			0,75			42,79	
E-04	1,51			0,76			43,13	
E-05	1,54			0,72			41,95	
E-06	1,52			0,74			42,52	
E-07	1,52			0,74			42,63	
E-08	1,48			0,79			44,19	
E-09	1,48			0,79			44,00	
E-10	1,51			0,76			43,06	
E-11	1,50			0,77			43,43	
E-12	1,51			0,76			43,08	
E-13	1,52			0,75			42,70	
E-14	1,51			0,75			42,91	
E-15	1,52			0,74			42,66	
E-16	1,52			0,74			42,66	
E-17	1,52	1,51	1,51	0,74	0,76	0,76	42,60	43,08
E-18	1,50			0,77			43,58	
E-19	1,49			0,78			43,74	
E-20	1,49			0,77			43,61	
E-21	1,52			0,74			42,69	
E-22	1,48			0,80			44,29	
E-23	1,53			0,73			42,11	
E-24	1,53			0,73			42,17	
E-25	1,52			0,74			42,49	
E-26	1,50			0,76			43,23	
E-27	1,48			0,79			44,14	
E-28	1,51			0,76			43,09	
E-29	1,52			0,74			42,66	
E-30	1,52			0,74			42,52	
E-31	1,51			0,75			42,97	
E-32	1,50			0,76			43,34	

Probe-Nr.	Luftpyknometer Hohlraumgehalt		
	02.11.2013	25.11.2013 (kf) 28.11.2013 (pF)	Median Ø [Vol-%]
E-01	60	60,75	61,06
E-02	63		
E-03	61		
E-04	60		
E-05	63		
E-06	57		
E-07	60,5		
E-08	63		
E-09	60		
E-10	60,5		
E-11	63		
E-12	62		
E-13	63		
E-14	60		
E-15	63		
E-16	58		
E-17	64	62,75	62,66
E-18	63		
E-19	65		
E-20	65		
E-21	61		
E-22	63		
E-23	61		
E-24	58		
E-25	61		
E-26	64		
E-27	65		
E-28	65		
E-29	61		
E-30	62,5		
E-31	61,5		
E-32	62,5		

Oberboden- abtrag Befahrung	Probe-Nr.	SZ-Nr.	Methode	Zylinder	Boden + SZ (feldfeucht)	Boden netto (feldfeucht)	Boden + SZ (trocken)
	13.11.2013			[g]	14.11.2013 Ø90	[g]	28.11.2013 (kf) 09.12.2013 (pF)
Profil 2 alt 33-37 neu 3-7	E-33	422	kf	118,24	317,08	198,84	277,81
	E-34	470	kf	98,64	289,01	190,37	254,82
	E-35	465	kf	101,25	294,59	193,34	258,52
	E-36	118	kf	105,14	299,06	193,92	262,04
	E-37	536	kf	106,2	301,36	195,16	264,57
	E-38	158	kf	98,89	290,98	192,09	255,26
	E-39	145	kf	104,52	298,72	194,20	262,69
	E-40	173	kf	106,71	301,63	194,92	265,74
	E-41	196	pF	116,37	315,11	198,74	278,58
	E-42	549	pF	114,57	310,52	195,95	274,16
	E-43	354	pF	113,75	310,84	197,09	275,61
	E-44	547	pF	114,94	310,74	195,80	273,94
	E-45	545	pF	114,85	308,81	193,96	272,03
	E-46	548	pF	116,15	308,90	192,75	272,9
	E-47	543	pF	115,04	309,56	194,52	273,87
	E-48	550	pF	115,49	311,17	195,68	275
Profil 2 alt 52-56 neu 22-26	E-49	159	kf	99,58	288,08	188,50	252,62
	E-50	455	kf	104,98	293,26	188,28	256,73
	E-51	569	kf	103,12	291,13	188,01	255,34
	E-52	476	kf	107,54	295,24	187,70	258,58
	E-53	153	kf	98,54	286,18	187,64	249,51
	E-54	520	kf	109,42	298,37	188,95	261,53
	E-55	126	kf	100,21	288,56	188,35	253,53
	E-56	459	kf	104,74	293,13	188,39	256,13
	E-57	800	pF	122,01	312,61	190,60	277,36
	E-58	781	pF	122,25	315,18	192,93	279,69
	E-59	797	pF	123,27	315,22	191,95	278,53
	E-60	789	pF	121,65	310,64	188,99	275,05
	E-61	951	pF	114,89	301,18	186,29	266,79
	E-62	799	pF	122,02	307,52	185,50	273,28
	E-63	788	pF	120,85	303,23	182,38	269,13
	E-64	794	pF	121,84	308,23	186,39	272,74

