



# Erfassung der $\text{PO}_4$ -Austräge für die Ökobilanzierung

SALCA-Phosphor

Volker Prasuhn

2006

 agroscope

FAL RECKENHOLZ

Forschung für Landwirtschaft und Natur

# Inhaltsverzeichnis

---

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung: Phosphat (PO <sub>4</sub> ) - Austräge.....	1
3	P-Einträge in Oberflächengewässer durch Bodenerosion .....	2
3.1	Benötigte Eingangsdaten.....	2
3.2	Bestimmung des mittleren Bodenabtrags in t/ha und Jahr für jede Parzelle .....	2
3.3	Materialeinträge ins Gewässer .....	2
3.4	P-Gehalt des erodierten Bodenmaterials.....	3
4	P-Verluste durch Auswaschung ins Grundwasser: .....	4
4.1	Benötigte Eingangsdaten.....	4
4.2	P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung .....	4
4.3	Bodenfaktor.....	5
4.4	P-Düngungsfaktor .....	7
4.5	P-Testzahlfaktor.....	7
5	P-Einträge über Drainagen in Oberflächengewässer.....	8
5.1	Benötigte Eingangsdaten.....	8
6	P-Einträge über Oberflächenabschwemmung .....	9
6.1	Benötigte Eingangsdaten.....	9
6.2	P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung .....	9
6.3	Standortbedingte Gefahr.....	10
6.4	Bewirtschaftungsbedingte Gefahr .....	13
7	Literaturverzeichnis .....	15
8	Anhang.....	17

# 1 Zusammenfassung

---

Das vorliegende Modell dient der Berechnung der Phosphatausträge auf Parzellenebene. Es wird unterschieden zwischen Bodenerosion, Oberflächenabschwemmung und Drainageverluste in Oberflächengewässer sowie Auswaschung ins Grundwasser. Die Berechnungen beziehen sich auf mittlere klimatische Bedingungen.

Für jeden Austragungspfad wird von einem mittleren Standardwert ausgegangen, welcher mittels verschiedener Korrekturfaktoren an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden kann. Dabei wird die Distanz zum nächsten Gewässer, die Topographie (Hangform, -neigung und -länge), die Bodenart, der Phosphorgehalt des Bodens, die Düngungsmenge und das Vorhandensein von Drainage berücksichtigt. Ferner wird zwischen den verschiedenen Landnutzungskategorien Ackerbau, Rebberg, Dauerwiese etc. unterschieden.

## 2 Einleitung: Phosphat (PO<sub>4</sub>) - Austräge

---

Beim P-Austrag wird unterschieden zwischen einerseits Auswaschung ins Grundwasser und andererseits Oberflächenabschwemmung, Bodenerosion und Drainageverluste in Oberflächengewässer. Während die Verluste durch Auswaschung, Abschwemmung und Drainage überwiegend gelöster Phosphor bzw. eutrophierungswirksamer Phosphor sind, sind jene durch Bodenerosion partikulärer Phosphor, der nur bedingt eutrophierungswirksam ist. Dies muss bei der Umrechnung in Phosphat (PO<sub>4</sub>) berücksichtigt werden. Alle Berechnungen finden deshalb in P statt und können abschliessend in PO<sub>4</sub> umgerechnet werden.

P-Verluste sind massgeblich durch das Zusammenspiel von Witterung und Nutzung bestimmt und werden vor allem durch Einzelereignisse geprägt, indem ungünstige Konstellationen zusammentreffen. Die Berechnungen beziehen sich alle auf mittlere klimatische Bedingungen. Sie dienen der Anwendung in Ökobilanzen, wo die landwirtschaftlichen Aktivitäten unter durchschnittlichen Verhältnissen ökologisch beurteilt werden. P-Verluste durch Extremereignisse sind nicht Bestandteil dieses Berichtes.

Alle Berechnungen basieren auf den Arbeiten von PRASUHN & BRAUN (1994), PRASUHN et al. (1996), SCHMID & PRASUHN (2000), BRAUN et al. (2001), PRASUHN & GRÜNIG (2001) und PRASUHN & MOHNI (2003). Es handelt sich z.T. um Abschätzungen oder Annahmen, die dem heutigen Kenntnisstand entsprechen. Sie haben nur für Gebiete in der Schweiz Gültigkeit.

## 3 P-Einträge in Oberflächengewässer durch Bodenerosion

---

### 3.1 Benötigte Eingangsdaten

- Berechneter mittlerer Bodenabtrag in t/ha und Jahr pro Parzelle nach OBERHOLZER et al. (2006)
- Gegebenenfalls P-Gesamtgehalt im Oberboden pro Parzelle

### 3.2 Bestimmung des mittleren Bodenabtrags in t/ha und Jahr für jede Parzelle

Die Berechnung der Höhe der Bodenerosion erfolgt nach dem Verfahren von MOSIMANN & RÜTTIMANN (1999) gemäss dem Bericht von OBERHOLZER et al. (2006). Berücksichtigt werden Standortfaktoren, Fruchtfolge und Bodenbearbeitungsverfahren sowie Angaben zur linearen Erosion.

### 3.3 Materialeinträge ins Gewässer

Der Eintrag ins Gewässer hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anschluss der Parzelle an das Gewässernetz. Es gelangt Material nur von Parzellen, die (a) direkten Anschluss an ein Gewässer haben, (b) die indirekten Anschluss über kanalisierte Wege und Strassen ans Gewässernetz haben oder (c) von denen aufgrund ihrer Lage am Hang Bodenmaterial über andere Parzellen hinweg ins Gewässer oder auf kanalisierte Strassen und Wege gelangen kann.
- Art der Erosion. Bei linearer Erosion wird in der Regel eher Material über die Parzellengrenze hinaus transportiert als bei flächenhafter.
- Intensität der Erosion. Bei grossen Erosionsereignissen wird in der Regel mehr Material über die Parzellengrenze hinaus transportiert als bei kleinen.

Ob von einer Parzelle Material ins Gewässer gelangen kann oder nicht, kann nur vor Ort bestimmt werden. Erfahrungswerte aus der Region Frienisberg zeigen, dass von rund zwei Dritteln aller Parzellen Bodenmaterial in ein Gewässer gelangen kann (PRASUHN & GRÜNIG 2001).

Die Höhe des Eintrages ist variabel und standort- und ereignisabhängig. Im langjährigen Mittel gelangen rund 20% des erodierten Bodenmaterials einer Region bis in ein Gewässer (MOSIMANN et al. 1990, PRASUHN 1991, PRASUHN & GRÜNIG 2001, PRASUHN 2005).

**Vorschlag: 20% des berechneten Bodenabtrages jeder Parzelle gelangt in ein Gewässer.**

Liegen Angaben zur Distanz der Parzelle (Parzellenrand in Gefällerrichtung) zum nächsten Gewässer oder Weg mit Einlaufschächten vor, wird wie folgt differenziert (Schätzwerte):

Distanz	<3m	25%
	<30m	20%
	<100m	15%
	>100m	5%

### 3.4 P-Gehalt des erodierten Bodenmaterials

Der P-Gehalt des erodierten Bodens hängt einerseits vom Gehalt des Oberbodens, andererseits vom Anreicherungsfaktor im Erosionsmaterial ab.

