

# Die archäologische Aussagekraft von Phosphatprospektionen auf gedüngten landwirtschaftlichen Nutzflächen – eine Fallstudie im Gebiet Sievern (Ldkr. Cuxhaven)

*Christoph Weihrauch, Imke Brandt & Christian Opp*

**Zusammenfassung** – Zur Neubewertung einer Phosphatprospektion aus den 1990er Jahren wurden von 2011-2012 erneut Phosphatuntersuchungen im Umfeld von Sievern (Ldkr. Cuxhaven) durchgeführt. An drei Transekten von Bodenprofilen wurden die Gehalte schwerer und leichter löslicher Phosphate mit 12,1-molarer und mit 0,1-molarer Salzsäure bestimmt. Dabei bestätigte sich das bereits in der älteren Analyse festgestellte räumliche Verteilungsmuster von höheren Phosphatanreicherungen im Westen und geringen im Osten des Untersuchungsgebietes. Der Großteil der Flächen ist jedoch maximal mittelstark mit Phosphat angereichert, so dass nicht auf großflächig intensive vormittelalterliche Besiedlung geschlossen werden kann. Es zeichnen sich nur einzelne Bereiche mit sehr hohen Phosphatgehalten ab. Die gemessenen Phosphatmengen bestehen allerdings zu durchschnittlich 47 % aus leichter löslichen Phosphaten, die wahrscheinlich der modernen Minereraldüngung entspringen. Die Phosphatbefunde im landwirtschaftlich intensiv genutzten Umfeld von Sievern besitzen daher nur eingeschränkt archäologische Aussagekraft und bedürfen eines modifizierten Analyseverfahrens. Durch die Beprobung der Bodenprofile in regelmäßigen vertikalen Abschnitten von 5 cm konnte zudem belegt werden, dass rezent eingetragenes Phosphat in den sandigen Böden oft bis in 40-80 cm Tiefe verlagert wird. Bei der in den 1990er Jahren gewählten Probenentnahme unterhalb der Pflugschleife wurden also wahrscheinlich stark mit rezentem Phosphat angereicherte Profilschnitte untersucht. Die damals gezogenen Schlüsse sind daher kritisch zu sehen.

**Schlüsselwörter** – Archäologie; Prospektion; Phosphatprospektion; Phosphatkartierung; Phosphatlöslichkeit; Phosphatanreicherung; Phosphor; Pflughorizont; Dünger; Sievern (Lkr. Cuxhaven)

**Title** – The archaeological value of soil phosphate prospections in artificially fertilized areas – a case study in the area of Sievern (county of Cuxhaven)

**Abstract** – For a reassessment of a soil phosphate prospection from the 1990s new phosphate analyses were carried out in the area of Sievern (county of Cuxhaven) in 2011-2012. Three transects of soil profiles were sampled for the determination of slightly and easily soluble phosphates with 12.1- and with 0.1-molar hydrochloric acid. It was verified that higher phosphate contents occur in the west and low contents in the east of the study area. Except for few spots highly enriched with phosphate, the local soils mostly show no to mediocre increases not indicating extensive pre-medieval settlement over a vast area. Furthermore, the measured phosphate amounts include on average 47 % of easily soluble phosphates probably stemming from modern fertilization. Therefore phosphate contents in the agriculturally intensively used area of Sievern are only of reduced archaeological significance and they demand a modified analytic procedure. By sampling soil profiles in vertical steps of 5 cm it was furthermore shown, that in the local sandy soils phosphates can be translocated to depths of 40-80 cm. The sampling underneath the plough layer carried out in the 1990s may thus have led to investigating soil horizons heavily enriched with modern phosphates. The conclusions drawn from these data therefore have to be seen critically.

**Key words** – archaeology; archaeological prospection; soil phosphate prospection/mapping; soil phosphate solubility; soil phosphate fortification; phosphorus; plough layer; fertilizer; Sievern (county of Cuxhaven)

## Einleitung

Im Zuge menschlicher Nutzungen gelangt Phosphat (z. B. in Speiseresten, Abfällen, Exkrementen; LORCH, 1940, 637; JUNGSMANN, 2002, 485) in den Boden und wird dort chemisch gebunden. Dadurch erhöht sich der Phosphatgehalt des Bodens langfristig (HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 301f; ZÖLITZ, 1983, 35; JAKOB, 1955, 69). Bei Phosphatprospektionen versucht man solche erhöhten Phosphatmengen zu lokalisieren und die ihnen zugrundeliegenden menschlichen Aktivitäten zu rekonstruieren. Einen Problemfall für solche Untersuchungen stellen moderne<sup>1</sup> Landwirtschaftsflächen dar. Diese wurden durch Mineraldünger oft über Jahrzehnte mit Phosphat angereichert.<sup>2</sup> Dadurch übersteigen die jüngeren Nährstoffmengen archäologische Phosphatbefunde oft um ein Vielfaches und erschweren deren Identifikation und Deutung (KONDRATIUK &

BANASZUK, 1993, 145; ZÖLITZ, 1983, 54; LORCH, 1939, 8).

Das ist insbesondere dann problematisch, wenn die Bodenproben für eine Phosphatprospektion oberflächennah entnommen werden. Das künstlich zugeführte Phosphat findet sich vornehmlich in den Pflughorizonten, die es durch höhere Humusgehalte besser binden können (ZÖLITZ & HEINRICH, 1990, 391; ZÖLITZ, 1986, 455).<sup>3</sup> Um diese rezenten Einträge zu umgehen, könnte man die Bodenproben für Phosphatprospektionen also deutlich tiefer entnehmen (GEBHARDT, 1984, 101; ZÖLITZ, 1983, 54; SJÖBERG, 1976, 450; PROVAN, 1971, 40).<sup>4</sup> Das ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn sich die archäologisch relevanten Kulturschichten ebenfalls unterhalb der Pflughorizonte befinden. Da das nicht immer der Fall ist, sind Phosphatprospektionen auf Landwirtschaftsflächen mit besonderen inhaltlichen Risiken behaftet. Im Folgenden wird dies an einem Fall-

beispiel aus Niedersachsen illustriert und ein verändertes Verfahren zum Umgang mit rezent überprägten Flächen vorgestellt.

### Untersuchungsgebiet und Forschungsstand

Das Umfeld von Sievern (Ldkr. Cuxhaven; **Abb. 1**) markiert die Grenze zwischen Geest und Marschland im nordwestdeutschen Küstengebiet. Die Gemarkungen Sievern und Holßel spielen in der

archäologischen Forschung zur lokalen Siedlungsgeschichte des 1. Jahrtausends n. Chr. seit Langem eine herausragende Rolle (zusammenfassend AUFDERHAAR, 2014; AUFDERHAAR U. A. 2011). Hier liegen auf engstem Raum zwei eisen- bzw. kaiserzeitliche und eine mittelalterliche Befestigungsanlage (Heidenschanze, Heidenstadt und Pipinsburg), in deren unmittelbarer Umgebung mehrere Depotfunde mit goldenen Votivgaben entdeckt worden sind. Besondere Beachtung erfahren vor allem die mittlerweile 14 Goldbrakteaten, die aus den Ge-



**Abb. 1** Lage des Untersuchungsgebietes bei Sievern (Ldkr. Cuxhaven) und Positionen der untersuchten Bodenprofile (Punkte mit Nummern).

markungen Sievern und Holßel stammen und vermutlich vor Ort hergestellt worden sind. Gezielte archäologische Prospektionsmaßnahmen haben im vergangenen Jahrzehnt im näheren Umfeld der drei Burgen zur Lokalisierung mehrerer Siedlungen und möglicher Bootslandeplätze geführt. Daher wird angenommen, dass der Raum Sievern während des ersten nachchristlichen Jahrtausends zumindest zeitweise zentralörtliche Funktion für weite Teile des Elbe-Weser-Dreiecks besaß, u. a. als Kultplatz und Herrschaftssitz (AUFDERHAAR, 2014, 402).

Zur weiteren Erforschung des Umfeldes von Sievern führte das Niedersächsische Institut für historische Küstenforschung (NIhK) bereits von 1998-2000 auf 9,7 km<sup>2</sup> eine Phosphatprospektion durch (ZIMMERMANN, 2011, 183-185). Damals wurden in den untersuchten Böden Werte zwischen 17 und 3.264 ppm Phosphor<sup>5</sup> (P) gemessen. Über die Hälfte der untersuchten Fläche (5,6 km<sup>2</sup>) wies Nährstoffgehalte >200 mg P/kg Boden auf, die als stark erhöht gedeutet wurden. Werte zwischen 400-600 mg P/kg Boden betrachtete man als „außerordentlich hoch“ (ZIMMERMANN, 2011, 184). Extreme Phosphoranreicherungen >1.000 mg P/kg Boden traten im Untersuchungsgebiet dagegen selten auf.