Probe-Nr.	Boden netto (trocken)	Wassergehalt					
		[g]	[Vol-%]	Median Ø [Vol-%]	Mittelw Ø [Vol-%]	[M-%]	Ø [M-%]
13.11.2013	[g]	[g]	[Vol-%]	Median Ø [Vol-%]	Mittelw Ø [Vol-%]	[M-%]	Ø [M-%]
E-33	159,57	39,27	39,27	36,12	36,28	19,75	18,62
E-34	156,18	34,19	34,19				
E-35	157,27	36,07	36,07				
E-36	156,9	37,02	37,02				
E-37	158,37	36,79	36,79				
E-38	156,37	35,72	35,72				
E-39	158,17	36,03	36,03				
E-40	159,03	35,89	35,89				
E-41	162,21	36,53	36,53				
E-42	159,59	36,36	36,36				
E-43	161,86	35,23	35,23				
E-44	159	36,8	36,80				
E-45	157,18	36,78	36,78				
E-46	156,75	36	36,00				
E-47	158,83	35,69	35,69				
E-48	159,51	36,17	36,17			35,54	
E-49	153,04	35,46	35,46				
E-50	151,75	36,53	36,53				
E-51	152,22	35,79	35,79				
E-52	151,04	36,66	36,66				
E-53	150,97	36,67	36,67				
E-54	152,11	36,84	36,84				
E-55	153,32	35,03	35,03				
E-56	151,39	37	37,00				
E-57	155,35	35,25	35,25				
E-58	157,44	35,49	35,49				
E-59	155,26	36,69	36,69				
E-60	153,4	35,59	35,59				
E-61	151,9	34,39	34,39				
E-62	151,26	34,24	34,24				
E-63	148,28	34,1	34,10				
E-64	150,9	35,49	35,49				

Probe-Nr.	Lagerungsdichte dB (Trockenrohddichte)			Porenziffer ε			Porenvolumen PV berechnet	
	[g/cm ³]	Median Ø [g/cm ³]	Mittelw Ø [g/cm ³]	[-]	Median	Mittelw	[%]	Ø [%]
13.11.2013								
E-33	1,60	1,59	1,59	0,66	0,67	0,67	39,78	40,17
E-34	1,56			0,70			41,06	
E-35	1,57			0,69			40,65	
E-36	1,57			0,69			40,79	
E-37	1,58			0,67			40,24	
E-38	1,56			0,69			40,99	
E-39	1,58			0,68			40,31	
E-40	1,59			0,67			39,99	
E-41	1,62			0,63			38,79	
E-42	1,60			0,66			39,78	
E-43	1,62			0,64			38,92	
E-44	1,59			0,67			40,00	
E-45	1,57			0,69			40,69	
E-46	1,57			0,69			40,85	
E-47	1,59			0,67			40,06	
E-48	1,60			0,66			39,81	
E-49	1,53	1,52	1,52	0,73	0,74	0,74	42,25	42,46
E-50	1,52			0,75			42,74	
E-51	1,52			0,74			42,56	
E-52	1,51			0,75			43,00	
E-53	1,51			0,76			43,03	
E-54	1,52			0,74			42,60	
E-55	1,53			0,73			42,14	
E-56	1,51			0,75			42,87	
E-57	1,55			0,71			41,38	
E-58	1,57			0,68			40,59	
E-59	1,55			0,71			41,41	
E-60	1,53			0,73			42,11	
E-61	1,52			0,74			42,68	
E-62	1,51			0,75			42,92	
E-63	1,48			0,79			44,05	
E-64	1,51			0,76			43,06	

Probe-Nr.	Luftpyknometer Hohlraumgehalt		
	13.11.2013	28.11.2013 (kf) 09.12.2013 (pF)	Median Ø [Vol-%]
E-33	58	55,00	55,63
E-34	59		
E-35	58		
E-36	59		
E-37	55		
E-38	56		
E-39	57		
E-40	53		
E-41	53		
E-42	53		
E-43	54		
E-44	56		
E-45	55		
E-46	55		
E-47	55		
E-48	54		
E-49	64		
E-50	63		
E-51	62		
E-52	62		
E-53	67		
E-54	62		
E-55	64		
E-56	59		
E-57	60		
E-58	58		
E-59	60		
E-60	60		
E-61	62		
E-62	60		
E-63	60		
E-64	60		