



Saubere Seen
(Forschungsprojekt Schwarzach)
2002 – 2005

**Institut für Agrarökologie,
Ökologischen Landbau und Bodenschutz
Januar 2007 (aktualisiert August 2008)**



Auftraggeber:

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten

Projektfinanzierung:

zu 50 % mit Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) aus dem Programm INTERREG III A – PHARE CBC Freistaat Bayern – Tschechien

Projektkonzeption:

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL),
Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (IAB)

Beteiligte Institutionen:

Regierung der Oberpfalz,
Wasserwirtschaftsämter Regensburg und Amberg
Ämter für Landwirtschaft und Forsten Cham, Schwandorf/Nabburg, Regensburg

Projektleitung:

Ulrich Hege / Dr. Michael Diepolder (ab April 2006)



Saubere Seen
(Forschungsprojekt Schwarzach)
2002 – 2005

von Dr. Michael Diepolder und Sven Raschbacher

**Institut für Agrarökologie,
Ökologischen Landbau und Bodenschutz
Januar 2007 (aktualisiert August 2008)**

Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung	13
1 Einleitung.....	16
2 Zielstellung.....	18
3 Material und Methoden.....	19
3.1 Messstellen und Probenahmetechnik	19
3.1.1 Hauptmessstellen	19
3.1.2 Schöpfproben	21
3.2 Gebiets- und Betriebserhebungen	22
3.3 Beregnungsversuche über Drainagen.....	22
3.4 Beregnungsversuche zur Wirkung von Randstreifen.....	27
3.5 Methodik der Wasseranalytik	29
3.6 Datenaufbereitung und -auswertung	30
4 Ergebnisse	31
4.1 Lage der Einzugsgebiete	31
4.2 Klima.....	31
4.3 Böden	31
4.3.1 Bodenart und Bodentyp	31
4.3.2 Phosphatversorgung der landwirtschaftlich genutzten Böden	33
4.4 Einzugsgebietsbeschreibung und P-Frachten.....	35
4.4.1 Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer Stausee (Messstelle Wutzschleife).....	35
4.4.1.1 Flächennutzung und Viehbesatz.....	35
4.4.1.2 Analyse der P-Frachten	35
4.4.2 Teileinzugsgebiet Saxlmühle	46
4.4.2.1 Flächennutzung und Viehbesatz.....	46
4.4.2.2 Analyse der P-Frachten	47
4.4.3 Teileinzugsgebiet Irlach.....	53
4.4.3.1 Flächennutzung und Viehbesatz.....	53
4.4.3.2 Analyse der P-Frachten	54
4.4.4 Teileinzugsgebiet Zillendorf	62
4.4.4.1 Flächennutzung und Viehbesatz.....	62
4.4.4.2 Analyse der P-Frachten	63
4.4.5 Teileinzugsgebiet Breitenried	70
4.4.5.1 Flächennutzung und Viehbesatz.....	70
4.4.5.2 Analyse der P-Frachten	71

4.4.6	Gesamteinzugsgebiet Drachensee	78
4.4.6.1	Flächennutzung und Viehbesatz	78
4.4.6.2	Analyse der P-Frachten	78
4.5	Schöpfproben	82
4.5.1	Siedlungseinfluss auf die P-Konzentration in Fließgewässern	82
4.5.2	Einfluss der Entnahmestelle auf die P-Konzentration in Fließgewässern	84
4.5.3	Einfluss der Probenahmetiefe auf die P-Konzentration in Fließgewässern	87
4.6	Berechnungsversuche über Drainagen	89
4.6.1	P-Frachten	89
4.6.2	Beziehungen zwischen den P-Frachten und der Abflussmenge	91
4.6.3	P-Fraktionen	92
4.6.4	P-Konzentrationen	93
4.7	Berechnungsversuche zur Wirkung ungedüngter 5m-Randstreifen bei hängigen Grünlandflächen	94
4.7.1	Mittelwertsvergleiche	94
4.7.2	Korrelationen	97
4.8	Entwicklung des Flächenumfangs wichtiger Maßnahmen des Kulturlandschaftsprogramms (KULAP) zum Gewässerschutz	100
4.8.1	Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer Stausee	100
4.8.2	Gesamteinzugsgebiet Drachensee	102
4.9	Entwicklung der Hoftorsalden	104
4.9.1	Beratungsaktivitäten bezüglich einer „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“ in den beiden Gesamteinzugsgebieten	106
5	Diskussion	109
5.1	Einfluss der Landnutzung auf den P-Eintrag in Oberflächengewässer sowie mögliche Optimierungsansätze	109
5.1.1	Gesamteinzugsgebiete	110
5.1.2	Teileinzugsgebiete	112
5.2	Beurteilung der Ergebnisse der Berechnungsversuche über drainiertem Grünland	114
5.2.1	Bedeutung des Zwischenabflusses als P-Eintragspfad	114
5.2.2	P-Austrag über Drainagen nach Starkregenereignissen (ohne Düngung)	114
5.2.3	P-Austrag über Drainagen nach direkt auf konventionelle Gülledüngung (Prallteller) folgenden Starkregenereignissen	115
5.2.4	P-Austrag über Drainagen nach auf Gülledüngung folgenden Starkregenereignissen in Abhängigkeit von der Ausbringtechnik	116
5.2.5	Wissenswertes und Erfahrungen zur Gülleinjektion	117

5.3	Beurteilung der Ergebnisse der Beregnungsversuche zur Wirkung von ungedüngten Randstreifen bei hängigem Grünland in Gewässernähe.....	119
5.3.1	Aspekte zur gewählten Methodik	119
5.3.2	Wirkung des Randstreifens bei simulierten Starkregenereignissen.....	120
5.3.3	Wirkung des Randstreifens im Vergleich zur flachen Gülleinjektion bei Starkregenereignissen	121
5.4	Ableitung von übertragbaren Maßnahmen zur Reduzierung von P-Einträgen in Oberflächengewässer	123
6	Literaturverzeichnis.....	128
7	Danksagung	130