- P-Gehalt des Oberbodens: Erodieren wird in der Regel nur der Oberboden. Benötigt werden Gesamt-P-Gehalte des Oberbodens (nicht P-Test oder Ähnliches). Der Gesamt-P-Gehalt wird bestimmt durch mineralische Zusammensetzung, Bodenart, Humusgehalt und Düngung. Die beobachteten Werte schwanken zwischen 400 und 2000 mg P/kg Boden, häufig liegen sie in Ackerböden bei 900-1000 mg P/kg Boden (PRASUHN & GRÜNIG 2001). Analysenergebnisse liegen hierzu aber meist nicht vor.

**Vorschlag: Liegen Analysenergebnisse für eine Parzelle vor, wird dieser Wert verwendet. Liegen keine detaillierten Werte vor, wird ein Mittelwert von 950 mg P/kg Boden verwendet.**

- Anreicherungsfaktor: Bodenerosion findet meist selektiv statt, d.h. es werden in erster Linie feine (Ton und Schluff) und leichte (organisches Material) Bodenbestandteile transportiert. Aufgrund hydraulischer Prozesse (Transportkapazität) werden diese in der Regel auch weiter transportiert und gelangen daher eher bis in ein Gewässer. Diese Ton-Humus-Komplexe sind P-reicher (mehr Sorptionsplätze) als der übrige Boden und können auch aus dem Oberflächenabfluss noch gelösten P aufnehmen. Nach WILKE & SCHAUB (1996) beträgt der Anreicherungsfaktor im Mittel 1,86.

**Vorschlag: Der verwendete P-Gehalt des Oberbodens wird mit einem Anreicherungsfaktor von 1,86 multipliziert.**

#### **Fazit:**

- ◆ **berechneter Bodenabtrag in t/ha und Jahr gemäss OBERHOLZER et al. (2006)**
- ◆ **multipliziert mit 20% (Eintrag ins Gewässer),**
- ◆ **mit 950 mg P/kg (P-Gehalt Oberboden) oder gemessenem P-Gehalt**
- ◆ **und mit 1,86 (Anreicherungsfaktor Erosionsmaterial)**
- ◆ **= geschätzter mittlerer Gesamt-P-Eintrag einer Hektare durch Bodenerosion während einem Jahr.**

Unterschiede beim P-Eintrag über Bodenerosion ergeben sich für verschiedene Kulturen nach oben stehendem Ansatz, also nur durch Unterschiede in der Höhe des Bodenabtrages. Entsprechend ist dieser möglichst genau zu erfassen (Standortfaktoren, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung etc.) und für die Berechnung zwingend notwendig.

Der Gesamt-P-Gehalt kann nicht ohne weiteres in  $\text{PO}_4\text{-P}$  umgerechnet werden, denn nur ein Teil ist leicht bioverfügbar bzw. eutrophierungswirksam (FROSSARD et al. 2004). Somit kann der partikuläre P aus der Erosion nicht mit dem überwiegend gelösten P aus der Abschwemmung und Auswaschung gleichgesetzt werden. Wie hoch der eutrophierungswirksame Anteil bei der Bodenerosion ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab und kann derzeit nicht beurteilt werden. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

## **4 P-Verluste durch Auswaschung ins Grundwasser:**

---

### **4.1 Benötigte Eingangsdaten**

- P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung
- Bodenfaktor pro Parzelle (Bodenart, Wasserhaushalt)
- P-Anfall aus Düngern pro Parzelle
- P-Testzahl pro Parzelle

### **4.2 P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung**

Da P im Gegensatz zu Nitrat vom Boden stark adsorbiert wird und dadurch wenig mobil ist, hat der Auswaschungspfad nicht so grosse Bedeutung. Über Makroporenfluss können allenfalls höhere Frachten in die Tiefe verlagert und gegebenenfalls ausgewaschen werden. Entsprechend spielen Kulturarten, Bodenbearbeitung und Düngung keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Angaben zur P-Auswaschung finden sich in der Literatur nur wenige, nachfolgende Angaben sind daher mit grossen Unsicherheiten behaftet. Sie gelten für die meisten Böden. Für extreme Standorte (z.B. reine Sandböden mit geringen Sorptionseigenschaften, extrem flachgründige und skelettreiche Böden, Moorböden) sind höhere Auswaschungsverluste zu erwarten.

In Anlehnung an Werte aus einer Literaturzusammenstellung von Prasuhn & Braun 1994, ergänzt durch neuere Arbeiten, wird zunächst ein mittlerer P-Ausgangswert (kg P/ha und Jahr) pro Landnutzungskategorie festgelegt (Tab. 1):

Tab. 1: P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung zur Bestimmung der Auswaschungsverluste.

Landnutzungskategorie	Ausgangswert (kg P/ha)
Dauerwiesen	0,06
Weiden	0,06
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0,055
Obstbau	0,06
Rebbau	0,07
Gartenbau	0,07
Ackerland	0,07
Unproduktive Vegetation	0,05

Die Ausgangswerte werden mit folgenden Korrekturfaktoren regional angepasst:

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{P\text{-Ausgangswert (kg P/ha)} \quad \times \text{Bodenfaktor}} \\
 &\quad \quad \quad \times \mathbf{P\text{-Düngungsfaktor}} \\
 &\quad \quad \quad \times \mathbf{P\text{-Testzahlfaktor}} \\
 &\quad \quad \quad = \mathbf{Phosphorfracht (kg P/ha)}
 \end{aligned}$$

### 4.3 Bodenfaktor

Der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Auswaschungsgefahr wird über das Auswaschungsrisiko der Böden berücksichtigt. Grundlage für die nachfolgende Klassierung bilden die Angaben aus der Bodenkarte 1:5'000 (FAL 1998).

Die Haupteinteilung nach Wasserhaushaltsgruppen (FAL 1998) erfolgte in Anlehnung an das vom Kanton Luzern verwendete Modell für die Auswaschung (EGLI 1999) sowie an DENOTH (1997) und DENOTH et al. (1998). Bei stauwassergeprägten Böden ist das Versickerungsrisiko herabgesetzt. Die Körnung des Gesamtbodens kann einen Zu- oder einen Abschlag zur Folge haben. Diese Einteilung erfolgte unter Berücksichtigung der Bewertung der Infiltrationskapazität von MARKS et al. (1989) und nach AUE BL (1998). Sande kommen so in eine höhere Risikoklasse, Tonböden in eine tiefere. Der Oberboden wird gegenüber dem Unterboden doppelt gewichtet.

Die Risikoklasse 2 entspricht von den Bodeneigenschaften her am ehesten den Böden aus der verwendeten Literatur (vorwiegend Lysimeterversuche) und somit den Ausgangswerten. Für Böden der Risikoklasse 1 wird eine Verminderung der Stoffkonzentration um 5% (Faktor 0,95) gegenüber der Risikoklasse 2 (Mittelwert) angenommen, bei Risikoklasse 3/4/5 eine Erhöhung um jeweils 5/10/15% (Faktoren 1,05/1,1/1,15). Die Berechnung erfolgt parzellenweise für alle Nutzungskategorien.