Stark erhöhte P-Gehalte konzentrierten sich vornehmlich im Westen des untersuchten Gebietes, während im Osten eher niedrige Werte erfasst wurden. Die Grenze zwischen beiden Bereichen verläuft auf einem etwa nord-südlich orientierten Geestrücken. Zimmermann (2011, 185) konnte viele große, stark mit Phosphor angereicherte Flächen nicht durch mittelalterliche und rezente Nutzungen erklären. Die anhand der Phosphatprospektion erstellte Karte (ZIMMERMANN, 2011, 184, Abb. 4) impliziert daher die Interpretation eines vormittelalterlich großflächig intensiv genutzten Siedlungsraumes.

Weitere Untersuchungen im Umfeld von Sievern erbrachten jedoch widersprüchliche Resultate zu den Phosphatdaten der Prospektion aus den 1990er Jahren. Daher wurden 2011-2012 in Zusammenarbeit des NIhK und des Fachbereichs Geographie der Philipps-Universität Marburg die damaligen Prospektionsergebnisse überprüft und neu interpretiert.

### Vorüberlegungen zur Probenentnahme

Die neuen Untersuchungen zielten nicht auf das Lokalisieren archäologischer Strukturen, sondern darauf die Ergebnisse der Analyse aus den 1990er Jahren einzuordnen. Deshalb wurde das Untersuchungsgebiet nicht rasterhaft beprobt (WEIHRAUCH, 2015, 2, Abb. 1; ZIMMERMANN, 2011, 183), sondern anhand von drei ost-westlich verlaufenden Rei-

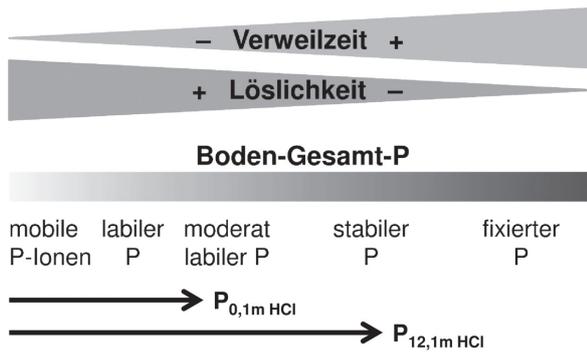
hen (Transekten) aus je fünf Bodenprofilen. Diese wurden so über das Gelände verteilt, dass ihre Ergebnisse auf die in den 1990er Jahren bearbeitete Fläche übertragbar sind. Den Ergebnissen der älteren Phosphatprospektion entsprechend umfasst jedes Transekt Profile in den Gebieten mit hoher (Westen) und mit niedriger Phosphatanreicherung (Osten) sowie im Übergangsbereich dazwischen (vgl. Abb. 1).

In der älteren Analyse wurde an jedem Bohrpunkt eine Bodenprobe „[...] deutlich unter der heutigen Pflugsohle [...]“ (ZIMMERMANN, 2011, 183) entnommen. So sollten die modern gedüngten Bodenbereiche ausgespart werden. Das Infiltrationsverhalten chemischer Stoffe in Böden wird maßgeblich von der Korngrößenverteilung bzw. dem Porenraum der Böden beeinflusst (BLUME U. A., 2010, 232f.). Sandige Böden weisen eine bessere Wasserwegsamkeit als Ton- und Lehm Böden auf. Deshalb ist die vertikale Verlagerung von Stoffen in grobkörnigen Böden sowohl an Teilchen gebunden als auch gelöst nicht grundsätzlich zu vernachlässigen (BLUME U. A., 2010, 420; AMBERGER, 1996, 196; ZÖLITZ, 1983, 52f.). Weil im Gebiet um Sievern meist Sande und Sandlehme vorliegen, wurden die Proben für die neuen Untersuchungen aus jedem Bodenprofil in regelmäßigen vertikalen Abständen von 5 cm entnommen. So kann die Verteilung der Phosphate in die Tiefe hin besser beurteilt werden als anhand einer einzigen Probe.

### Vorüberlegungen zur Labormethodik

Der im Boden enthaltene Phosphor bzw. seine Salze, die Phosphate, können einmal nach ihrer Bindungsart differenziert werden (z. B. in Eisen-Phosphate, organische oder anorganische Phosphate; BLUME U. A., 2010, 413-418; HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 303-305). Andererseits kann man sie auch nach ihrer Bindungsstärke unterscheiden. Diese äußert sich in unterschiedlicher Löslichkeit der Phosphate in Chemikalien. Stark gebundene Phosphate lösen sich dabei deutlich schwerer als schwach gebundene und sind folglich schlechter für Pflanzen verfügbar (BLUME U. A., 2010, 418; FINCK, 2007, 105; HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 303-305).

Für archäologische Fragestellungen ist die Einteilung der Phosphate gemäß ihrer Löslichkeit sinnvoll. Schließlich geht man davon aus, dass Phosphate zunehmend stärkere Bindungen eingehen, je länger sie sich in Böden befinden (Abb. 2; HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 302). Folglich könnte man unter idealen Bedingungen sehr schwer lösliche Phosphate als älter ansprechen, leicht lösliche hingegen als eher rezent (DUNCAN, 2000, 256). Durch eine Labormethodik, die



**Abb. 2** Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Phosphorlöslichkeit und -verweilzeit in Böden sowie Zuordnung der untersuchten Phosphorfraktionen. (Genaue Mengenanteile sind standort- und bodenabhängig.)

„ältere“ und „jüngere“ Phosphate getrennt voneinander erfasst, wäre es möglich, die Überprägung archäologischer Phosphat-Befunde durch rezente Einträge abzuschätzen. Dafür muss das klassische Verfahren der Phosphatprospektion modifiziert werden. Gewöhnlich führte man nur eine Extraktion an jeder Bodenprobe durch, wobei meist eine starke Säure zum Mobilisieren schwer löslicher Phosphate eingesetzt wurde (HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 310-312, 314). Ein solches Aufschlussverfahren erfasst kumuliert auch die weniger stark gebundenen Phosphate, ohne dass es bemerkt werden kann (vgl. **Abb. 2**). Um diesen Mangel zu beheben, wird in der hier vorgestellten Untersuchung eine zusätzliche Extraktion durchgeführt. Diese soll gezielt leichter lösliche und somit vermutlich jüngere Phosphate erfassen. Dabei wurde angestrebt, nicht nur pflanzenverfügbare Phosphate, sondern auch einen Teil der inzwischen bereits stärker gebundenen Überschüsse aus der rezenten Mineraldüngung zu extrahieren. Aus diesem Grund wurden nicht die geläufigen Verfahren zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats genutzt (z. B. Aufschluss mit Calcium-Acetat-Lactat/CAL; SCHÜLLER, 1969).

Für den entsprechenden Aufschluss wurde 1 g luftgetrockneten, gemörserten und auf 2 mm Korngröße gesiebten Bodens mit 25 ml 0,1-molarer Salzsäure (HCl) versetzt, kurz aufgeschwenkt und anschließend für 24 h im abgedeckten Gefäß abgestellt<sup>6</sup>. Danach wurde das Extrakt durch Blaubandpapier filtriert. Dieser Aufschluss wurde experimentell an sechs Bodenprofilen

	1) P <sub>12,1m HCl</sub>	2) P <sub>0,1m HCl</sub>	1) - 2)	% P <sub>0,1m HCl</sub>
n	304	106	106	100
Min	<5,5	<5,5	<5,5	7
Max	2310	1155	1223	88
MW	471	347	408	47
Median	248	339	314	46

**Abb. 3** Statistische Daten zu den untersuchten Phosphorfraktionen und -parametern (MW = Mittelwert).

(106 Proben) bei Sievern durchgeführt.<sup>7</sup>

In einer zweiten Extraktion wurden dann die archäologisch aussagekräftigen, stark gebundenen Phosphorverbindungen gelöst. Dazu nutzte man in der älteren Phosphatprospektion in Sievern das „Glühaufschlussverfahren“ nach Bleck (1965, 215-217). Das Bodenmaterial wurde bei 800°C geglüht und dann mit Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) versetzt.<sup>8</sup> Bei den neuen Phosphatuntersuchungen wurde konzentrierte HCl verwendet, die auch zu den starken Säuren gehört, aber weniger Stoffe löst als HNO<sub>3</sub>. Folglich sind geringere Ergebniswerte zu erwarten als in der Analyse aus den 1990er Jahren.