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Algenblüte am Eixendorfer Stausee	17
Abb. 2: Hauptmessstellen und Schöpfprobenahmestellen	19
Abb. 3: Probenehmer der Firma ISCO	20
Abb. 4: Detailansicht eines V-Wehrs mit Druckpegelsensor und Probenahmeschlauch	21
Abb. 5: Wege des P-Transportes in Gewässer unter besonderer Berücksichtigung des Makroporen- und Zwischenabflusses	23
Abb. 6: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Durchführung der Beregnungsversuche über Drainage	24
Abb. 7: Laufender Beregnungsversuch über Grünland	25
Abb. 8: Gülleausbringung mit flacher Injektion (Schlitztechnik)	25
Abb. 9: Abflussmessung und Probenahme am Drän	27
Abb. 10: Darstellung von Versuchsaufbau, Varianten und Abflussmessung	28
Abb. 11: Beregnungsanlage mit Windschutz und Leitblechen (links)	29
Abb. 12: Niederschlagsverteilung und Temperatur im Untersuchungszeitraum	31
Abb. 13: Lage der untersuchten Einzugsgebiete	32
Abb. 14: Flächennutzung im Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer See	35
Abb. 15: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Gesamteinzugsgebiet (Messstelle Wutzschleife) im Zeitraum Mai 99 bis Dez. 04	38
Abb. 16: Beziehung zwischen monatlicher Abflussmenge und TP-Fracht	42
Abb. 17: Beziehung zwischen den TP-Konzentrationen der einzelnen Untersuchungs-proben (Flaschen) und der während der Probenahme ausgetragenen TP-Fracht an der Messstelle Wutzschleife	42
Abb. 18: Teileinzugsgebiet Saxlmühle mit Flächennutzung	46
Abb. 19: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Saxlmühle	47
Abb. 20: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teileinzugsgebiet Saxlmühle im Zeitraum Mai 99 bis Dez. 04	49
Abb. 21: Teileinzugsgebiet Irlach mit Flächennutzung	53
Abb. 22: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Irlach	54
Abb. 23: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teileinzugsgebiet Irlach im Zeitraum Mai 00 bis Dez. 04	56
Abb. 24: Beziehung zwischen TP-Fracht und Anteil des partikulären Phosphors am TP	58
Abb. 25: Teileinzugsgebiets Zillendorf mit Flächennutzung	62
Abb. 26: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Zillendorf	63

Abb. 27: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teileinzugsgebiet Zillendorf im Zeitraum Mai 1999 bis Dez. 2004.....	65
Abb. 28: Beziehung zwischen der monatlichen Abflussmenge und der aus dem TEZG Zillendorf ausgetragenen TP-Fracht	68
Abb. 29: Teileinzugsgebiets Breitenried mit Flächennutzung	70
Abb. 30: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Breitenried	71
Abb. 31: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teileinzugsgebiet Breitenried im Zeitraum Oktober 2002 bis Dez. 2004.....	73
Abb. 32: Beziehung zwischen der monatlichen Abflussmenge und der aus dem TEZG Breitenried ausgetragenen TP-Fracht.....	75
Abb. 33: Flächennutzung des Einzugsgebiets Drachensee (nach JÜRGENS, 2006).....	78
Abb. 34: Verlauf der TP-Konzentrationen an der Schwarzach vor und nach der Kläranlage Waldmünchen	82
Abb. 35: Verlauf der TP-Konzentrationen vor und nach der Siedlung Zillendorf.....	83
Abb. 36: Verlauf der TP-Konzentrationen bei Schöpfproben an der Oberfläche des linken und rechten Ufers des Flusses Chamb sowie bei Wasserproben deutlich unter der Oberfläche mittels des automatischen Probenehmers.....	85
Abb. 37: Verlauf der Konzentrationen von partikulärem Phosphor am Fluss Chamb bei Schöpfproben an der Oberfläche des rechten Ufers sowie bei Wasserproben deutlich unter der Oberfläche mittels eines automatischem Probenehmers	86
Abb. 38: Wasserproben aus Drainagen nach einem simulierten Starkregenereignis (links nach vorausgegangener Güllapplikation, rechts nach Beregnung ohne vorheriger Gülleausbringung).....	89
Abb. 39: Beziehungen zwischen Abfluss-Menge und Austrag an Gesamt-Phosphor (TP) bei verschiedenen Düngungsvarianten nach simuliertem Starkregenereignissen.....	91
Abb. 40: Ø P-Fracht (TP) in Abhängigkeit von Variante und Beregnungsmenge	94
Abb. 41: Beziehung zwischen Abflussmenge und P-Fracht (TP) bei den drei Varianten bei Beregnungsmengen von 10 l/m ² (oben) und 20 l/m ² (unten) nach Abflussbeginn	98
Abb. 42: Entwicklung des Mulchsaatverfahrens bei Mais im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees	100
Abb. 43: Entwicklung der KULAP-Maßnahmen für gewässersensible Bereiche im Gesamt-Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees	102
Abb. 44: Entwicklung der durchschnittlichen Nährstoffsalden auf Hoftor-Basis in den TEZG des Eixendorfer Sees (Mittel der Betriebe in den TEZG).....	104

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Übersicht der Probenahme an Hauptmessstellen	20
Tab. 2: Charakteristik des Versuchsstandortes Döfering (nach KREMB et al., 2002).....	23
Tab. 3: Kennwerte zu der im Versuch eingesetzten Milchviehgülle.....	26
Tab. 4: Kennwerte zu der im Zeitraum April bis November 2004 eingesetzten Milchviehgülle	29
Tab. 5: Phosphatversorgung der in Bayern gelegenen landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees in den Jahren 1998 bis 2003 (Angaben zu den Gehaltsklassen in mg CAL-P ₂ O ₅ pro 100 g Boden)	33
Tab. 6: Phosphatversorgung der in Bayern gelegenen landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet des Drachensees in den Jahren 1999 bis 2004 (Angaben zu den Gehaltsklassen in mg CAL-P ₂ O ₅ pro 100 g Boden)	34
Tab. 7: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht und TP-Konzentration in den Eixendorfer See (Messstelle Wutzschleife) im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004.....	36
Tab. 8: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Wutzschleife in den Monaten (n=68) des Zeitraums Mai 99 bis Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat.....	37
Tab. 9: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatswerte	39
Tab. 10: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) überdurchschnittlicher und hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel).....	40
Tab. 11: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben.....	41
Tab. 12: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im GEZG Eixendorfer See (Messstelle Wutzschleife)	44
Tab. 13. Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht (Mittel und Spannweiten) aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Eixendorfer Stausee.....	45
Tab. 14: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht und TP-Konzentration im TEZG Saxlmühle im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004	47
Tab. 15: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Saxlmühle in den Monaten (n = 68) des Zeitraums Mai 99 – Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat.....	48

Tab. 16: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatsmittelwerte.....	50
Tab. 17: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)	51
Tab. 18: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben.....	51
Tab. 19: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Saxlmühle.....	51
Tab. 20: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Saxlmühle.....	52
Tab. 21: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im TEZG Irlach im Zeitraum Mai 2000 bis Dezember 2004.....	54
Tab. 22: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Irlach in den Monaten (n = 56) des Zeitraums Mai 2000 – Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat.....	55
Tab. 23: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 56 Monatsmittelwerte.....	57
Tab. 24: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben.....	59
Tab. 25: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)	59
Tab. 26: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im Teileinzugsgebiet Irlach.....	60
Tab. 27: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Irlach.....	60
Tab. 28: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im TEZG Zillendorf im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004.....	63
Tab. 29: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Zillendorf in den Monaten (n = 68) des Zeitraums Mai 1999 – Dez. 2004; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat.....	64
Tab. 30: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatsmittelwerte.....	66
Tab. 31: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben.....	67