- **Risikoklasse 1**            **Faktor 0,95**
- **Risikoklasse 2**            **Faktor 1,00**

- **Risikoklasse 3**            **Faktor 1,05**
- **Risikoklasse 4**            **Faktor 1,10**
- **Risikoklasse 5**            **Faktor 1,15**
- **keine Klassierung**        **Faktor 1,00**

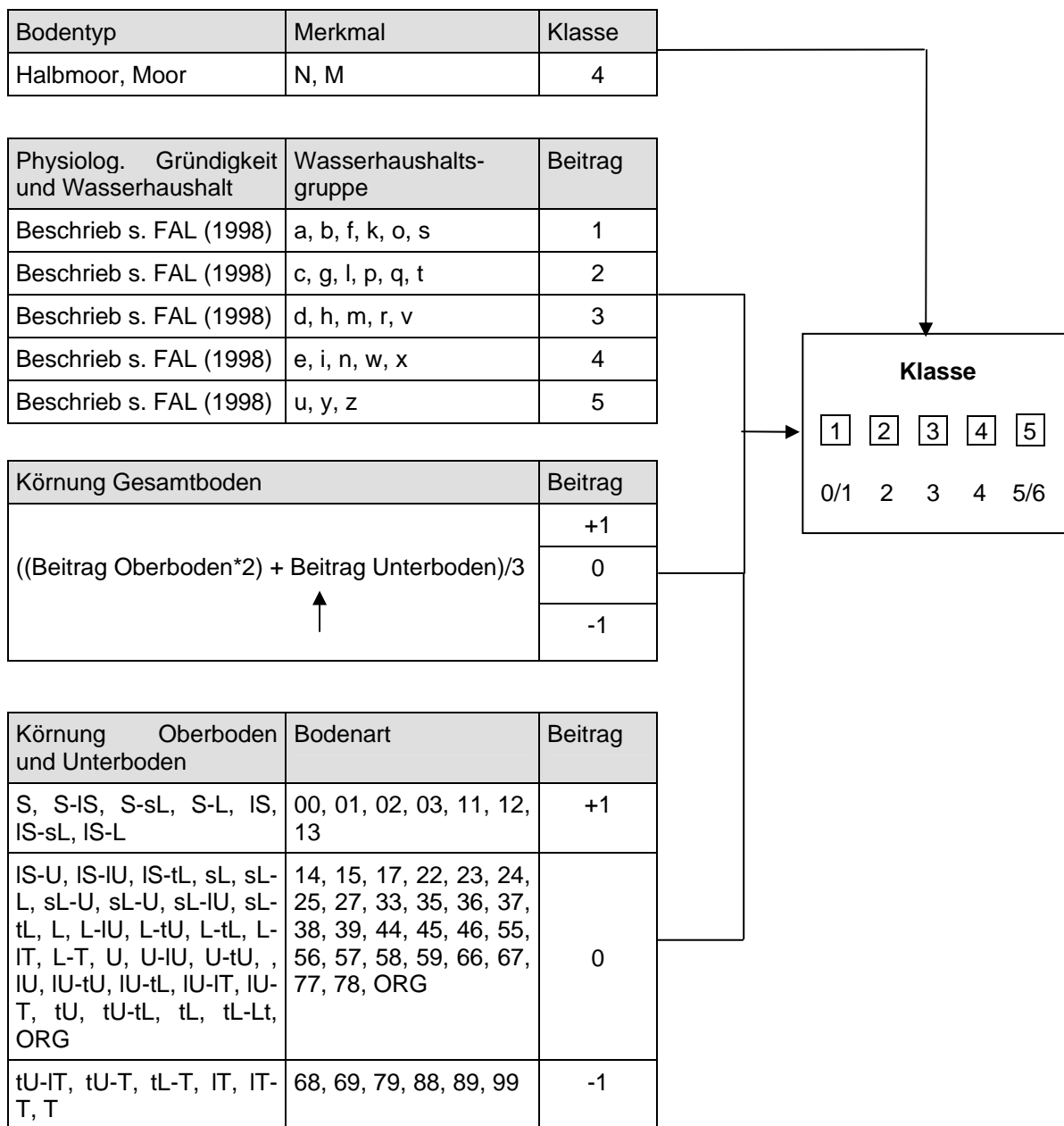


Abb. 1: Schema zur Berechnung der Auswaschungsgefährdung des Bodens. Klasse 1 bedeutet geringes Risiko, Klasse 5 sehr hohes Risiko. Kategorienbezeichnungen siehe Anhang, Tab. A1-A3, Quelle: Schmid & Prasuhn 2000.



## 4.4 P-Düngungsfaktor

Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender P-Düngung das Auswaschungsrisiko leicht steigt, und bei Gülledüngung das Verlagerungsrisiko durch Makroporen erheblich größer ist als bei Mist und Mineraldüngern. Entsprechend wird nur der Anfall aus der Gülledüngung verwendet. Der P-Gehalt der Gülle wird abgeschätzt aus GRUDAF (2001, Tab. 44).

Die Gewichtung liegt bei 20% (Faktor 1,2) bei 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha und Jahr in Form von Gülle und 0% (Faktor 1,0) bei 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha und Jahr. Es wird eine lineare Beziehung zugrunde gelegt.

Berechnungsformel des P-Düngungsfaktors

$= 1,0 + (1,2 - 1,0) / (80 - 0) * \text{parzellenspezifische P-Menge aus Gülle in kg P}_2\text{O}_5/\text{ha und Jahr}$

## 4.5 P-Testzahlfaktor

Es wird angenommen, dass der pflanzenverfügbare P im Oberboden bei durchlässigen Böden oder über Makroporenfluss einen Einfluss auf die Höhe der P-Auswaschung hat. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem in mit P überversorgten Böden mit hohen Verlusten zu rechnen ist (LAZZAROTTO 2004, SCHÄRER 2003, KELLER & VAN DER ZEE 2004, FROSSARD et al. 2004). Die Gewichtung erfolgt nach Tab. 16 und 17 der GRUDAF (2001), indem jeder P-Testzahlwert einer Parzelle in Abhängigkeit von der Körnung in eine Versorgungsklasse eingestuft wird.

- Versorgungsklasse A Faktor 0,8
- Versorgungsklasse B Faktor 0,9
- Versorgungsklasse C Faktor 1,0
- Versorgungsklasse D Faktor 1,2
- Versorgungsklasse E Faktor 1,4
- Kein Wert Faktor 1,0

### Fazit:

- ◆ **P-Ausgangsauswaschungswert je nach Nutzung**
- ◆ **multipliziert mit Bodenfaktor,**
- ◆ **P-Düngungsfaktor und**
- ◆ **P-Testzahlfaktor**
- ◆ **= geschätzter mittlerer P-Verlust einer Hektare durch Auswaschung.**

# 5 P-Einträge über Drainagen in Oberflächengewässer

---

## 5.1 Benötigte Eingangsdaten

- Parzelle drainiert ja/nein
- P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung
- Bodenfaktor pro Parzelle (Bodenart, Wasserhaushalt)
- P-Anfall aus Düngern pro Parzelle
- P-Testzahl pro Parzelle

Die P-Verluste über Drainagen können erheblich höher sein als die durch Auswaschung, da die Bodenpassage erheblich verkürzt wird und durch Makroporenfluss P-reiches Wasser (z.B. nach Gülleausbringung) direkt in die Drainage gelangen kann. Die Angabe, ob eine Parzelle drainiert ist oder nicht, ist daher zwingend notwendig.

Die Berechnung erfolgt analog zur P-Auswaschung, nur wird für den Drainageeffekt ein Zuschlag von Faktor 6 bei drainierter Fläche für Acker- und Grasland verwendet (PRASUHN & MOHNI 2003).