304 Bodenproben wurden vorbereitend luftgetrocknet, gemörsert und auf 2 mm Korngröße gesiebt. Ein Gramm jeder Probe wurde dann für 2h bei ca. 100°C in 25 ml 12,1-molarer HCl gekocht und anschließend filtriert. Nach Farbreaktion der Extrakte mit Ammoniummolybdat erfolgte die Messung ihrer Phosphatgehalte bei 700 nm am Spektralphotometer (Fa. Philipps PU 8620). Die Ergebnisse wurden dann von der Phosphatkonzentration (ppm PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in den Massegehalt an Phosphor (mg P/kg Boden) umgerechnet (WEIHRAUCH, 2015, 8). Die beiden Fraktionen werden vereinfacht nach dem Extraktionsmittel als P<sub>0,1m HCl</sub> und P<sub>12,1m HCl</sub> benannt. In beiden Fällen beträgt die untere Bestimmungsgrenze 5,5 mg P/kg Boden.

### Gemessene Phosphorgehalte

Mit 12,1-molarer HCl wurden im Umfeld von Sievern Phosphorgehalte zwischen <5,5-2.310 mg P/kg Boden gemessen. Der Durchschnitt liegt bei 471 mg P/kg Boden, der Median bei 248 mg P/kg Boden (**Abb. 3**). Der Wertebereich ist erwartungsgemäß niedriger als in der älteren Analyse, wo mit der stärkeren HNO<sub>3</sub> gearbeitet wurde.

Durch Phosphatprospektionen kann man feststellen, wie viel Phosphat im Boden vorhanden ist und welche Menge davon den natürlichen Gehalt übersteigt. Hohe Phosphatwerte können aus intensiverer Nutzung resultieren (JAKOB, 1955, 77), geringe spiegeln hingegen schwache bis keine anthropogene Beeinflussung wider. Jedes Entnahmegbiet ist spezifisch in Bezug auf seinen natürlichen Phosphatgehalt und die Bodenparameter, die das Anreicherungsverhalten beeinflussen. Der natürliche, nicht durch menschliches Zutun veränderte Phosphorgehalt der Böden im Umfeld von Sievern beträgt anhand der Häufigkeit der Messwerte bis 175-200 mg P/kg Boden (**Abb. 4**). Gebhardt (1984, 101) nannte für vergleichbare Flächen im Geestgebiet Gehalte bis 150-200 mg P/kg Boden. In der Prospektion aus den 1990er Jahren wurden hinge-

gen Werte zwischen 20 und 50-60 mg P/kg Boden als natürlich bezeichnet (ZIMMERMANN, 2011, 184). Betrachtet man durchschnittliche Phosphorgehalte von Mineralböden (200-1.500 mg P/kg Boden; AMBERGER, 1996, 187), so erscheinen die damaligen Angaben als zu gering.

In den neuen Untersuchungen weisen 44% der untersuchten Proben natürliche Phosphatgehalte bis 200 mg P/kg Boden auf und werden folglich als nicht oder nur sehr schwach angereichert gedeutet (vgl. Abb. 4). 14% der Proben enthalten maximal das Doppelte des natürlichen Phosphatgehalts und können als schwach anthropogen angereichert gelten. 34% der Proben verzeichnen mittelstark erhöhte Werte (doppelter bis sechsfacher natürlicher Phosphatgehalt). Starke Anreicherungen (sechs- bis neunfacher natürlicher Phosphatgehalt) treten in nur 6% der hier präsentierten Stichprobe auf, enorm starke Anreicherungen (mehr als neunfacher natürlicher Phosphatgehalt) in 2% der Proben.

Gebhardt (1984, 101) interpretierte Flächen, die zwischen 200-800 mg/kg Boden mit Phosphor angereichert sind, als ehemalige Äcker (Celtic fields). Anreicherungen >800 mg P/kg Boden deutete er als Indiz für vormalige Siedlungen. Phosphoranreicherungen hängen jedoch stark von lokalen Standort- und Bodeneigenschaften ab. Sie sind in ihrer Dynamik noch nicht hinreichend erforscht (z. B. ZÖLITZ, 1980, 56). Darum bedarf Gebhardts Interpretationsschema lokaler Modifikationen (GEBHARDT, 1982, 7f). Vermutlich resultieren im Untersuchungsgebiet bei Sievern nur starke und sehr starke Anreicherungen aus intensiver Besiedlung.

### Leichter löslicher Phosphor

Der Aufschluss mit 0,1-molarer HCl erfasst einen deutlich leichter löslichen Teil des Bodenphosphats als der oben vorgestellte Aufschluss mit konzentrierter HCl. Ein Teil des leichter löslichen Phosphats kann mittelbar von Pflanzen aufgenommen oder mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden (Bakkevig, 1980, 76). Der Rest bildet im Boden zunehmend schwerer lösliche chemische Verbindungen (Amberger, 1996, 188, 202). Daher findet man in nicht durch übermäßige Feuchte geprägten Böden keine allzu großen Mengen an leichter löslichem Phosphat (JAKOB, 1955, 69).

Im Umfeld von Sievern wurden jedoch Werte mit einer ungewöhnlich hohen Spannweite (<5,5-1.155 mg P/kg Boden) gemessen (Abb. 5). Vermutlich werden die Daten für leichter lösliches Phosphat dadurch verzerrt, dass vornehmlich landwirtschaftlich genutzte Flächen darauf untersucht wurden. An Waldstandorten sind geringere Werte zu erwarten.

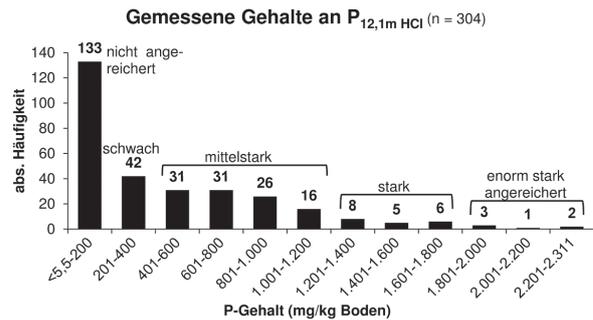


Abb. 4 Häufigkeitsverteilung der mit 12,1-molarer HCl gelösten Phosphorgehalte sowie Interpretation der Anreicherungsintensität.

20% der analysierten Proben verzeichnen bis 100 mg P/kg Boden. Das entspricht hier wahrscheinlich dem natürlichen Gehalt an leichter löslichem Phosphat. In 68% der Proben wird diese natürliche Menge sogar bis ca. um das Sechsfache überschritten, was auf anthropogene Einträge in die lokalen Böden hindeutet. Das erklärt den hohen Durchschnittswert von rund 347 mg P/kg Boden (Median: 339 mg P/kg Boden; vgl. Abb. 3). Der Häufigkeitsschwerpunkt liegt dabei in der Klasse 301-400 mg P/kg Boden (26% der Proben). Sehr hohe Gehalte an leicht löslichem Phosphor zwischen 601-1.155 mg P/kg Boden treten nicht regelmäßig auf (rund 12% der Proben). Sie könnten mit lokal erhöhter Bodenfeuchte zusammenhängen, die zur Mobilisierung ursprünglich stärker gebundener Phosphate führen kann. Ebenfalls können sie auf punktuellen besonders hohen Phosphateinträgen basieren.

### Rezente Überprägung von Phosphatbefunden

Der Anteil des leichter löslichen Phosphats am mit konzentrierter HCl gelösten Phosphat gibt an, wie stark die Phosphatbefunde im Umfeld von Sievern rezent überprägt wurden.<sup>9</sup> Abb. 6 zeigt, dass

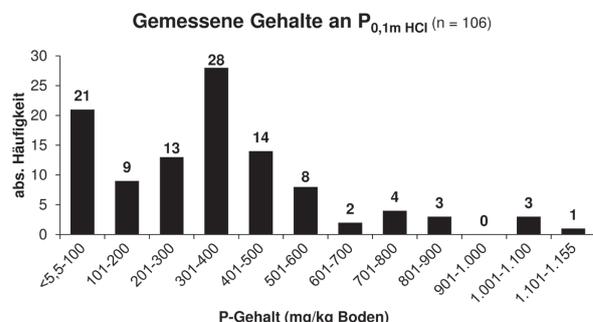
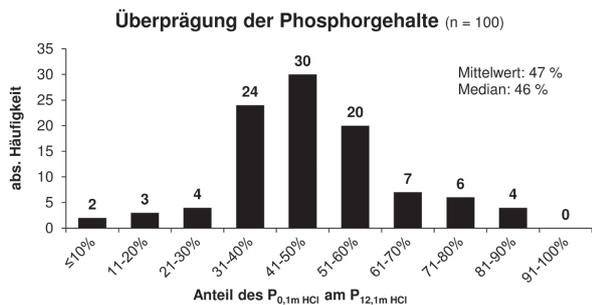


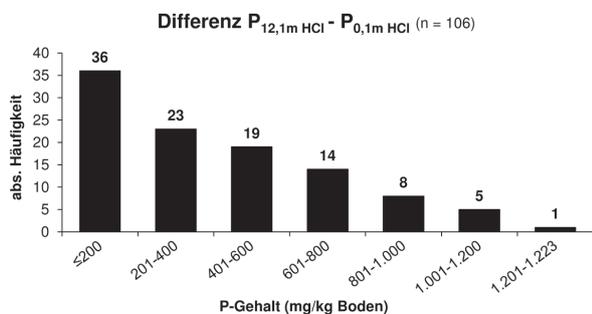
Abb. 5 Häufigkeitsverteilung der mit 0,1-molarer HCl gelösten Phosphorgehalte.