Tab. 32: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)	68
Tab. 33: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Zillendorf.....	69
Tab. 34: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Zillendorf.....	69
Tab. 35: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fraktionen im TEZG Breitenried im Zeitraum Oktober 2002 bis Dezember 2004	71
Tab. 36: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Breitenried in den Monaten (n = 27) des Zeitraums Okt. 2002 – Dez. 2004; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat.....	72
Tab. 37: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 27 Monatsmittelwerte.....	74
Tab. 38: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben	75
Tab. 39: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) überdurchschnittlich hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel).....	76
Tab. 40: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Breitenried.....	76
Tab. 41: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Breitenried	77
Tab. 42: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fraktionen im Einzugsgebiet Drachensee im Zeitraum Dezember 2002 bis Dezember 2004.....	79
Tab. 43: TP-Fracht in den Drachensee in Abhängigkeit von der Flächennutzung.....	80
Tab. 44: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht in den Drachensee aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche.....	81
Tab. 45: Mittelwerte der P-Konzentrationen (gesamt, löslich, partikulär) an der Schwarzach vor und nach der Kläranlage Waldmünchen.....	83
Tab. 46: Mittelwerte der P-Konzentrationen (gesamt, löslich, partikulär) am Bach vor und nach der Siedlung Zillendorf.....	84
Tab. 47: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme auf die der TP-Konzentration am Fluss Chamb.....	85
Tab. 48: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme auf die DTP-Konzentration am Fluss Chamb	86
Tab. 49: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme (hier: Messungen in der Flussmitte bei unterschiedlicher Höhe über Grund und am rechten Ufer) auf die TP- bzw. DTP-Konzentration im Chamb.....	87

Tab. 50: P-Frachten und P-Konzentrationen im Drainageabfluss nach künstlich erzeugten Starkregenereignissen	90
Tab. 51: Beziehung zwischen Abflussmenge am Drän [x (l/m^2) und P-Fracht [y (g/ha TP, DTP)] sowie P-Konzentration [y (mg/l TP, DTP)]	92
Tab. 52: Mittlere Berechnungsmengen, Wasserabflüsse, P-Konzentrationen und P_{gesamt} -Frachten sowie Anteil der löslichen P-Fracht an der TP-Fracht der drei Varianten bei unterschiedlichen Berechnungsmengen nach Abflussbeginn.....	95
Tab. 53: Variationskoeffizienten (prozentuales Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert) der in Tabelle 52 dargestellten Mittelwerte als Maß der in den Versuchen aufgetretenen Streuungen	96
Tab. 54: Korrelationskoeffizienten (r) mit Signifikanzniveau der Beziehungen zwischen der Abflussmenge und den Parametern P_{gesamt} -Konzentration, P_{gesamt} -Fracht (TP), sowie Anteil $P_{löslich}$ (DTP) an der P_{gesamt} -Fracht (DTP/TP) bei unterschiedlicher Berechnungsmenge nach Abflussbeginn.....	97
Tab. 55: Entwicklung des Flächenumfangs ausgewählter KULAP-Maßnahmen im bayerischen Drachenseeeinzugsgebiet (alle Angaben in ha)	103
Tab. 56: Seminare und Tätigkeiten zur „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees in den Jahren 2000-2005 sowie überregionale Transformation der gewonnenen Erkenntnisse	106
Tab. 57: Seminare und Tätigkeiten zur „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ im Einzugsgebiet des Drachensees in den Jahren 2002-2005 sowie überregionale Transformation der gewonnenen Erkenntnisse	107
Tab. 58: Aktivitäten der LfL bei der Umsetzung und Transformation von projektbezogenen Maßnahmen zur „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“	108
Tab. 59: Übersicht zur Flächennutzung, zum Wasserabfluss, zur TP-Konzentration, zur TP-Fracht und deren P-Fraktionen aus dem jeweiligen Einzugsgebiet und zur Kalkulation des aus der LN stammenden Anteils	109
Tab. 60: Übersicht zur landwirtschaftlichen Nutzung, zur kalkulierten TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie Abschätzung des Anteils von TP-Frachten aus einzelnen Austragspfaden in den jeweiligen Einzugsgebieten	110
Tab. 61: Vergleich zwischen der Wirkung von flacher Gülleinjektion und ungedüngten Randstreifen in Bezug auf Minderung der P-Frachten und der P-Konzentrationen gegenüber flächiger Gülleapplikation.....	122
Tab. 62: Katalog zur Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des P-Austrags (ggf. auch des N-Austrags) bei landwirtschaftlich genutzten Flächen; besonders wirkungsvolle Maßnahmen in Bezug auf den P-Austrag sind fett herausgehoben.....	124

Saubere Seen

M. Diepolder und S. Raschbacher

Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojekts „Saubere Seen“ war die mehrjährige Messung von Abflüssen, P-Konzentrationen, daraus resultierenden P-Frachten und die Quantifizierung unterschiedlicher Austragspfade in den Einzugsgebieten zweier eutropher Stauseen in der Oberpfalz. Daraus sollten Maßnahmen zur Reduzierung des diffusen P-Austrags aus landwirtschaftlichen Nutzflächen erforscht, erarbeitet und in der Region umgesetzt werden.

Einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten langjährige kontinuierliche Messreihen am Fluss Schwarzach, aus denen die P-Belastung aus dem Gesamteinzugsgebiet des Eixendorfer Stausees bestimmt wurde sowie Messreihen bei vier ausgewählten Teileinzugsgebieten des Eixendorfer Stausees mit unterschiedlicher Flächennutzung. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch zweijährige Analysen der P-Belastung des Flusses Chamb, welcher den neu aufgestauten Drachensee in der bayerisch-tschechischen Region speist.

Die mittleren jährlichen Einträge an Gesamt-Phosphor (TP) schwankten in den einzelnen Einzugsgebieten zwischen 0,19 kg TP/ha und 0,55 kg TP/ha. Entscheidend für die Unterschiede ist die unterschiedliche Struktur (Wald- und Siedlungsanteil, Anteil und Zusammensetzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen, Intensität der Landwirtschaft) in den einzelnen Einzugsgebieten.

Die durchschnittlichen jährlichen P-Frachten aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen bewegten sich in den vier Teileinzugsgebieten in einer Spannweite von 0,20 bis 0,64 kg TP/ha und Jahr. Die Obergrenze wurde dabei bei demjenigen Teileinzugsgebiet mit dem höchsten Anteil (76 %) an Ackerflächen - welche zudem überwiegend mittel bis stark erosionsgefährdet waren - ermittelt. Dagegen bildete das Teileinzugsgebiet mit dem höchsten Grünlandanteil (70 % der LN) und dem geringsten Viehbesatz die Untergrenze. Am gesamten TP-Austrag aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen spielte der Oberflächenabfluss vom Grünland mit durchschnittlich 7 % eine untergeordnete Rolle. Je nach Standortvoraussetzungen der Teileinzugsgebiete variierte der durch Erosion bedingte Anteil des TP-Austrags aus der LN zwischen 18 % und 65 %. Der Anteil des vertikalen P-Austrags aus der LN über die Pfade Drainagen, Zwischenabfluss und Grundwasser schwankte zwischen 33 und 67 %.

Hohe monatliche P-Frachten traten in allen Einzugsgebieten meist in Verbindung mit hohen monatlichen Abflussraten vor allem im Winterhalbjahr auf. Extrema der TP-Konzentration lagen dagegen im Hochsommer. Möglichkeiten zur Minderung des P-Eintrages werden demnach vorzugsweise in einer Reduzierung der Bodenerosion durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung hängiger Ackerflächen (Zwischenfruchtanbau, Winterbegrünung, Mulch- oder Direktsaat) sowie in einem Abbau des P-Gehalts der häufig mit Phosphor übersorgten Ackerflächen (verbessertes Gülle- und Mineräldüngermanagement) gesehen.