- **Drainage ja** Faktor 6,0
- **Drainage nein** Faktor 1,0
- **(keine Angabe** Faktor 1,0)

### **Fazit:**

- ◆ **P-Ausgangsauswaschungswert je nach Nutzung**
- ◆ **multipliziert mit Bodenfaktor,**
- ◆ **P-Düngungsfaktor,**
- ◆ **P-Testzahlfaktor und**
- ◆ **Drainagefaktor jeder Parzelle**
- ◆ **= geschätzter mittlerer P-Verlust einer Hektare durch Drainagen.**

## 6 P-Einträge über Oberflächenabschwemmung

Unter Abschwemmung wird der Transport von nicht an Bodenpartikeln gebundenen Nährstoffen mit dem auf der Bodenoberfläche abfließenden Wasser verstanden, unabhängig davon, ob Bodenerosion stattfindet oder nicht. Dabei werden vor allem Nährstoffe abgeschwemmt, die sich in den obersten Bodenmillimetern oder nach einem Düngeraustrag auf der Boden- und Pflanzenoberfläche befinden. Die im Niederschlag selbst enthaltenen Nährstoffe tragen ebenfalls zu diesen Nährstoffeinträgen bei.

### 6.1 Benötigte Eingangsdaten

- P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung
- Bodenfaktor pro Parzelle (Durchlässigkeit, Bodenart, Verdichtung)
- Topographie (Hangneigung, Geländeform, Hanglänge, Fremdwasserzufluss, Hangwasserantritt)
- P-Anfall aus Düngern pro Parzelle (Düngungsart, -menge)
- P-Testzahl pro Parzelle

### 6.2 P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung

Bei der Berechnung der P-Abschwemmung wurde in Anlehnung an Erfahrungswerte zunächst eine mittlere P-Abschwemmungsfracht pro Landnutzungskategorie für das Untersuchungsgebiet festgelegt (Tab. 2):

Tab. 2: P-Ausgangswert in Abhängigkeit von der Landnutzung zur Bestimmung der Abschwemmungsverluste.

Landnutzungskategorie	Ausgangswert (kg P/ha)
Dauerwiesen	0,25
extensive und wenig intensive Wiesen und Weiden	0,15
Weiden	0,25
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0,25
Obstbau	0,25
Rebbau	0,175
Gartenbau	0,175
offenes Ackerland	0,175
Kunstpflanzung	0,25
Unproduktive Vegetation	0,10

Die Ausgangswerte werden mit nachfolgenden Korrekturfaktoren angepasst.

## 6.3 Standortbedingte Gefahr

Die standortbedingte Gefahr für P-Abschwemmungsverluste wird massgeblich beeinflusst durch die Faktoren

- Boden
- Topographie
- Lage zum Einleiter

Dem Einfluss der **Bodeneigenschaften** auf die Höhe des Oberflächenabflusses von der Landwirtschaftlichen Nutzfläche wird über das Abschwemmungsrisiko der Böden Rechnung getragen. Aus der Bodenkarte 1:5'000 (FAL 1998) werden folgende Parameter berücksichtigt und klassiert: Durchlässigkeit, Bodenart, Verdichtung.

Vorgängig wurden Spezialstandorte wie organische oder sehr skelettreiche Böden (AFU LUZERN 1997 und AUE BL 1998) ausgegliedert (Abb. 2). Die Haupteinteilung erfolgte anhand der Wasserhaushaltsgruppen nach Tab. A1 (FAL 1998). Die Klassen wurden in Anlehnung an das Modell des Kantons Luzern (DENOTH 1997, DENOTH et al. 1998) und des Kantons Basel-Landschaft (AUE BL 1998) gebildet. Die Körnung des Oberbodens führt zu einem Zu- oder Abschlag. Sande kommen so in eine tiefere Risikoklasse, Schluff- und Tonböden in eine höhere.

Böden der Risikoklasse 3 (mässig hoch) wird der Faktor 1 zugeordnet, da die Böden, auf denen Feldmessungen durchgeführt wurden, am ehesten diesen Bodeneigenschaften entsprechen. Bei Böden in Risikoklasse 2 wird der P-Ausgangswert um 10% gemindert, bei Risikoklasse 1 um 20%. Bei Risikoklasse 4 und 5 wird der P-Ausgangswert um 10% bzw. 20% erhöht.

◆ <b>Risikoklasse 1</b>	<b>Faktor 0,8</b>
◆ <b>Risikoklasse 2</b>	<b>Faktor 0,9</b>
◆ <b>Risikoklasse 3</b>	<b>Faktor 1,0</b>
◆ <b>Risikoklasse 4</b>	<b>Faktor 1,1</b>
◆ <b>Risikoklasse 5</b>	<b>Faktor 1,2</b>
◆ <b>keine Klassierung</b>	<b>Faktor 1,0</b>

Der Parameter **Topographie** wird durch die Faktoren Hangneigung, Hangform, Fließstrecke des Wassers, Fremdwasserzufluss und Hangwasseraustritt beschrieben.

**Hangneigung:** Auf Flächen in mehr oder weniger ebener Lage (<3% mittlere Neigung) findet in der Regel kein Oberflächenabfluss statt. Auf Flächen mit >3% Neigung wird mit Oberflächenabfluss gerechnet, die Stärke der Neigung spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Die Angabe, ob eine Parzelle geneigt ist oder nicht, ist zwingend notwendig.

◆ <b>&lt;3% Neigung</b>	<b>keine P-Abschwemmung</b>
◆ <b>&gt;3% Neigung</b>	<b>P-Ausgangswert</b>
◆ <b>(keine Angabe)</b>	<b>P-Ausgangswert)</b>