**Abb. 6** Häufigkeitsverteilung der Anteile mit 0,1-molarer HCl gelösten Phosphors am mit 12,1-molarer HCl gelösten Phosphor als Parameter der neuzeitlichen Überprägung von Phosphorbefunden.

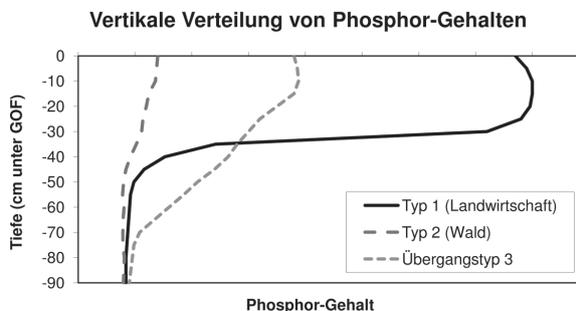
die in Böden sonst eher gering vertretene Fraktion leichter löslicher Phosphate im Untersuchungsgebiet meist relativ große Teile des Gesamtposphats umfasst. 9% der untersuchten Proben enthalten bis 30% leicht löslichen Phosphor, in 74% der Proben befinden sich 31-60%. 17% der Proben weisen sogar 61-90% leicht löslichen Phosphor auf. Der Großteil der untersuchten Flächen wurde also relativ stark durch jüngere Einträge leicht löslicher Phosphate überprägt. Damit sind durchschnittlich 47% des mit starken Säuren extrahierten Phosphats im Umfeld von Sievern nicht archäologisch relevant. Aufgrund ihrer großen Mengen und noch leichten Löslichkeit sind sie vermutlich das Ergebnis intensiver moderner Mineraldüngung. Die höchsten Anteile leicht löslicher Phosphate weisen die inzwischen als Grünland genutzten Standorte 239 (durchschnittlich 57%) und 238 (52%) sowie die Profile 244 und 242 auf (Äcker; 54 und 49%). Die geringsten Werte verzeichnen Profil 229 (Wald; 32%) und Profil 243 (Acker; 39%).

Zieht man vom mit konzentrierter HCl extrahierten Phosphor den archäologisch kaum aussagekräftigen leichter löslichen Phosphor ab, so bleibt der schwerer lösliche Anteil des Bodenphosphats übrig. Dieser befindet sich vermutlich schon länger im Boden und kann archäologisch relevant sein (HOLLIDAY



**Abb. 7** Häufigkeitsverteilung des archäologisch aussagekräftigen Phosphors, gebildet als Differenz des mit 12,1-molarer HCl und des mit 0,1-molarer HCl gelösten Phosphors.

& GARTNER, 2007, 313, 326). Im Umfeld von Sievern wurden Gehalte zwischen  $<5,5-1.223\text{ mg P/kg Boden}$  festgestellt (vgl. Abb. 3, 7). Der Durchschnitt beträgt 408, der Median rund 314 mg P/kg Boden. Die große Spannweite der Messwerte sowie der den natürlichen Phosphorgehalt übersteigende Mittelwert und Median zeigen an, dass im Untersuchungsgebiet archäologisch relevante anthropogene Phosphoranreicherungen existieren. 56% der Proben weisen keine bis geringe Anreicherungen bis 400 mg P/kg Boden auf. 43% zeigen mittelstark erhöhte Nährstoffgehalte. Lediglich 1% der Proben ist stark anthropogen mit Phosphor angereichert. Menschliche Nutzungen sind folglich für große Teile des Untersuchungsgebietes anzunehmen. In der Regel bewirkten sie aber nur geringe bis mittelstarke Phosphatanreicherungen in den Böden. Intensive Aktivitäten zeichnen sich jedoch nicht flächendeckend ab, sondern lokal und sehr verstreut.



**Abb. 8** Typische Entwicklung von Phosphorgehalten in die Tiefe hin und ihr Zusammenhang mit rezenter Landnutzung (GOF = Geländeoberfläche).

### Vertikale Verteilung der Phosphatgehalte

Um die Verlagerung von Phosphaten in die Tiefe zu untersuchen, wurden die untersuchten Profile in regelmäßigen vertikalen Abständen beprobt. Es lassen sich drei Typen von Vertikalkurven des mit konzentrierter HCl extrahierten Phosphats unterscheiden (Abb. 8). Typ 1 tritt auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen im Westen des Untersuchungsgebietes auf. Er zeichnet sich durch eine Zweiteilung des Bodenprofils aus. Über einem wenig Phosphat enthaltenden Tiefenbereich ohne anthropogene Nährstoffanreicherungen folgt ein meist stark mit Phosphat angereicherter oberer Profilabschnitt. Der Übergang zwischen beiden Bereichen erfolgt in etwa 20-40 cm Tiefe, wo sich die Pflugsohlen befinden. Die starke Phosphatanreicherung im oberen Profilabschnitt wird auf langfristig hohe Einträge von Düngemitteln und/oder tierischen Exkrementen zurückgeführt. Dem Typ 1 werden die Profile 211, 212 (Weiden, vormals evtl. Ackernutzung), 240 und 241 (Äcker) zugeordnet.

Phosphatkurven vom Typ 2 findet man an Waldstandorten im Osten des Untersuchungsgebietes. Sie weisen einen nahezu vertikalen Verlauf auf (vgl. Abb. 8). Die Profile enthalten durchgehend geringe Phosphatgehalte und sind in den oberen Abschnitten höchstens schwach mit dem Nährstoff angereichert. Menschliche Einflüsse auf die Phosphatgehalte sind kaum nachweisbar. Es handelt sich um die Profile 234-236.

Die meisten Profile gehören jedoch dem Übergangstyp 3 an. Die entsprechenden Kurven zeigen oft geringere Phosphatgehalte als die vom Typ 1. Im Vergleich zum Typ 2 weisen sie aber stärkere Unterschiede zwischen den Phosphormengen im Untergrund und jenen der durch Düngung beeinflussten Profilmbereiche auf. Besonders hohe Phosphatgehalte und entsprechend starke Differenzen zwischen Ober- und Unterböden treten auf Äckern (Profile 242-245) und Grünlandstandorten (Profil 239) im Westen des Untersuchungsgebietes auf. Weiterhin findet man den Übergangstyp 3 auch bei den Profilen 229 (Wald, vormals evtl. Ackernutzung) und 238 (Grünland, vormals evtl. Ackernutzung), in schwacher Ausprägung auch bei Profil 237 (Wald) im Osten des Untersuchungsgebietes. Der von der Geländeoberfläche her erhöhte Phosphatgehalt dieser Kurven impliziert, dass die entsprechenden Standorte in der Vergangenheit landwirtschaftlich genutzt worden sind.

Anthropogen erhöhte Gehalte schwer und leicht löslicher Phosphate findet man vorwiegend in den oberen, stofflich durch die Landwirtschaft geprägten Profilmereichen (Abb. 9-11). Es muss jedoch betont werden, dass diese Profilmereiche bezüglich ihrer Tiefe nicht den Pflughorizonten entsprechen. Die Pflugtiefe beträgt in der Regel 20-30 cm. Die stofflichen Auswirkungen intensiver Phosphatdüngung sind jedoch oft bis in 40-80 cm Tiefe nachweisbar. Dort findet man die größten Mengen an leichter löslichen Phosphaten. Wahrscheinlich wurden sie bei der Infiltration des Bodenwassers in den sandigen Böden vertikal bis in diese Tiefen verlagert (ZÖLITZ, 1983, 52; KIEFMANN, 1980, 402).

### Archäologisch relevante Phosphatbefunde

Nach Abzug des leichter löslichen vom mit konzentrierter HCl extrahierten Phosphat wurden die entsprechenden sechs Profile hinsichtlich ihrer archäologischen Relevanz untersucht. Sehr diskontinuierliche Kurvenverläufe und starke Peaks im Untergrund können Indizien für entsprechende Befunde sein.

Auch die Kurven der Differenz zwischen beiden P-Arten (vgl. Abb. 9-11, Profile 229, 238, 239,

242-244) sind stark durch die rezente landwirtschaftliche Nutzung von der Geländeoberfläche her geprägt. Die meisten Profile weisen in den oberen Dezimetern Nährstoffanreicherungen auf.