Sowohl am Eixendorfer Stausee als auch am Drachensee lagen im jeweiligen Messzeitraum die P-Einträge und P-Konzentrationen deutlich höher, als dies für die Erreichung eines mesotrophen Zustands notwendig wäre. In beiden Fällen dürfte damit unter den ge-

genwärtigen Rahmenbedingungen eine zufriedenstellende Badewasserqualität vorläufig nicht zu erreichen sein.

Durch die gezielte Entnahme von Schöpfproben sollten Aussagen über mögliche Effekte der Probenahmetechnik (Ort, Entnahmetiefe) erzielt werden. So konnte am Beispiel zweier Fließgewässer ein deutlicher Anstieg der P-Konzentrationen (Gesamt-P und lösliches P) nach Siedlungen nachgewiesen werden. Weiterhin deutete sich anhand von Messungen am Chamb an, dass bei langsam strömenden Fließgewässern weder eine Horizontierung von Schwebstoffen, demzufolge auch kein P-Konzentrationsgradient auftrat, noch bei Probenahmen an Biegungen im Flussverlauf die Seite (Innenkurve, Außenkurve) das Messergebnis verändert. Insgesamt konnte gefolgert werden, dass auch mit der einfachen und kostengünstigen Schöpfprobentechnik hinreichend genaue Aussagen über die P-Konzentrationen von Fließgewässern getroffen werden können, sofern ein hinreichend enger zeitlicher Abstand der Probenahme gewahrt wird.

In einem weiteren Projektschwerpunkt wurde mit aufwändigen Beregnungsversuchen gezeigt, dass bei drainierten Grünlandflächen einzelne Starkregenereignisse direkt nach einer Düngung 50 % des durchschnittlichen jährlichen P-Austrags aus landwirtschaftlichen Flächen bewirken können.

In den durchgeführten Versuchen, in denen direkt nach einer Gülleausbringung ein Starkregenereignis simuliert wurde, ging über den Zwischenabfluss, d.h. über Makroporenfluss bis zu 5 % der gedüngten P-Menge verloren.

Bemerkenswert war bei den Untersuchungen, dass auch im Falle fehlender Düngung, jedoch aus produktionstechnischer Sicht optimaler pflanzenverfügbarer P-Versorgung (CAL-Phosphat) des Bodens, Phosphor (überwiegend in löslicher Form) ausgetragen wurde. In seiner Größenordnung lag dieser Anteil bei etwa 10 % des durchschnittlichen jährlichen P-Austrags aus landwirtschaftlich genutzten Flächen im Untersuchungsgebiet.

Ferner zeigten die Untersuchungen, dass die Art der Gülleausbringetechnik einen Einfluss auf den P-Austrag haben kann. So wurde in den Fällen, in denen statt der oberflächlichen Ausbringung mit dem Prallteller die Gülle mit einem Injektionsgerät flach in die Grasnarbe eingeschleift wurde, ein im Mittel um 60 % reduzierter P-Austrag aus den drainierten Flächen erzielt. Somit deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die flache Gülleinjektion gerade bei ökologisch sensiblen Gewässern mit einem hohen Anteil an drainierten Grünlandflächen im Einzugsbereich eine Möglichkeit sein kann, hohe P-Einträge und P-Konzentrationsspitzen zu senken. Die aus den Beregnungsversuchen gewonnenen Erkenntnisse konnten bereits in einem weiteren überregionalem Projekt in der bayerisch-österreichischen Region im Traunsteiner/Salzburger Land eingebracht werden.

Ebenfalls konnte durch Beregnungsversuche bewiesen werden, dass bei hängigen Grünlandflächen ungedüngte Randstreifen in Gewässernähe dazu beitragen können, die P-Konzentration im abfließenden Wasser und damit den P-Austrag nach intensiven Niederschlägen signifikant zu mindern. Dieser positive Effekt kommt umso mehr zum Tragen, je höher ein Starkregenereignis ausfällt.

Durch eine engagierte Beratungsarbeit vor Ort (Einzugsgebietsberater, Ämter für Landwirtschaft, LfL) gelang es, in der landwirtschaftlichen Praxis wichtige gewässerschonende Maßnahmen zu etablieren und auszuweiten. So stieg der Anteil an Maisflächen mit Mulchsaat/Winterbegrünung und die Teilnahme an weiteren KULAP-Maßnahmen für gewässersensible Bereiche in den Einzugsgebieten während der Projektlaufzeit deutlich an. Weiterhin deutete sich beim Hoftorsaldo eine Senkung der positiven P-Salden an.

Ferner wurde im Sinne der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in enger Zusammenar-

beit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt ein Katalog von übertragbaren Maßnahmen zur Reduzierung überhöhter P-Einträge in Oberflächengewässer erstellt.

1 Einleitung

Mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) hat sich die europäische Wasserpolitik das Ziel „sauberer und lebendiger Gewässer in Europa“ gesetzt (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 2004). Bei der Vorgabe, bis zum Jahr 2015 einen „Guten Zustand aller Wasserkörper“ zu erreichen und unter der Prämisse eines generell bestehenden Verschlechterungsverbots sieht die WRRL speziell für Oberflächengewässer die Herbeiführung sowohl eines guten chemischen, wie auch ökologischen Zustandes vor. Dies beinhaltet die Entwicklung von Strategien und Normen gegen die Wasserverschmutzung. Zudem wird durch die WRRL der Wasserschutz zu einer gesamteuropäischen Aufgabe, die fach- und grenzüberschreitende Ansätze erfordert.

Zielsetzung des INTERREG-III-A-Forschungsprojektes „*Saubere Seen*“ ist es, im Einzugsgebiet von zwei Stauseen, die in den oberpfälzischen Landkreisen Cham und Schwandorf liegen, den Phosphoreintrag zu quantifizieren sowie Erkenntnisse über die Ursachen und Wege des Phosphoreintrags zu gewinnen. Ausgehend davon sollen Maßnahmen zur Verringerung der P-Belastung abgeleitet, in der Praxis umgesetzt und in Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf andere Gebiete geprüft werden.

Das Forschungsprojekt „Saubere Seen“ ist gewissermaßen ein Folgeprojekt des 1999 bis 2001 von der damaligen Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau durchgeführten Forschungsprojektes „*Ursachen von Phosphatbelastungen der Landwirtschaft in Seen mit Acker- und Grünlandnutzung im Einzugsgebiet und Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung des Eintrags am Eixendorfer Stausee (Lkr. Schwandorf)*“. Ziel ist es, die im Vorgängerprojekt gewonnenen Erkenntnisse über einen längeren Messzeitraum genauer zu quantifizieren und offene gebliebene sowie neu entstandene Fragestellungen zu beantworten.