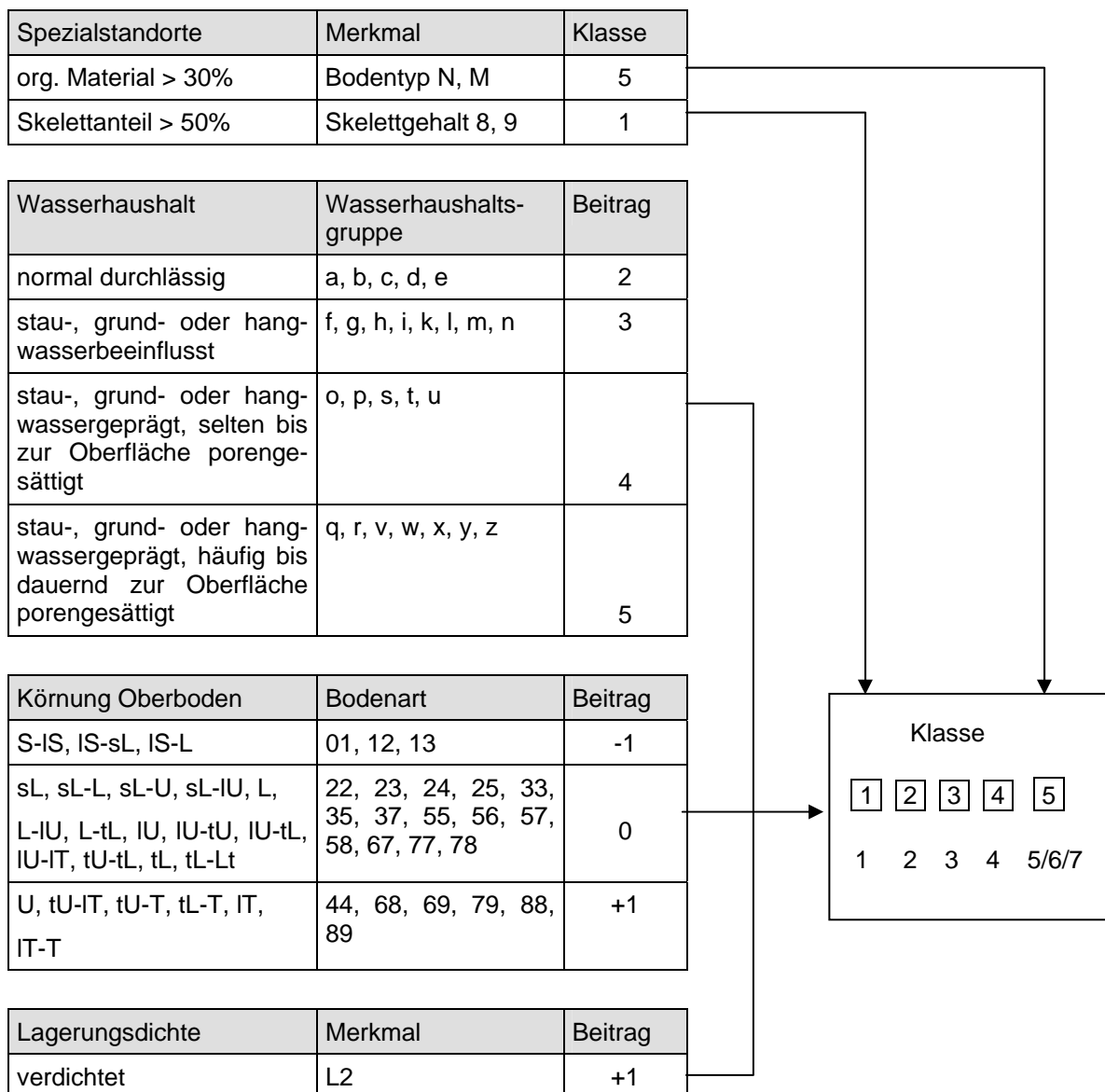


Abb. 2: Schema zur Berechnung der Abschwemmungsgefährdung des Bodens. Klasse 1 bedeutet geringes Risiko, Klasse 5 sehr hohes Risiko. Kategorienbezeichnungen siehe Anhang, Tab. A1-A3, Quelle: Schmid & Prasuhn 2000.

**Hangform:** In Geländemulden (konkave Formen) fließt das Wasser zusammen, konzentriert sich und führt zu erhöhten Oberflächenabflüssen, während bei Vollformen (konvexe Formen) sich das Wasser eher verteilt. Eine Klassierung jeder Parzelle (dominanter Aspekt) erfolgt nach Abbildung A2 im Anhang.

- Hangform verteilend            Faktor 0,9    (längs gestreckt quer konvex; allseitig konvex)
- Hangform gleichmässig      Faktor 1,0    (allseitig gestreckt; längs konkav quer konvex)
- Hangform konzentrierend    Faktor 1,1    (längs gestreckt quer konkav; längs konkav quer gestreckt; längs konvex quer gestreckt)
- Mulden                            Faktor 1,3    (allseitig konkav; längs konvex quer konkav)
- Keine Angabe                   Faktor 1,0

**Fliessstrecke des Wassers:** Mit zunehmender Fliessstrecke des Wassers nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass sich erhebliche Wassermengen aufsummieren und die Fliessgeschwindigkeit zunimmt, so dass weniger Wasser versickert und oberflächlich abfließt. Eine Klassierung erfolgt nach folgender Einteilung:

- <25 m                      Faktor 0,9
- 25-50m                      Faktor 1,0
- 50-100m                      Faktor 1,1
- >100m                      Faktor 1,2
- keine Angabe              Faktor 1,0

**Fremdwasserzufluss:** Vor allem vom Strassen- und Wegenetz, aber auch von anderen Parzellen, kann Wasser in eine Parzelle konzentriert eindringen, oberflächlich abfließen und zu P-Abschwemmungsverlusten führen. Parzellen mit beobachtetem Fremdwasserzufluss erhalten einen Zuschlag.

- Fremdwasserzufluss ja              Faktor 1,1
- Fremdwasserzufluss nein              Faktor 1,0
- keine Angabe                      Faktor 1,0

**Hangwasseraustritt:** Aufgrund geologischer Schichtwechsel oder verdichteter Bodenschichten kann es punktuell zu Hangwasseraustritten kommen, an denen immer wieder nach grösseren Niederschlagsmengen konzentrierter Oberflächenabfluss entsteht. Parzellen mit beobachtetem Hangwasseraustritt erhalten einen Zuschlag.

- Hangwasseraustritt ja              Faktor 1,1
- Hangwasseraustritt nein              Faktor 1,0
- keine Angabe                      Faktor 1,0

**Distanz zum Einleiter:** Je näher eine Parzelle (Parzellenrand in Gefällerrichtung) an einem Gewässer oder Weg mit Einlaufschächten liegt, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass P mit dem Oberflächenabfluss ins Gewässer gelangt. Folgende Differenzierung wird gemacht (Schätzwerte):

- Distanz                      <3m              Faktor 1,2
- 3-30m              Faktor 1,0
- 30-100m              Faktor 0,8
- >100m              Faktor 0,5
- Keine Angabe                      Faktor 1,0

## 6.4 Bewirtschaftungsbedingte Gefahr

Die bewirtschaftungsbedingte Gefahr für P-Abschwemmungsverluste wird massgeblich beeinflusst durch die Nutzung und die Düngung.

Bei der Nutzung wird beim P-Ausgangswert unterschieden zwischen Ackerland und Grasland. Beim Ackerland ist der Oberflächenabfluss in der Regel mit Bodenerosion verknüpft, Ausnahmen bilden Kunstwiesen und Direktsaaten. Ein grosser Teil des gelösten P wird dabei an die erodierten Bodenpartikel adsorbiert, so dass die P-Konzentration im Oberflächenabfluss vergleichsweise niedrig ist. Die Menge des Oberflächenabflusses und damit der P-Abschwemmung hängt auch von der Kulturart und Bodenbearbeitung ab, für eine detaillierte Bewertung fehlen aber die Grundlagen. Die Grundfracht wird mit dem Düngungsfaktor und P-Testfaktor verrechnet.

Bei allen Graslandflächen (Dauerwiesen, Weiden, Alpwirtschaftliche Nutzflächen, wenig intensive Wiesen und Weiden, extensive Wiesen und Weiden) muss zunächst von einem Oberflächenabfluss ausgegangen werden. Unabhängig von der Düngung findet damit eine P-Abschwemmung statt. Hierfür wird eine einheitliche Grundfracht veranschlagt, die mit dem Düngungsfaktor und dem P-Testfaktor verrechnet wird.

### **P-Düngungsfaktor:**

Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender P-Düngung das P-Abschwemmungsrisiko steigt. Dabei müssen Düngungsart (Gülle, Mist, Mineraldünger etc.) und Menge (kg  $P_2O_5$ /ha) berücksichtigt werden.