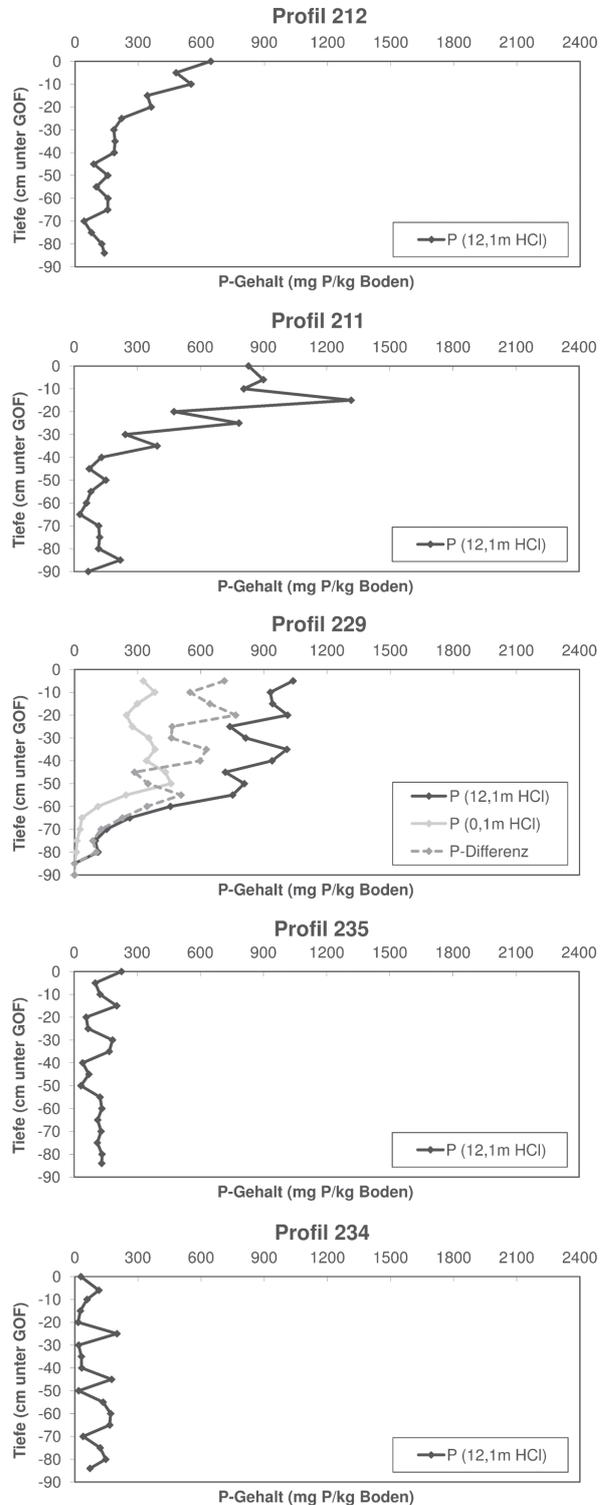


Abb. 9 Phosphatgehalte im Transekt 1  
(P-Differenz =  $P_{12,1m\ HCl} - P_{0,1m\ HCl}$ ).

Bis 40 cm Tiefe kann es sich hierbei um jüngere Anreicherungen im Zuge intensiver moderner Düngung handeln. Auch Kumulationseffekte sind denkbar, bei denen (prä-)historisches mit jün-

gerem Phosphat summiert wurde. Daher ist die archäologische Aussagekraft der Phosphatpeaks in den Kurven von Profil 239 und 242 eingeschränkt. Für archäologische Folgeuntersuchungen interessant wären hingegen (in Abgleich mit der archäologischen Landesaufnahme) Profil 244 (prähistorische Siedlung), Profil 229 (Celtic fields) und Profil 243 (Streufund-Konzentration).

### Neuinterpretation der älteren Phosphatprospektion

Die in den 1990er Jahren untersuchten rund 10 km<sup>2</sup> im Umfeld von Sievern umfassen unterschiedliche Naturräume mit abweichenden Landnutzungen. Der Osten des Untersuchungsgebietes wird von Moorflächen dominiert. Daran grenzen im Westen Nadelforste, die auf einem Nord-Süd orientierten Geestrücker stocken. Westlich davon schließt Marschland an, das intensiv landwirtschaftlich genutzt wird. Im Kontext dieser standörtlichen Gliederung erscheint die Verteilung der bei der älteren Prospektion gemessenen Phosphatgehalte plausibel. Die früher im Westen des Gebiets festgestellten starken Phosphatanreicherungen gehen großenteils auf intensive moderne Mineraldüngung zurück. Das konnte nun anhand großer Mengen insbesondere leichter löslicher Phosphate in den oberen Profilbereichen nachgewiesen werden. Mögliche archäologische Befunde treten hingegen nur lokal auf. Allerdings kann die archäologische Relevanz wegen der starken Überprägung des Gebietes durch rezent eingetragenes Phosphat nur schwer beurteilt werden. Die extensiv genutzten Geestwälder im Osten zeigen entsprechend geringe Phosphatgehalte.

Dass die Bodenproben in den 1990er Jahren unterhalb der Pflugsohle entnommen worden sind, erscheint wegen der starken Phosphatanreicherung in den Pflughorizonten vernünftig. Allerdings ermöglichen die sandigen Böden im Umfeld von Sievern die Verlagerung von Nährstoffen teilweise noch bis in 80 cm Tiefe. Daher ist es wahrscheinlich, dass bei der älteren Analyse solche tief verlagerten, archäologisch nicht relevanten rezenten Phosphate mit erfasst wurden. Möglicherweise resultierte die Höhe der damals gemessenen Phosphatgehalte auch aus diesem Umstand. Dass die im Gebiet natürlich vorkommenden Phosphatgehalte mit 20-60 mg P/kg Boden sehr niedrig angesetzt wurden, führte zudem zu einer Überbewertung der Phosphatanreicherungen. Im Kontext der neuen Phosphatprospektion lässt sich eine intensive vormittelalterliche Nutzung des Untersuchungsgebietes (ZIMMERMANN, 2011, 184f) nicht belegen.

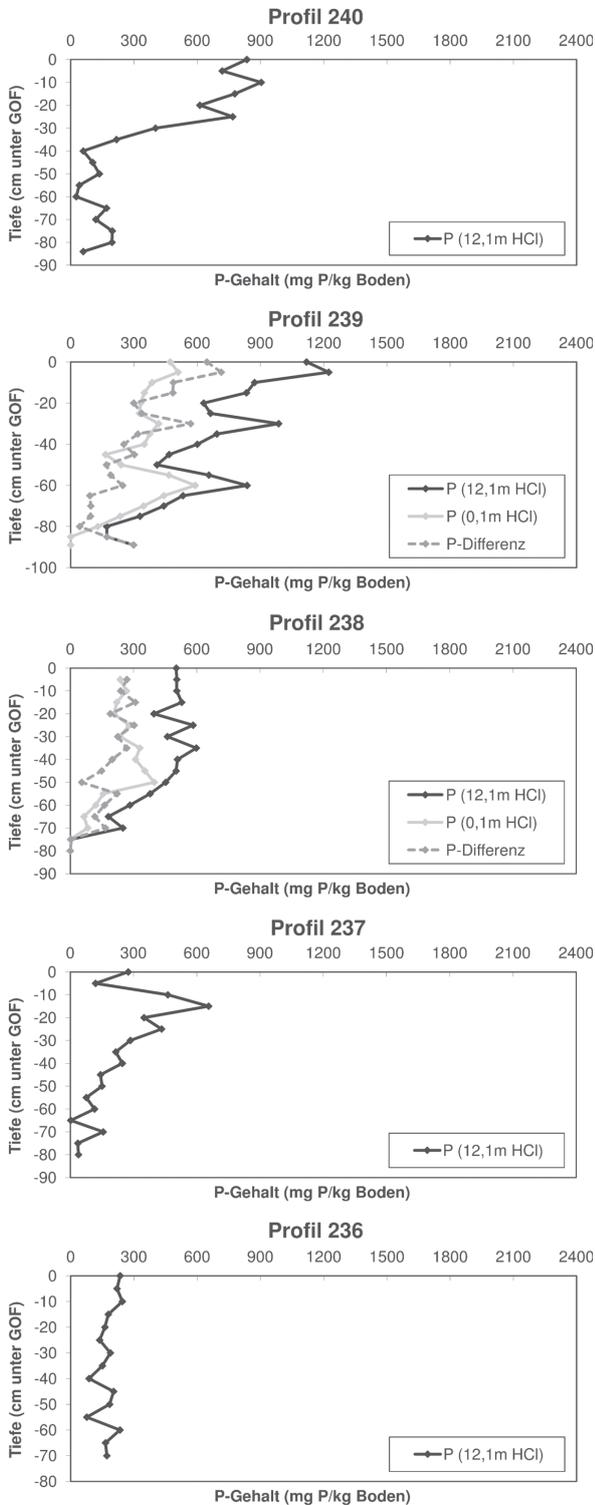


Abb. 10 Phosphatgehalte im Transekt 2  
(P-Differenz =  $P_{12,1m\ HCl} - P_{0,1m\ HCl}$ ).