Der Eixendorfer Stausee ist ein künstlicher Aufstau der Schwarzach in einem Talbecken auf ca. 6,2 km Länge zwischen den Ortschaften Rötz und Neunburg vorm Wald in der Oberpfalz. Bei normalen Betriebsverhältnissen beträgt die mittlere Wassertiefe 5,6 m und der durchschnittliche Zufluss aus der den See speisenden Schwarzach rund vier Kubikmeter pro Sekunde. Daraus ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Wassers von 11,3 Tagen, die sich im Sommer aufgrund der verringerten Zuflussmenge bis auf 30 Tage ausdehnen, andererseits bei Hochwasserereignissen beträchtlich verkürzen kann.

Mit entscheidend für die oft schlechte Qualität des Wassers ist die Tatsache, dass der Eixendorfer See ein im Vergleich zu natürlichen Seen sehr großes Einzugsgebiet besitzt. Mit einer Ausdehnung von 410 km² ist dieses rund 400 mal größer als seine Wasseroberfläche. Die Schwarzach entwässert eine Mittelgebirgslandschaft mit steilen Waldhängen und z. T. intensiv genutzten Hochflächen. Das Einzugsgebiet wird zu 46 % als Wald, zu 47 % als landwirtschaftliche Nutzfläche und zu 7 % als Siedlungs- bzw. Verkehrsfläche genutzt.

Seit über fünfzehn Jahren häufen sich die Beschwerden über eine Verschlechterung der Wassergüte. Zudem kam es aufgrund des Einstaus zu einer ungünstigen Entwicklung des Artenspektrums bei Tieren und Pflanzen. Als Folge von Nährstoffeinträgen hat der See eine polytrophe Zustandstufe erreicht. Jährliche Algenblüten beeinträchtigen Biozöosen und Nutzung. In den Sommermonaten sind sehr starke Blaualgenblüten (Cyanobakterien) zu beobachten (siehe Abbildung 1), deren Toxine zu Nutzungsbeeinträchtigungen für den

Badebetrieb und sonstigen wassergebundenen Freizeitbetätigungen (z. B. Segeln) führen. Auch Fischsterben tritt häufig auf.



Abb. 1: Algenblüte am Eixendorfer Stausee

Beim sich momentan in der Bauphase befindlichen Drachensee wird der Fluss Chamb in erster Linie zum Hochwasserschutz der Stadt Furth im Wald auf einer Fläche von 88 ha aufgestaut. Das Einzugsgebiet beträgt 212 km², wobei 120 km² auf deutschem und 92 km² auf tschechischem Gebiet liegen. Es wird zu ca. 55 % landwirtschaftlich, zu 40 % forstwirtschaftlich und zu ca. 5 % als Siedlungs- und Verkehrsfläche genutzt.

In der Vergangenheit durchgeführte Messungen deuten darauf hin, dass sich auch im Drachensee polytrophe Verhältnisse einstellen werden. D. h. eine touristische Nutzung als Badensee dürfte relativ problematisch werden.

Das Problem zu hoher P-Frachten ist zum Einen durch die Reduzierung der Einträge aus Siedlung (Bau bzw. Ausbau von Kläranlagen) und zum Anderen durch eine Verringerung der diffusen Nährstoffeinträge zu lösen.

Für die gesamte bayerisch-tschechische Region – und darüber hinaus für ähnlich strukturierte Einzugsgebiete haben die Erkenntnisse dieses Projekt auch deshalb Bedeutung, weil es sich um ein Grenzgebiet handelt, in dem der Fremdenverkehr gerade wegen des Fehlens ausreichend vorhandener Einkommensalternativen ein bedeutender Wirtschaftsfaktor ist.

2 Zielstellung

Kernpunkt der wissenschaftlichen Untersuchungen ist zum Einen die Quantifizierung des aus verschiedenen Einzugsgebieten abfließenden Wassers und zum Anderen die Ermittlung der in den Gewässern enthaltenen P-Konzentrationen. Dies umfasst die Messung sowohl des Gesamt-Phosphors (TP) als auch die Bestimmung des löslichen Phosphors (DTP). Die Differenz aus TP minus DTP ergibt den partikulär gebunden Phosphor (PP). Aus der Abflussmenge und der Phosphorkonzentration werden die P-Frachten (Verluste) ermittelt. Diese werden zu Monats- und Jahrsdurchschnittswerten aggregiert. Dadurch können sowohl die verschiedenen Einzugsgebiete untereinander verglichen als auch Belastungsspritzen innerhalb eines Jahres herausgearbeitet werden.

Einen zweiten Schwerpunkt bilden Messungen über die Höhe der Phosphorausträge aus Drainagen bei simulierten Starkregenereignissen (Beregnungsversuche) nach direkt vorangegangener praxisüblicher Gülleapplikation mit unterschiedlicher Ausbringungstechnik.

Mittels Schöpfproben sollen Fragen bezüglich des Siedlungseinflusses sowie zur Probenahmetechnik beantwortet werden.

Die gewonnen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, örtlich differenzierte Maßnahmestrategien zu entwickeln, in Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit zu prüfen und damit den Erfolg von Sanierungsbestrebungen zu beurteilen.

Darüber hinaus sollen die Erkenntnisse in der Beratung umgesetzt werden, wobei der Technologietransfer im gesamten INTERREG-PHARE-Gebiet durch Informationsaustausch mit Tschechien gefördert werden soll.

Ebenfalls bilden die Ergebnisse einen wichtigen Beitrag für die Umsetzung anderer EU-geförderter Projekte im Grenzland. Hierzu zählen Perl- und Bachmuschelschutzprojekte (INTERREG II und III A PHARE), das LEADER II-Projekt „Saubere Ilz“, das Projekt „Saubere Stauseen (Eger, Moldau, Schwarzach, Chamb...) für Tourismus oder Trinkwasser“ sowie der Kläranlagenbau im Einzugsgebiet von Schwarzach und Chamb (INTERREG-PHARE).

Bei dem Projekt „Saubere Seen“ handelt es sich um eine grenz- und fachübergreifende Kooperation zum Schutz von Wasser und Boden.

3 Material und Methoden

3.1 Messstellen und Probenahmetechnik

Zur Erfassung der Nährstoffeinträge in die Gewässer wurden verschiedene Messstellen (siehe Abbildung 2) eingerichtet.