**Düngungsart:** Es wird davon ausgegangen, dass P aus der Gülle (oder anderen flüssigen Abfalldüngern) leichter abgeschwemmt wird als aus Mist und Mineraldüngern. Wird Gülle auf wassergesättigten, zu trockenen, gefrorenen, schneebedeckten oder verdichteten Boden ausgebracht oder in zu grosser Menge pro Flächeneinheit, kann direkter Oberflächenabfluss entstehen. Trocknet ausgebrachte Gülle auf der Bodenoberfläche aus, ist sie ausgesprochen hydrophob und verringert über den Benetzungswiderstand die Infiltrationskapazität erheblich und fördert damit die Bildung von Oberflächenabfluss. Mineraldünger werden vom Boden leichter bzw. schneller adsorbiert, während Mist aufgrund seiner Struktur weniger leicht abtransportiert wird. Klärschlamm wird wie Gülle, Kompost wie Mist berücksichtigt.

**Menge:** Je grösser die ausgebrachte Menge P pro Flächeneinheit ist, desto höher wird die P-Konzentration im Oberflächenabfluss und desto grösser die P-Anreicherung im Oberboden.

Düngungsart und -menge werden kombiniert in einer linearen Beziehung nach folgender Formel berücksichtigt:

Berechnungsformel des P-Düngungsfaktors pro Parzelle:

$$1 + (1.2 - 1) * P_2O_5\text{-Gehalt Mineraldünger in kg } P_2O_5 / \text{ha und Jahr} / 80 + (1.7 - 1) * P_2O_5\text{-Gehalt Gülle in kg } P_2O_5 / \text{ha und Jahr} / 80 + (1.4 - 1) * P_2O_5\text{-Gehalt Mist in kg } P_2O_5 / \text{ha und Jahr} / 80$$

Findet keine Düngung statt, ist der Faktor 1,0 und der Ausgangswert (bzw. modifiziert über die Standortfaktoren) wird verwendet. Bei einem Mineraldüngereinsatz von 80 kg  $P_2O_5$  /ha und Jahr wird mit einem Faktor 1.2 gerechnet, bei einem Gülleinsatz von 80 kg  $P_2O_5$  /ha und

Jahr wird mit einem Faktor 1.7 gerechnet und bei einer Mistdüngung von 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha und Jahr wird mit einem Faktor 1.4 gerechnet. Für kombinierte Düngung errechnet sich der jeweilige Faktor nach der Formel.

### **P-Testzahlfaktor:**

Im Grasland, wo keine Durchmischung durch Bodenbearbeitung stattfindet, erfolgt die P-Anreicherung im Boden über zugeführte Dünger vor allem in den obersten Bodenmillimetern. Die P-Testzahl des Oberbodens wird als Indikator für die Höhe der P-Anreicherung herangezogen. Vor allem bei Grasland wäre der Gehalt der obersten Millimeter geeigneter, dieser Wert ist aber nirgends verfügbar. Je höher der P-Gehalt in der obersten Bodenschicht ist, desto mehr P kann bei Oberflächenabfluss in Lösung gehen und abgeschwemmt werden. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem in mit P überversorgten Böden mit hohen Verlusten zu rechnen ist (LAZZAROTTO 2004, SCHÄRER 2003, KELLER & VAN DER ZEE 2004, FROSSARD et al. 2004). Die Gewichtung erfolgt nach Tab. 16, 17 der GRUDAF (2001), indem jeder P-Testzahlwert einer Parzelle in Abhängigkeit von der Körnung in eine Versorgungsklasse eingestuft wird.

- Versorgungsklasse A Faktor 0,8
- Versorgungsklasse B Faktor 0,9
- Versorgungsklasse C Faktor 1,0
- Versorgungsklasse D Faktor 1,2
- Versorgungsklasse E Faktor 1,4
- Kein Wert Faktor 1,0

### **Fazit:**

- ◆ **P-Ausgangsabschwemmungswert je nach Nutzung**
- ◆ **multipliziert mit Bodenfaktor,**
- ◆ **Hangneigungsfaktor**
- ◆ **Hangformfaktor**
- ◆ **Hanglängenfaktor**
- ◆ **Fremdwasserzuflussfaktor**
- ◆ **Hangwasserzuflussfaktor**
- ◆ **Faktor zur Distanz zum Einleiter**
- ◆ **P-Düngungsfaktor und**
- ◆ **P-Testzahlfaktor**
- ◆ **= geschätzter mittlerer P-Verlust einer Hektare durch Abschwemmung.**



## Danksagung:

Ernst Spiess und Rene Flisch (Agroscope FAL Reckenholz) sei für ihre fachlichen Kommentare gedankt.

## 7 Literaturverzeichnis

---

- AFU LUZERN (1997): Abschätzung der relativen Verdichtungsgefährdung von Böden im Kanton Luzern. Bearb.: M. Egli, D. Peter. Kantonales Amt für Umweltschutz Luzern. 40 S.
- AUE BL (1998): Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Belastungen, Bodenüberwachung BL, Baustein 2. Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft (AUE BL), Liestal. 31 S.
- BRAUN, M., WÜTHRICH-STEINER, C, ASCHWANDEN, N. & F. DENOTH (2001): Wirkungskontrolle der Öko-Massnahmen in der Landwirtschaft: Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Abschwemmung. Statistik der Schweiz, Reihe 7: Land- und Forstwirtschaft, Bundesamt für Statistik, Neuchatel, 132 S.
- DENOTH, F. (1997): Oberflächenabfluss und Phosphorverlust auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Eine räumliche Analyse. Diplomarbeit, Geographisches Institut Universität Zürich. 79 S. + Anhang.
- DENOTH, F., EGLI, M. & B. ALLGÖWER (1998): P-Verluste durch Abschwemmung - Ein Bewertungsmodell. Agrarforschung 5 (4), 165-168.
- EGLI, M. (1999): Risikokarte Auswaschung. Erarbeitet von S. Herot, AGBA AG, Ebikon. Interner Bericht, Schriftl. Mitt. Amt für Umweltschutz Luzern. 9 S.
- FAL (1998): Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich. Landwirtschaftsareal. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich Reckenholz und Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Zürich. 207 S.
- FROSSARD, E., JULIEN, P., NEYROUD, J.-A. & S. SINAJ (2004): Phosphor in Böden – Standortbestimmung Schweiz. BUWAL, Schriftenreihe Umwelt Nr. 368, Bern, 174 S.
- GRUDAF (2001): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2001. – Agrarforschung 8(6), 80 S.
- KELLER, A. & VAN DER ZEE, S., (2004): Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Graslandflächen. Agrarforschung 11(9), 396-401.
- LAZZAROTTO, P. (2004): Modeling phosphorus runoff at the catchment scale. Diss ETHZ, 166 S.
- MARKS, R., MÜLLER, M. J., LESER, H. & KLINK, H.-J. (Hrsg.) (1989): Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL). Forschung zur Deutschen Landeskunde, Band 229, Zentralsausschuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier. 222 S.
- MOSIMANN, T. & M. RÜTTIMANN (1999): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Finanzdepartement Aargau Abteilung Landwirtschaft, Abteilung Umwelt und Landwirtschaft des Kantons Bern, Landwirtschaftsamt des Kantons Luzern und Amt für Umweltschutz und Amt für Landwirtschaft des Kantons Solothurn, 36 S.