### Diskussion der gewählten Methodik

Da es in den vorgestellten Untersuchungen primär um die Einordnung der älteren Phosphatprospektion ging, wurden bodenkundliche Sachverhalte nur am Rande thematisiert. So wurde bspw. das große und pedologisch heterogene Untersuchungsgebiet hinsichtlich seiner Phosphatgehalte eher cursorisch betrachtet. Die natürlichen Nährstoffmengen müssten nach Naturräumen, Standorttypen, evtl. auch nach Bodenhorizonten differenziert werden, um deren unterschiedliche Nutzungen, Sorptionseigenschaften und Verlagerungstendenzen zu berücksichtigen.

Auch der oben geschilderte Zusammenhang zwischen Phosphatlöslichkeit und der Verweilzeit von Phosphaten in Böden (vgl. Abb. 2) bedarf einiger Einschränkungen. Hierbei spielt die Löslichkeit der Phosphate zum Zeitpunkt ihres Eintrags eine wesentliche Rolle. Auf leicht lösliche Nährstoffe aus der Landwirtschaft lässt sich die Theorie anwenden. Rezent eingebrachte schwer lösliche Phosphate (z. B. aus Knochen) würden jedoch zeitlich falsch eingeordnet werden. Weiterhin ist das Bilden sukzessive schwerer löslicher Verbindungen im Boden keine „Einbahnstraße“ für Phosphate, sondern kann durch bestimmte Bodenbedingungen wieder umgekehrt werden (BLUME U. A., 2010, 418; HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 306, 325). In sehr feuchten Böden (z. B. Pseudogleye) werden schwer lösliche Nährstoffe wieder gelöst (BLUME U. A., 2010, 418; FINCK, 2007, 104; AMBERGER, 1996, 193). Auch Mikroorganismen und Pflanzen setzen durch die Abgabe von Enzymen und sogenannten Wurzelexsudaten stärker gebundene Nährstoffe frei (BLUME U. A., 2010, 398, 418; AMBERGER, 1996, 195). Die resultierenden leichter löslichen Phosphate können dann nicht als rezent eingeordnet werden. Nur der Umstand ihrer leichten Löslichkeit wäre rezent. Allerdings ist die zeitliche Dimension der Phosphatbindung noch nicht hinreichend erforscht. Es kann also nicht quantifiziert werden, wie schnell Phosphate von der pflanzenverfügbaren in eine schwer lösliche Fraktion übergehen und umgekehrt (AMBERGER, 1996, 188, 203; ZÖLITZ, 1980, 56f). Gelöste Phosphate sind leicht mit dem Gefälle und in die Tiefe verlagerbar. Deshalb sollten auch das Geländere relief und die Infiltration bestimmende Bodeneigenschaften bei Phosphatprospektionen berücksichtigt werden.

Auffallend hohe oder niedrige Phosphatgehalte müssen also nicht auf anthropogene Einflüsse zurückgehen, insbesondere nicht auf archäologisch relevante. Daher wurde an sechs Beispielprofilen experimentell ein zusätzlicher Aufschluss mit 0,1-molarer HCl erstellt. Er ermöglichte die

gesonderte Erfassung einer leicht löslichen und damit vermutlich relativ kurzfristig im Boden befindlichen Phosphatfraktion. Diese umfasst neben direkt pflanzenverfügbaren auch bereits etwas

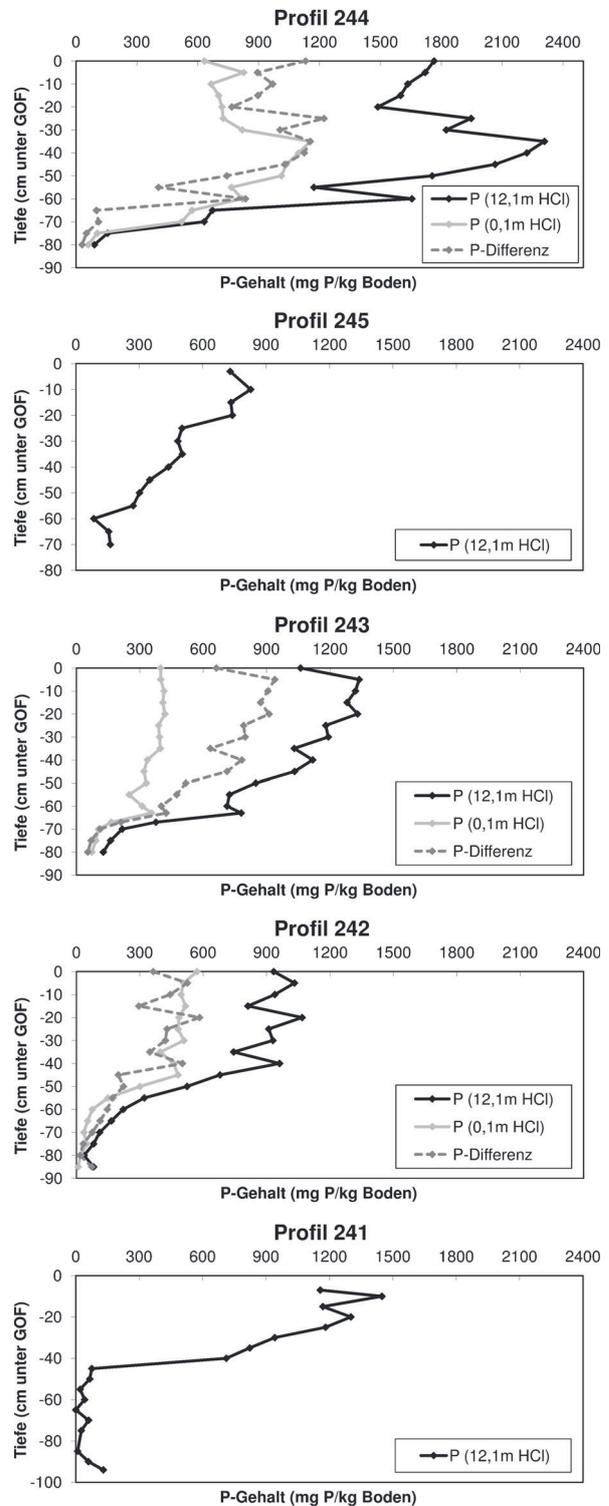


Abb. 11 Phosphatgehalte im Transekt 3  
(P-Differenz =  $P_{12,1m\ HCl} - P_{0,1m\ HCl}$ ).

stärker gebundene, mittelbar pflanzenverfügbare Phosphate, bei denen es sich um Überschüsse von Düngern handeln kann (AMBERGER, 1996, 203). Nicht von Pflanzen aufgenommene Düngerreste bilden jedoch zunehmend schwerer lösliche Verbindungen. Darum löst die 0,1-molare HCl nicht alle originär durch die moderne Düngung eingebrachten Phosphate, sondern nur den noch nicht stärker gebundenen Anteil davon. Der Aufschluss dient darum nur dem Abschätzen der rezenten Überprägung von Phosphatbefunden. Es ist jedoch nicht möglich, mit seiner Hilfe den genauen archäologisch interpretierbaren Anteil des Bodenphosphats zu berechnen. Zudem besitzt die mit 0,1-molarer HCl gelöste Phosphatfraktion selbst keine archäologische Relevanz, weil sie dynamisch auf Standort- und Bodenbedingungen reagiert (z. B. pH-Wert) und somit rezente Verhältnisse widerspiegelt (BLUME U. A., 2010, 418; HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 313; ZÖLITZ, 1980, 57; WOODS, 1977, 249; BLECK, 1976, 263; LORCH, 1941b, 93).<sup>10</sup>

## Zusammenfassung

Neue Phosphatuntersuchungen im Umfeld von Sievern bestätigen die Ergebnisse einer älteren Phosphatprospektion. Es wurden ebenfalls stark erhöhte Phosphatgehalte im Westen des Untersuchungsgebietes festgestellt, im Osten hingegen geringe. Die damals gezogenen Schlüsse können jedoch nicht übernommen werden. So wird nun der natürliche Phosphatgehalt des Untersuchungsgebietes bei maximal 200 mg P/kg Boden angesetzt, während die ältere Analyse lediglich von 20-60 mg P/kg Boden ausging (ZIMMERMANN, 2011, 184). Daraus ergeben sich in den neuen Untersuchungen andere Interpretationen der Phosphatwerte. Es wurden nun vorwiegend nicht bis mittelstark erhöhte Phosphatgehalte festgestellt. Sehr hohe Phosphatanreicherungen treten nur lokal auf (z. B. im Bereich der Profile 244, 243, 229, 239). Es handelte sich in der Vergangenheit daher offenbar hauptsächlich um agrarisch genutzte Flächen mit vereinzelt Siedlungen.