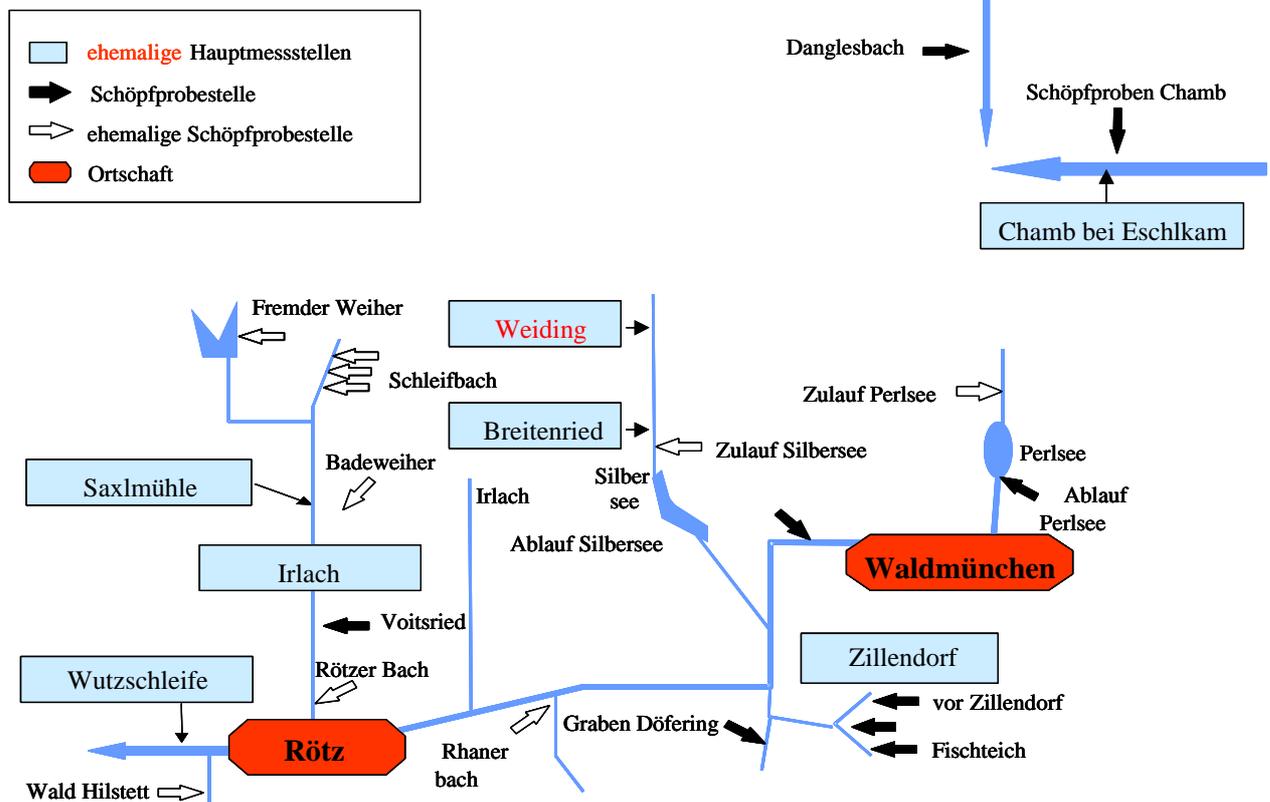


Abb. 2: Hauptmessstellen und Schöpfprobenahmestellen

3.1.1 Hauptmessstellen

Um einen möglichst genauen Überblick über die verschiedenen Frachtanteile (punktuell, diffus) zu erhalten, wurden an den beiden Seezuläufen Messstellen eingerichtet, die die Nährstoffeinträge aus den jeweiligen Gesamteinzugsgebieten (GEZG) erfassen. Zudem wurden in vier Teileinzugsgebieten (TEZG) mit unterschiedlichen Flächenanteilen an Acker-, Grünland-, Wald und Siedlungsflächen, unterschiedlicher Erosionsgefährdung der Ackerflächen sowie unterschiedlicher Grad der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion (Viehichte, Anteil drainierter Flächen) Messstellen installiert. Die Tabelle 1 sowie die Abbildung 2 geben einen Überblick über alle Hauptmessstellen.

Mit Hilfe der an den Hauptmessstellen Wutzschleife und Chamb bei Eschlkam gewonnenen Daten konnten die P-Frachten in die jeweiligen Seen ermittelt werden.

Um die diffusen Einträge zu quantifizieren, müssen von der jeweiligen Gesamtfracht die durch stichprobenartige Messungen ermittelten Frachten aus den Punktquellen (Kläranlagen) sowie Schätzfrachten für Einträge aus dem Wald und der Teichwirtschaft abgezogen werden.

Tab. 1: Übersicht der Probenahme an Hauptmessstellen

Name	Messzeitraum	Kommentar
Wutzschleife	05/99 – 12/04	Gesamteinzugsgebiet Eixendorf
Saxlmühle	05/99 – 12/04	Teileinzugsgebiet
Irlach Ablauf	04/00 – 12/04	Teileinzugsgebiet
Zillendorf	05/99 – 12/04	Teileinzugsgebiet
Breitenried	10/02 – 12/04	Teileinzugsgebiet
Chamb bei Eschlkam	11/00 – 12/04	Gesamteinzugsgebiet Drachensee

Die Messstellen in den vier Teileinzugsgebieten (TEZG) lieferten Anhaltswerte über die P-Frachten aus den überwiegend landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Die Messstelle im TEZG Zillendorf erfasste aufgrund ihrer räumlichen Lage neben den diffusen P-Einträgen auch Stoffeinträge durch Abwässer aus einer Siedlung (z.B. Überläufe der Dreikammerkleinkläranlagen).

Probenehmer



Abb. 3: Probenehmer der Firma ISCO

An den Hauptmessstellen wurden die Nährstoffeinträge sowohl qualitativ als auch quantitativ erfasst, d.h. es wurde zum Einen die Abflussmenge und zum anderen die P-Konzentration in den Fließgewässern bestimmt. Zur kontinuierlichen Probenahme an den Hauptmessstellen wurden Probenehmer der Firma ISCO (Typ 6700) eingesetzt (Abbildung 3), die mit dem Einperlmodul (ISCO 730) versehen waren. Dieses Modul misst die Pegelhöhe und speichert sie in Intervallen von 15 Min. ab. Aus den Pegelhöhen wurde der Durchfluss über Formeln für geeichte V-Wehre, welche in den Teileinzugsgebieten verwendet wurden, (Abbildung 4) errechnet. Für die beiden Messstellen an den Seezuläufen wurde der Durchfluss anhand einer gemessenen Pegel-Abfluss-Kurve ermittelt.

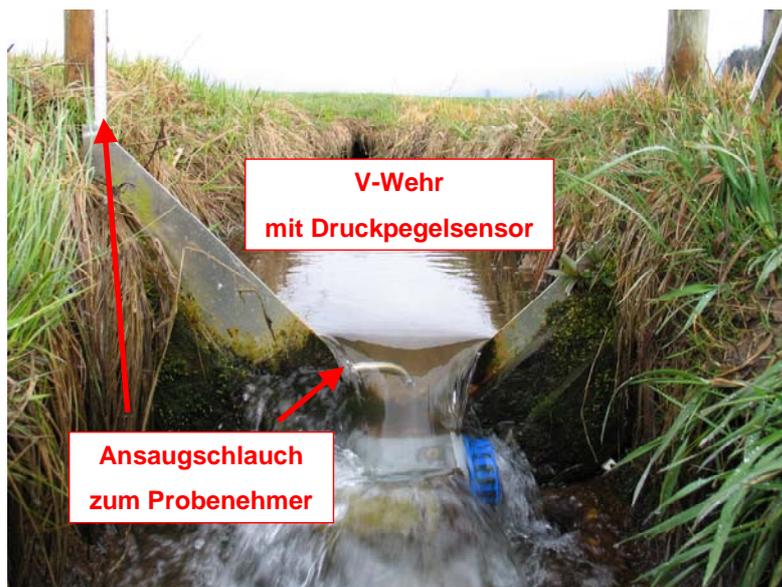


Abb. 4: Detailansicht eines V-Wehrs mit Druckpegelsensor und Probenahmeschlauch

Die Probenehmer bestehen aus einem Unterteil, in dem 24 1-Liter Kunststoffflaschen kreisförmig angeordnet sind. Es wird mit einem Aufsatz verschlossen, auf dem eine Pumpen- und Steuereinheit befestigt ist. Im Oberteil ist die Durchflussmesseinheit integriert. Dadurch ist neben einer zeitabhängigen Probenahme auch eine durchflussabhängige Probenahme, gesteuert über die Pegelhöhe, möglich. Die Stromversorgung erfolgte mit Ausnahme der Messstelle Wutzschleife über Solarenergie bzw. batteriegestützt.