- MOSIMANN, T., CROLE-REES, A., MAILLARD, A., NEYROUD, J.-A., THÖNI, M., MUSY, A. & W. ROHR (1990): Bodenerosion im schweizerischen Mittelland - Erosion du sol sur le Plateau suisse. - Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes 'Nutzung des Bodens in der Schweiz', Liebefeld-Bern, 262 S.
- OBERHOLZER, H.-R., WEISSKOPF, P., GAILLARD, G., WEISS, F. & FREIERMUTH, R. (2006): Methode zur Beurteilung der Wirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Ökobilanzen – SALCA-SQ. FAL. Verfügbar auf dem Internet: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/control/bilanz/publ9905.pdf>
- PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura (Raum Anwil, BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. *Physiographica* 16, Basel, 372 S.
- PRASUHN, V. (2005): Kartierung aktueller Erosionsschäden im Berner Mittelland. Bulletin BGS (im Druck).
- PRASUHN, V. & M. BRAUN (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) Liebefeld-Bern, Nr. 17, Liebefeld-Bern 1994, 113 S. + Anhang 101 S.
- PRASUHN, V. & K. GRÜNIG (2001): Evaluation der Ökomassnahmen – Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. – FAL-Schriftenreihe Nr. 37, Zürich-Reckenholz, 152 S.
- PRASUHN, V. & R. MOHNI (2003): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. – Interner Bericht FAL z.H. GSA Bern, 223 S.  
<http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html#bern>
- PRASUHN, V., SPIESS, E. & M. BRAUN (1996): Methoden zur Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in den Bodensee. Bericht Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee (IGKB) Nr. 45, 113 S. + Anhang (Sonderband), 83 S.
- SCHÄRER, M. (2003): The influence of processes controlling phosphorus availability on phosphorus losses in grassland soils. Diss ETHZ.
- SCHMID, C. & V. PRASUHN (2000): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. FAL-Schriftenreihe Nr. 35, 114 S.
- WILKE, B. & D. SCHAUB (1996): Phosphatanreicherung bei Bodenerosion. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.* 79, 435-438.

## 8 Anhang

Tab. A1. Codierung des Wasserhaushaltes und der pflanzennutzbaren Gründigkeit (Quelle: FAL 1998).

<b>WASSERHAUSHALT, PFLANZENNUTZBARE GRÜNDIGKEIT</b>		<b>cm</b>
<b>SENKRECHT DURCHWASCHENE BÖDEN</b>		
<b>NORMAL DURCHLÄSSIGE BÖDEN</b>		
a	sehr tiefgründig	> 100
b	tiefgründig	70 - 100
c	mässig tiefgründig	50 - 70
d	ziemlich flachgründig	30 - 50
e	flachgründig und sehr flachgründig	< 10 - 30
<b>STAUWASSERBEEINFLUSSTE BÖDEN</b>		
f	tiefgründig	70 - 100
g	mässig tiefgründig	50 - 70
h	ziemlich flachgründig	30 - 50
i	flachgründig und sehr flachgründig	< 10 - 30
<b>GRUND- UND HANGWASSERBEEINFLUSSTE BÖDEN</b>		
k	tiefgründig	70 - 100
l	mässig tiefgründig	50 - 70
m	ziemlich flachgründig	30 - 50
n	flachgründig und sehr flachgründig	< 10 - 30
<b>STAUWASSERGERPÄGTE BÖDEN</b>		
<b>SELTEN BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
	mässig tiefgründig und tiefgründig	50 - 100
	ziemlich flachgründig und flachgründig	10 - 50
<b>HÄUFIG BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
	ziemlich flachgründig	30 - 50
	flachgründig und sehr flachgründig	< 10 - 30
<b>GRUND- UND HANGWASSERGEPRÄGTE BÖDEN</b>		
<b>SELTEN BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
	tiefgründig	70 - 100
	mässig tiefgründig	50 - 70
	ziemlich flachgründig und flachgründig	10 - 50
<b>HÄUFIG BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
	mässig tiefgründig	50 - 70
	ziemlich flachgründig	30 - 50
<b>MEIST BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
	ziemlich flachgründig	30 - 50
	flachgründig und sehr flachgründig	< 10 - 30
<b>DAUERND BIS ZUR OBERFLÄCHE PORENGESÄTTIGT</b>		
z	sehr flachgründig	< 10

Tab. A2: Boden-Untertypen (Quelle: FAL 1998)

<b>P</b>	<b>Profilschichtung/-umlagerung</b>	<b>F</b>	<b>Verteilung des Fe-Oxids</b>	<b>R</b>	<b>Fremdnässe dauernd</b>
PE	erodiert	FB	verbraunt	R1	schwach grundnass
PK	kolluvial	BP	podsolig	R2	grundnass
PM	anthropogen	FE	eisenhüllig	R3	stark grundnass
PA	alluvial	FQ	quarkörnig	R4	sehr stark grundnass
PU	überschüttet	FM	marmoriert	R5	sumpfig
PS	auf Seekreide	FK	konkretionär	<b>D</b>	<b>Drainage</b>
PP	polygenetisch	FG	graufleckig	DD	drainiert
PL	aeolisch	FR	rubefiziert	<b>M</b>	<b>org. Substanz aerob</b>
PT	mit Torfzwischen-schicht(en)	<b>Z</b>	<b>Gefüge-Zustand</b>	ML	rohhumos
PD	stark durchlässiger Untergrund	ZS	krümelig, bröcklig (stabil)	MF	modrighumos
<b>V</b>	<b>Verwitterungsart/extr. Körnung</b>	ZK	klumpig	MA	humusarm
VL	lithosolisch (< 10 cm u.T.)	ZT	tonhüllig	MM	mullhumos
VF	auf Fels (10 - 60 cm u.T.)	ZV	vertisolisch	MH	huminstoffreich
VU	kluftig	<b>ZL</b>	<b>labilaggregiert</b>	<b>O</b>	<b>org. Substanz hydro-morph</b>
VA	karstig	ZP	pelosolisch	OM	anmoorig
VB	blockig	<b>L</b>	<b>Lagerungsdichte</b>	OS	sapro-organisch
VK	psephitisch (extr. kiesig)	L1	locker	OA	antorfig
VS	psammitisch (extr. sandig)	<b>L2</b>	<b>verdichtet</b>	OF	flachtorfig
VT	pelitisch (extr. feinkörnig)	L3	kompakt	OT	tieftorfig
<b>E</b>	<b>Säuregrad (pH CaCl<sub>2</sub>)</b>	L4	verhärtet	<b>T</b>	<b>Typenausprägung</b>
E0	alkalisch >6,7	<b>I</b>	<b>Stauanässe</b>	T1	schwach ausgeprägt
E1	neutral 6,2 - 6,7	I1	schwach pseudogleyig	T2	ausgeprägt
E2	schwach sauer 5,1 - 6,1	I2	pseudogleyig	T3	degradiert
E3	sauer 4,3 - 5,0	I3	stark pseudogleyig	<b>H</b>	<b>Horizontierung</b>
E4	stark sauer 3,3 - 4,2	I4	sehr stark pseudogleyig	HD	diffus
E5	sehr stark sauer < 3,3	<b>G</b>	<b>Fremdnässe wechselnd</b>	HA	abrupt horizontiert
<b>K</b>	<b>Karbonatgehalt</b>	G1	grundfeucht	HU	unregelmässig horizon-tiert
KE	teilweise entkarbonatet	G2	schwach gleyig	HB	biologisch durchmischt
KH	karbonathaltig	G3	gleyig	HT	tiefgepflügt, rigolt
KR	karbonatreich	G4	stark gleyig		
KF	kalkflaumig	G5	sehr stark gleyig		
KT	kalktuffig	G6	extrem gleyig		
KA	natriumhaltig				

Tab. A3: Körnungsklassen (Quelle: FAL 1998).