Durch die Erfassung von Bodenphosphaten verschiedener Löslichkeit ließen sich anhand von sechs Beispielprofilen Rückschlüsse auf die rezente Überprägung der Standorte ziehen. So enthielten gerade die stark mit Phosphat angereicherten Böden im Westen des Untersuchungsgebietes hohe Anteile vermutlich rezente eingetragener Nährstoffe. Sie werden auf die intensive moderne Mineraldüngung zurückgeführt. Die betroffenen Flächen sind landwirtschaftliches Nutzland, auf denen die Phosphate vornehmlich von der Geländeoberfläche her und in leicht

löslicher Form eingebracht wurden. Diese Nährstoffe werden in den lokalen, sandigen Böden bis in 40-80 cm Tiefe verlagert. Die bei der älteren Prospektion gewählte Probenentnahme unterhalb der Pflugschleife konzentrierte sich somit vermutlich auf diese stark rezent mit Phosphat angereicherten Profillbereiche. Folglich bilden die damals festgestellten sehr hohen Phosphatgehalte wahrscheinlich kein archäologisch relevantes Siedlungsmuster ab, sondern vielmehr die rezente Landnutzung. Entsprechend weisen die ungedüngten Waldflächen im Osten des Untersuchungsgebietes in allen Profiltiefen geringe Phosphatgehalte auf.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den neuen Untersuchungen auf das gesamte Umfeld von Sievern muss in zukünftigen Nachforschungen überprüft werden. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass landwirtschaftliche Nutzflächen kein grundsätzliches Tabu für Phosphatprospektionen darstellen. Sie bedürfen allerdings einer differenzierten Methodik und Interpretation.

## Anmerkungen

<sup>1</sup> Die im Folgenden als „moderne“ oder „rezente“ Düngung bezeichneten Praktiken beziehen sich auf den Einsatz künstlich hergestellter Mineraldünger, die in Deutschland ab den 1840er Jahren, in verstärktem Maße ab den 1880er Jahren genutzt wurden (FINCK, 1979, 25).

<sup>2</sup> Kulturpflanzen nehmen durchschnittlich 15% des in einem Jahr eingebrachten Düngerphosphats auf, in allen folgenden Jahren durchschnittlich noch 1-2% davon (FINCK, 2007, 163). Durch intensive Mineraldüngung, deren Höhepunkt in Deutschland zwischen 1970-1980 lag, wurde Böden daher mehr Phosphor zugegeben, als die Pflanzen aufnahmen (Überschussdüngung; BLUME U. A., 2010, 413, 420). Die überschüssigen Phosphate bildeten sukzessive stärker gebundene chemische Verbindungen und erhöhten den Phosphatgehalt der Böden (ZÖLITZ & HEINRICH, 1990, 392). Seit 1980 wurden die jährlich ausgebrachten Düngermengen reduziert, wodurch die Phosphorüberschüsse um ca. 80% sanken (Erhaltungsdüngung; BLUME U. A., 2010, 420; ZÖLITZ & HEINRICH, 1990, 392).

<sup>3</sup> Allerdings wurden inzwischen vor allem auf sandigen Böden auch im tieferen Untergrund durch Dünger verursachte Phosphatanreicherungen nachgewiesen (BLUME U. A., 2010, 420).

<sup>4</sup> Gebhardt (1982, 7) wählte eine Entnahmetiefe von 25-40 cm, weil er die vertikale Verlagerung von Düngerphosphaten mengenmäßig für vernachlässigbar hielt. Zölitz & Heinrich (1990, 394) sprechen hingegen von 40-60 cm. Jungmann (2002, 490) entnahm die Proben sogar in 90 cm Tiefe.

<sup>5</sup> In Analogie zu Gebhardt (1976, 91) verwendet Zimmermann (2011) die Einheit ppm P und meint damit mg P/kg Boden. Obwohl die Analyseverfahren Phosphat bestimmen, können die Werte anhand konstanter Faktoren in Phosphor (P) umgerechnet werden (WEIHRACH, 2015, 8).

<sup>6</sup> Aufschlüsse leichter löslicher Phosphate werden sonst in der Regel mehrere Stunden maschinell geschüttelt (z. B. SCHÜLLER, 1969, 59f; BLUME U. A., 2011, 106). Da in den hier

vorgestellten Untersuchungen eine geringe Bodeneinwaage sowie ein weites Verhältnis zwischen Einwaage und Säurevolumen (1 g : 25 ml) gewählt wurden, konnten die Komponenten auch ohne Schütteln in Kontakt und zur Reaktion gebracht werden.

<sup>7</sup> Bei vergleichenden Untersuchungen an landwirtschaftlich genutzten Kolluvialbraunerden aus lösslehmhaltigen Solifluktuionsdecken in Mittelhessen (KUSSEROW, 2015; n = 54) erbrachte die Extraktion mit 0,1-molarer HCl durchschnittlich 53,5% höhere Phosphatgehalte als der CAL-Aufschluss für pflanzenverfügbares Phosphat nach Schüller (1969). Die vertikale Verteilung der besonders in den Pflughorizonten lokalisierten Mineraldünger-überschüsse konnte ebenfalls mit 0,1-molarer HCl besser nachgezeichnet werden (KUSSEROW, 2015, 43, 47).

<sup>8</sup> Das Verfahren beschrieb Lienemann (1989, 86). Es extrahiert je nach den lokalen Bodeneigenschaften unterschiedliche Mengen des Gesamtphosphates. Kiefmann (1975; nach GEBHARDT, 1976, 98) spricht von einer Ausbeute von 70-90%, Zimmermann (2008, 123) von >95% des Gesamtphosphates. Wahrscheinlich überschätzte Letzterer damit diesen Aufschluss, weil er ihn hauptsächlich auf sandigen Böden nutzte. In feinkörnigeren, stark humosen oder carbonathaltigen Böden ist jedoch von geringeren Extraktionsausbeuten auszugehen, insbesondere da die Proben durch das vorbereitende Glühen nachteilig beeinflusst werden können.

<sup>9</sup> Duncan (2000) verfährt ähnlich, differenziert Bodenphosphate aber danach, ob sie organisch oder anorganisch gebunden sind. Er legt zugrunde, dass Phosphate organisch in den Boden gelangen und mit zunehmender Verweilzeit durch Mineralisierung in anorganische Phosphate umgewandelt werden. Daher drücke der Anteil des anorganischen am Gesamtphosphat die rezente Überprägung der Phosphatbefunde aus (DUNCAN, 2000, 256). Allerdings werden sowohl organische als auch anorganische Phosphate in den Boden eingebracht (z. B. Dung, Knochen). Ihre Mineralisierbarkeit hängt stark von lokalen Bodeneigenschaften (z. B. pH-Wert) ab, nicht primär von ihrer Verweilzeit im Boden.

<sup>10</sup> Allerdings wurden leicht lösliche Phosphate zuweilen in großen Mengen an archäologischen Fundstellen festgestellt. Die Ursache dafür ist jedoch unklar (HOLLIDAY & GARTNER, 2007, 313; ARRHENIUS, 1955, 1057-1060). Die Menge der leicht löslichen Phosphate kann nicht zur Deutung der vergangenen Nutzungsintensität herangezogen werden. Archäologisch relevantes Phosphat müsste inzwischen schwer löslich gebunden worden sein.

## Literatur

Amberger, A. (1996). *Pflanzenernährung: Ökologische und physiologische Grundlagen, Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente* (4. Auflage). Stuttgart: Ulmer.

Arrhenius, O. (1955). The Iron Age settlements on Gotland and the nature of the soil. In M. Stenberger (Hrsg.), *Vallnagar II: A Migration Period settlement on Gotland/Sweden* (S. 1053-1064). Kopenhagen: Ejnar Munksgaards Forlag.

Aufderhaar, I. (2014). *Sievern, Ldkr. Cuxhaven, und sein Umland: Eine Mikroregion mit zentralörtlichen Funktionen im westlichen Elbe-Weser-Dreieck von der ausgehenden vorrömischen Eisenzeit bis zur Völkerwanderungszeit*. Unpublizierte Dissertation, Universität Münster.

Aufderhaar, I., Bittmann, F., Brandt, I. u. a. (2011). Neue Forschungen am Zentralplatz von Sievern, Ldkr. Cuxhaven. *Germania*, 87, 173-220.

Bakkevig, S. (1980). Phosphate analysis in archaeology: problems and recent progress. *Norwegian Archaeological Review*, 13/2, 73-100.

Bleck, R.-D. (1976). Anwendungsmöglichkeiten phosphatanalytischer Untersuchungen im Bereich der Ur- und Frühgeschichte. *Ausgrabungen und Funde*, 21, 259-268.