Die Probenahme erfolgte bis etwa März 2000 zeitabhängig, da für einige Einzugsgebiete erst die Abflusskurven ermittelt werden mussten. Ab etwa März 2000 erfolgte die Probenahme abflussabhängig, d. h. nach einer definierten durchgeflossenen Wassermenge. Die Erfassung der Frachten von Abflussspitzen wurde so deutlich verbessert, was sich an den nachfolgend erhöhten Frachtmessungen nachweisen ließ.

Die Probenahmeintervalle richteten sich nach dem mittleren Durchfluss an den Messstellen. Angestrebt wurden durchschnittlich 3 Mischproben pro Woche, wobei jede Mischprobe aus 12 Einzelproben zu je 80 ml bestand. Der erforderliche Zeitraum zwischen zwei Probenahmen lag zum Beispiel an der Wutzschleife zwischen 6 h bei Niedrigwasser und 10 min bei Hochwasser.

3.1.2 Schöpfproben

Neben den Hauptmessstellen wurden durch Schöpfprobenahmestellen in den Einzugsgebieten Werte über P-Konzentrationen erhoben. Eine Schöpfprobe repräsentiert den Nährstoffgehalt in einem Gewässer zu einem definierten Zeitpunkt. Da der Nährstoffgehalt innerhalb kurzer Zeitspannen (Stunden-Bereich) sehr stark schwanken kann, lassen sich Einzelmessungen nur eingeschränkt miteinander vergleichen. Über längere Zeiträume (größer als ein Jahr) bilden sie aber ein repräsentatives Mittel, das sich gut mit den Mittelwerten anderer Messreihen aus dem gleichen Zeitraum vergleichen lässt. Schöpfproben lassen sich ohne großen technischen Aufwand sicher entnehmen und sind damit ein Instrument für eine örtlich und zeitlich flexible und gezielte Beprobung. Sie erlauben somit einen qualitativen Überblick bei vergleichsweise geringem Messaufwand. Als zeitliche und räumliche Punktmessung ohne Erfassung des Wasserdurchflusses sind sie quantitativ

nicht auswertbar, es sei denn der Wasserdurchfluss zwischen den Probenahmeterminen ist bekannt.

3.2 Gebiets- und Betriebserhebungen

Zur Interpretation der festgestellten Gewässerqualitätsparameter war es notwendig für die einzelnen Einzugsgebiete Daten zu erheben.

Die Ermittlung des genauen Umfangs der jeweiligen Einzugsgebiete erfolgte mittels topographischer Karten im Maßstab 1:25.000 in „ArcView“ anhand der Höhenlinien. Es erwies sich in Einzelfällen als hilfreich, vor Ort eine weitere Überprüfung vorzunehmen, da z. B. Gräben Einflüsse auf den tatsächlichen Umfang hatten. Die Ermittlung der Flächengrößen und Flächennutzungen erfolgte mittels Orthofotos (Luftbilder) sowie topographischer Karten in ArcView und mit Hilfe der InVeKoS-Daten der bayerischen Landwirtschaftsverwaltung. Informationen zum Viehbesatz und zur Nutzung landwirtschaftlicher Förderprogramme stammen ebenfalls aus den InVeKoS-Daten. Der ortsansässige Gebietsberater hat darüber hinaus bei Einzelbetriebsbesuchen weitere notwendige Daten erhoben.

Zur Erhebung der Klimadaten wurde stellvertretend für die Einzugsgebiete die Wetterdaten der Station 66 Wullnhof des agrarmeteorologischen Messnetzes der LfL verwendet. Da es vereinzelt zu Störungen gekommen ist, wurden fehlende Werte durch Aufzeichnungen nahegelegener Wetterstationen ergänzt.

3.3 Berechnungsversuche über Drainagen

Grundlegende methodische Betrachtung

Während die Erosion als Eintragspfad für die P-Belastung in Oberflächengewässer bereits gemeinhin bekannt ist, hat die Bedeutung anderer P-Eintragspfade in Gewässer erst in jüngerer Zeit wissenschaftliche Beachtung erlangt. Dazu zählt auch der P-Austrag aus der Fläche durch Zwischenabfluss über Makroporen („preferential flow“) nach unmittelbar auf Düngungsmaßnahmen folgenden Starkregenereignissen (*Withers et al., 2003*). Dabei kann der Austrag aus Drainagen auch als Teil des Zwischenabflusses angesehen werden, was schematisch in Abbildung 5 dargestellt ist. Nach Ergebnissen der o.g. Autoren können Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen mehr als 50 % des gesamten jährlichen P-Austrages bewirken.

Im Untersuchungsgebiet ist bei intensiver Rinderhaltung etwa die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche Dauergrünland. Da dieses zum Teil drainiert ist, lag ein Schwerpunkt des o.g. Forschungsvorhabens in der Quantifizierung des P-Austrages aus Drainagen unter Wirtschaftsgrünland bei Düngerapplikation unmittelbar vor einem Starkregenereignis.

Es soll herausgestellt werden, dass es sich bei der Versuchsanstellung um eine „Worst-Case-Situation“ handelt, die jedoch durchaus realitätsbezogen ist, bedenkt man die Auswirkungen von kräftigen Gewitterregen. In diesem Zusammenhang wurde vor allem auch der Frage nachgegangen, ob und inwiefern unter derartigen Bedingungen Unterschiede hinsichtlich der Gülleapplikationstechnik bestehen.