Körnungsklassen		Abkürzung	Code	Ton	Schluff	Bindigkeit	Bearbeitbarkeit
			Körnungsklassen	%	%		
Tonige Böden	Tonboden	T	9	> 50	< 50		
	lehmiger Ton	IT	8	50 – 40	< 50	sehr stark	schwer
	toniger Lehm	tL	7	40 – 30	< 50		
Schluffige Böden	toniger Schlufflehm	tU	6	50 – 30	> 50	ziemlich	
	Schlufflehm	IU	5	30 – 10	> 50	stark	mittelschwer
	Schluffboden	U	4	< 10	> 50		
Lehmige Böden	Lehmboden	L	3	30 – 20	< 50	mässig	mittelschwer
	sandiger Lehm	sL	2	20 – 10	< 50		
Sandige Böden	lehmiger Sandboden	IS	1	10 – 5	< 50	schwach	leicht
	Sandboden	S	0	< 5	< 50		

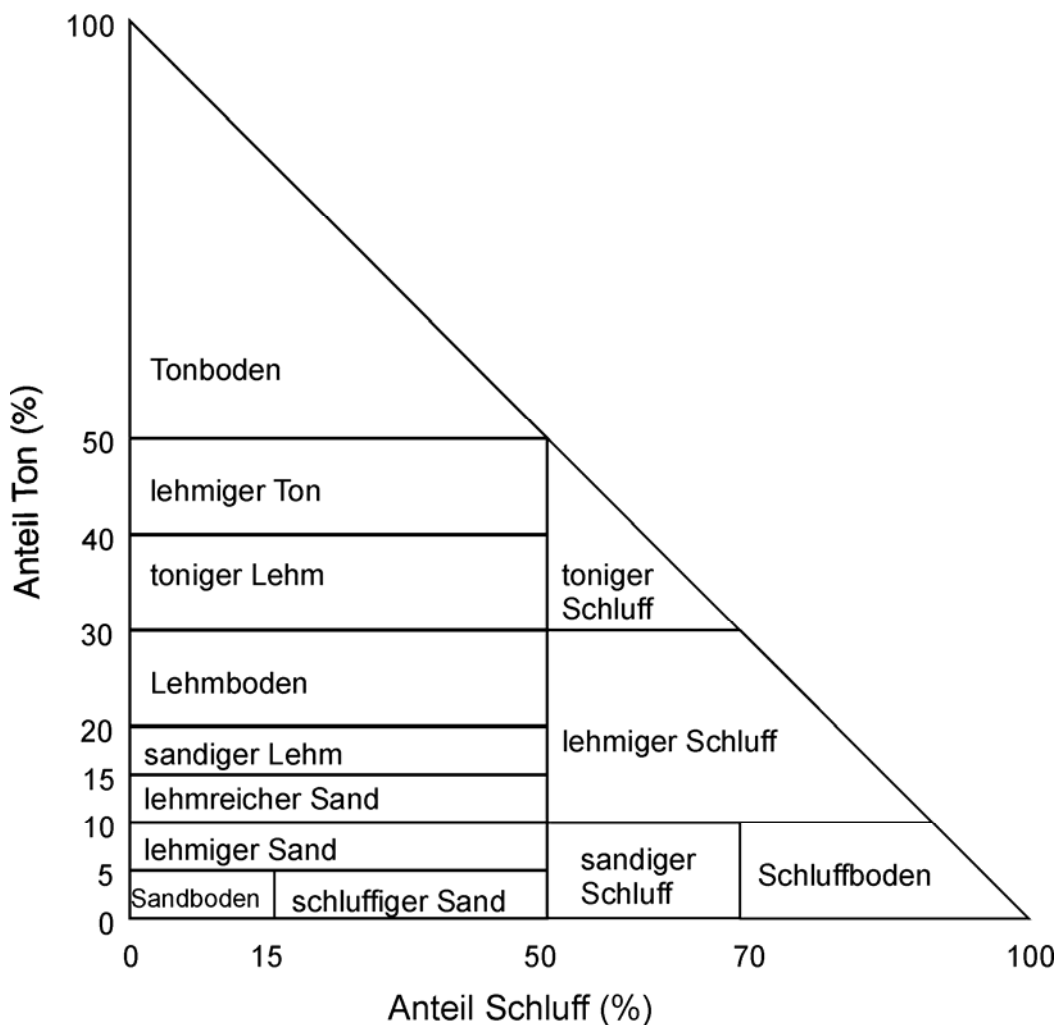
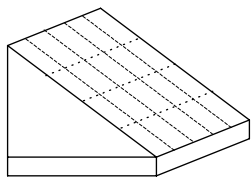
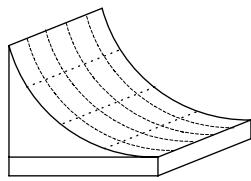


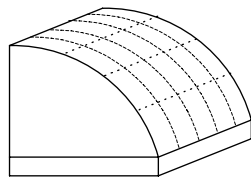
Abb. A1: Körnungdiagramm (Quelle: FAL 1998).



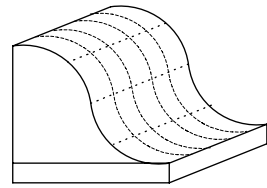
allseitig gestreckt



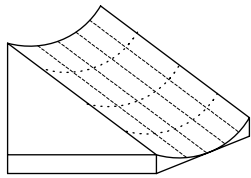
längs konkav quer gestreckt



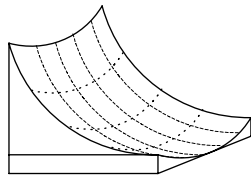
längs konvex quer gestreckt



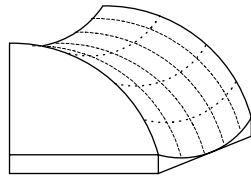
längs konvex-konkav quer gestreckt



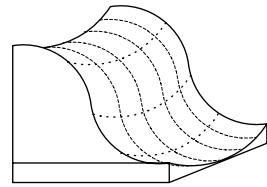
längs gestreckt quer konkav



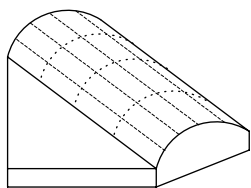
allseitig konkav



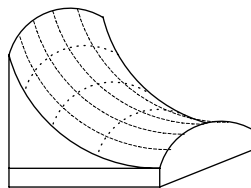
längs konvex quer konkav



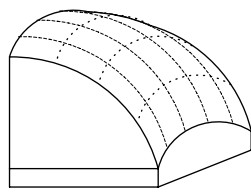
längs konvex-konkav quer konkav



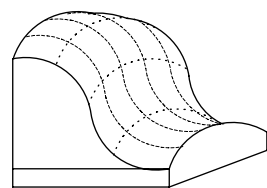
längs gestreckt quer konvex



längs konkav quer konvex



allseitig konvex



längs konvex-konkav quer konvex

Abb. A2: Schema zur Beurteilung der Hangform (Quelle: PRASUHN & GRÜNIG 2001, verändert).