Bleck, R.-D. (1965). Zur Durchführung der Phosphatmethode. *Ausgrabungen und Funde*, 10, 213-218.

Blume, H.-P., Brümmer, G.-W., Horn, R. u. a. (2010). Scheffer/Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg: Spektrum.

Blume, H.-P., Stahr, K. & Leinweber, P. (2011). *Bodenkundliches Praktikum* (3. Auflage). Heidelberg: Spektrum.

Duncan, J. S. (2000). Phosphate Analysis. In I. Banks (2000). *Excavation of an Iron Age and Romano-British enclosure at Woodend Farm, Johnstonebridge, Annandale, 1994 & 1997* (S. 256-257). Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland, 130, 223-281.

Finck, A. (2007). *Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten* (6. Auflage). Berlin, Stuttgart: Borntraeger.

Finck, A. (1979). *Dünger und Düngung: Grundlagen, Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen*. Weinheim: Chemie GmbH.

Gebhardt, H. (1984). Die Böden im Bereich von Geestsiedlungen und ihr Wandel durch den Eingriff des Menschen. In G. Kossack, K.-E. Behre & P. Schmid (Hrsg.), *Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen an ländlichen und frühstädtischen Siedlungen im deutschen Küstengebiet vom 5. Jahrhundert v. Chr. bis zum 11. Jahrhundert n. Chr.* Bd. 1: *Ländliche Siedlungen* (S. 97-103). Weinheim: Chemie GmbH.

Gebhardt, H. (1982). Phosphatkartierung und bodenkundliche Geländeuntersuchungen zur Eingrenzung historischer Siedlungs- und Wirtschaftsflächen der Geestinsel Flögeln, Kreis Cuxhaven. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, 14, 1-9.

Gebhardt, H. (1976). Bodenkundliche Untersuchungen der eisenzeitlichen Ackerfluren von Flögeln-Haselhörn, Kr. Wesermünde. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, 11, 91-100.

Holliday, V. T. & Gartner, W. G. (2007). Methods of soil P analysis in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 34, 301-333.

Jakob, H. (1955). Die Bedeutung der Phosphatmethode für die Urgeschichte und Bodenforschung. Beiträge zur Frühgeschichte der Landwirtschaft II. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, 15, 67-85.

Jungmann, W. W. (2002). Geochemische Prospektion früh- bis spätmittelalterlicher Siedlungsflächen in der Holzheimer Gemarkung. In N. Wand (Hrsg.), *Holz-*

heim bei Fritzlar: Archäologie eines mittelalterlichen Dorfes (Kasseler Beiträge zur Vor- und Frühgeschichte, Bd. 6) (S. 485-490). Rahden/Westfalen: Marie Leidorf.

Kiefmann, H.-M. (1980). Geographische Untersuchungen in der Siedlungskammer Haereid in Norwegen unter besonderer Verwendung der Phosphatmethode. *Offa-Bücher*, 37, 394-407.

Kondratiuk, P. & Banaszuk, P. (1993). Interpretation of phosphorus concentration in archaeology in the light of soil science research. *Archaeologia Polona*, 31, 141-147.

Kusserow, N. (2015). *Vergleich von Phosphorfraktionen unterschiedlicher Löslichkeit in Oberböden unter biologischer und konventioneller Bewirtschaftung*. Unpublizierte Bachelor-Arbeit, Philipps-Universität, Marburg.

Lienemann, J. (1989): Anthropogene Böden Nordwestdeutschlands in ihrer Beziehung zu historischen Bodennutzungssystemen. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, 17, 77-117.

Lorch, W. (1941a). Die Phosphatmethode im Dienste der Vorgeschichtsforschung. *Germanen-Erbe*, 6/3-4, 55-59.

Lorch, W. (1941b). Die Phosphatmethode im Dienste der Vorgeschichtsforschung (Schluß). *Germanen-Erbe*, 6/5-6, 90-95.

Lorch, W. (1940). Die siedlungsgeographische Phosphatmethode. *Die Naturwissenschaften*, 40/41, 633-640.

Lorch, W. (1939). *Methodische Untersuchungen zur Wüstungsforschung*. Jena: Gustav Fischer.

Provan, D. M. J. (1971). Soil phosphate analysis as a tool in archaeology. *Norwegian Archaeological Review*, 4, 37-50.

Schüller, H. (1969). Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 123, 48-63.

Sjöberg, A. (1976). Phosphate analysis of anthropic soils. *Journal of Field Archaeology*, 3/4, 447-454.

Weihrauch, C. (2015). Zur Durchführung von Phosphatuntersuchungen an Grundrissbefunden. *Netzpublikationen zur Grabungstechnik*, 5, 1-13. [http://www.landesarchaeologen.de/fileadmin/Dokumente/Dokumente\\_Kommissionen/Dokumente\\_Grabungstechniker/Netzpublikationen/Weihrauch\\_Phosphatuntersuchung\\_01-2015.pdf](http://www.landesarchaeologen.de/fileadmin/Dokumente/Dokumente_Kommissionen/Dokumente_Grabungstechniker/Netzpublikationen/Weihrauch_Phosphatuntersuchung_01-2015.pdf) [02.06.2016].

Woods, W. L. (1977). The quantitative analysis of soil phosphate. *American Antiquity*, 42/2, 248-252.

Zimmermann, W. H. (2011). Die Vorarbeiten: interdisziplinäre Untersuchungen im Raum Sievern von 1990 bis 2006. In I. Aufderhaar u. a. (2011): Neue Forschungen am Zentralplatz von Sievern, Ldkr. Cuxhaven. *Germania*, 87, 179-187.

Zimmermann, W. H. (2008). Phosphate mapping of a Funnel Beaker Culture house from Flögel-Eekhöltjen,

district of Cuxhaven, Lower Saxony. *Analecta Praehistorica Leidensia*, 40, 123-129.

Zölitz, R. (1986). Phosphatuntersuchungen zur Siedlungsprospektion in der Gemarkung Kosel (Kr. Rendsburg-Eckernförde). *Berichte der Römisch-Germanischen Kommission*, 67, 454-464.

Zölitz, R. (1983). Bodenchemische Untersuchungen im Bereich vor- und frühgeschichtlicher Siedlungen. *Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein*, 53, 33-57.

Zölitz, R. (1980). *Bodenphosphat als Siedlungsindikator: Möglichkeiten und Grenzen der siedlungsgeographischen und archäologischen Phosphatmethode* (Offa-Ergänzungsreihe Bd. 5). Neumünster: Karl Wachholtz Verlag.

Zölitz, R. & Heinrich, U. (1990). Methodische Anmerkungen zur siedlungsarchäologischen Phosphatanalyse. *ArchäoPhysika 12. Naturwissenschaftliche Beiträge zur Archäologie*, 2, 383-408.

### Über die Autoren

DIPL.-GEOGR. CHRISTOPH WEIHRAUCH M. A. studierte von 2003-2010 in Leipzig und Marburg Ethnologie, Geographie und Vor- und Frühgeschichte. Er beschäftigte sich besonders mit der Archivfunktion von Böden in archäologischen Kontexten und mit der kritischen Anwendung analytischer Verfahren zur Erschließung dieser Archive. Seit 2012 promoviert er am Fachbereich Geographie der Philipps-Universität Marburg zu Phosphat-dynamiken in Böden.

IMKE BRANDT M.A. wurde 1977 in Verden/Aller geboren. Nach Ausbildung und Tätigkeit als Bankkauffrau von 1997-2001 studierte sie bis 2007 Vor- und Frühgeschichtliche Archäologie, Bodenkunde und Anthropologie an der Universität Hamburg. Seit 2008 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Niedersächsischen Institut für historische Küstenforschung in Wilhelmshaven tätig. Neben der Arbeit an ihrer landschaftsarchäologischen Promotion an der Universität Kiel forscht sie derzeit in einem Projekt über kaiserzeitliche Bootslandeplätze im Bereich der Allermündung.

PROF. DR. CHRISTIAN OPP studierte von 1975-1979 Geographie und Russische Sprache sowie Literatur in Halle/Saale und Woronesh. Er promovierte 1982 über das bodenkundlich-landschaftsökologische Catena-Konzept und habilitierte sich 1997 mit geographischen Ansätzen zur Erforschung von Bodendegradationen. Seit 1999 bekleidet er die Professur für Physische Geographie mit den Schwerpunkten Bodenkunde und Hydrologie an der Philipps-Universität Marburg.

Dipl.-Geogr. Christoph Weihrauch M.A.  
Fachbereich Geographie  
Philipps-Universität Marburg  
Deutschhausstraße 10, 35037 Marburg  
Tel. 06421 – 282 43 95  
[christoph.weihrauch@geo.uni-marburg.de](mailto:christoph.weihrauch@geo.uni-marburg.de)