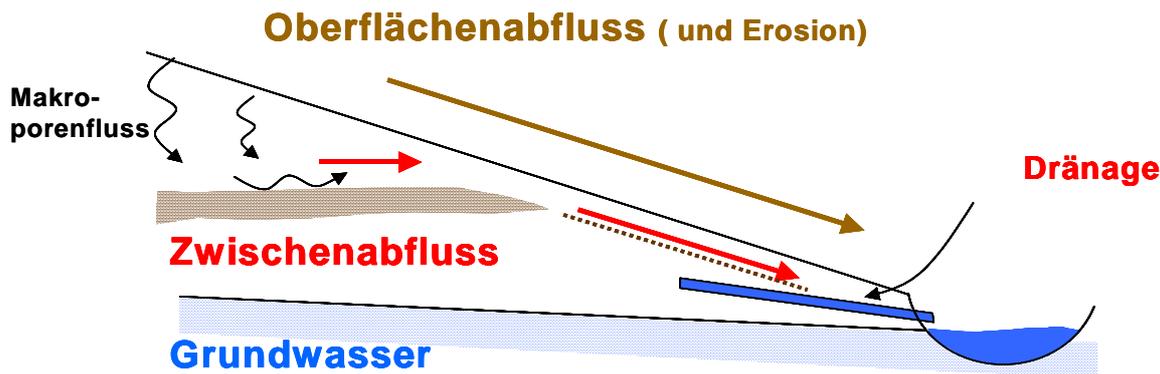


Abb. 5: Wege des P-Transportes in Gewässern unter besonderer Berücksichtigung des Makroporen- und Zwischenabflusses

Standortbeschreibung und Versuchsanlage

Tab. 2: Charakteristik des Versuchsstandortes Döfering (nach KREMB et al., 2002)

Ort, Gemeinde, Landkreis	Döfering, Schönthal, Cham			
Geologie	biotitreicher, dunkler Lagengneis			
Mikrorelief	Niederung			
Neigung	3 %			
Bodentyp	Pseudogley			
Horizontmerkmale	Tiefe in cm			
[Aufnahme Dr. HONISCH (LBP)]	0-10	10-20	20-40	40-80
Bezeichnung	Ah	AhSw	Sd	SdCv
Bodenart	Uls	Slu	Sl3	Su3
pH (CaCl ₂)	5,9	5,4	4,9	4,5
P _{CAL} (mg P ₂ O ₅ /100 g)	14	9	2,4	1,4
Nutzung	Grünland, drainiert			
Dränsystem	Sauger (Plastik) mit Ø 7 cm in 70 cm Tiefe			

Die Beregnungsversuche wurden im Zeitraum 2002 bis 2003 auf natürlichem Dauergrünland auf Pseudogley mit optimaler P-Versorgung (Stufe „C“, 14 mg P₂O₅/100g Boden) eines landwirtschaftlichen Betriebes durchgeführt. Weitere Kenndaten zum Versuchstandort enthält die Tabelle 2.

Die Versuchsanlage bestand aus fünf nebeneinander liegenden Plots von je 150 m² (30 m x 5 m) Größe über einem bereits vorhandenen Drainagesystem (Sauger in 70 cm Tiefe mit 7 cm Durchmesser). Jeder Plot befand sich dabei mittig über je einem Drän. Der schematische Aufbau des Versuchs wird in Abbildung 6 gezeigt.

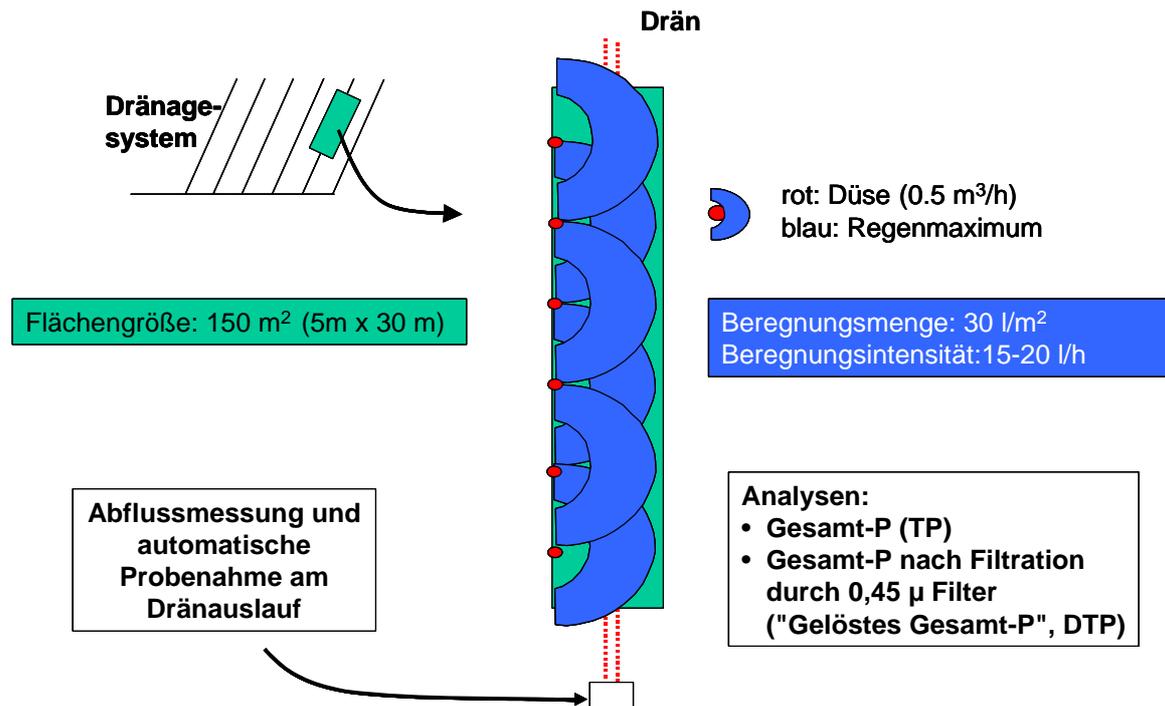


Abb. 6: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Durchführung der Beregnungsversuche über Drainage

Beregnung

Das Starkregenereignis auf den einzelnen 150 m² großen Plots wurde mittels einer Beregnungsanlage (Leihgabe des Landesamtes für Wasserwirtschaft) simuliert. Die Beregnungsanlage bestand aus einer Anordnung von 180°-Düsen, die eine halbmondförmige Verteilung des Niederschlags erzeugen (Radius 5 m). Die Beregnungsfläche je Düse betrug theoretisch 39,26 m², aufgrund der Tröpfchenverteilung aber nur ca. 30 m² effektiv. Zur möglichst gleichmäßigen Beregnung der 150 m² wurde eine lineare Anordnung bei einfacher Überlappung gewählt (Abbildung 6).

Über einen Hydranten wurde ein konstanter Düsendruck gewährleistet. Um bei höheren Windgeschwindigkeiten eine Abdrift zu vermeiden, wurde ein Windschutz eingesetzt. Eine genaue Beschreibung der Anlage und Angaben zur Tröpfchenverteilung findet sich bei BUNZA ET AL. (1985).

Die Beregnungsmenge betrug 30 l/m², die Beregnungsintensität lag bei 15-20 l/h. Das Beregnungswasser zeigte bei Stichproben eine schwache Mineralisierung bzw. Leitfähigkeit (ca. 130 -140 µS) und war nahezu P-frei (0,003 mg TP/l).

Die einzelnen Beregnungen wurden zu Vegetationsbeginn und bei geeignetem Wetter nach jedem Schnitt durchgeführt. Die Versuche wurden in einem dreijährigen Zeitraum durchgeführt. Das Foto in Abbildung 7 zeigt in Ergänzung zum Versuchsschema in Abbildung 6 einen laufenden Beregnungsversuch.

Da die Böden naturgemäß unterschiedliche Ausgangswassergehalte aufwiesen, erfolgte am Abend vor der Gülleapplikation und dem künstlichen „Starkregenereignis“ solange eine Vorwässerung, bis der jeweilige Drän anfang zu laufen.

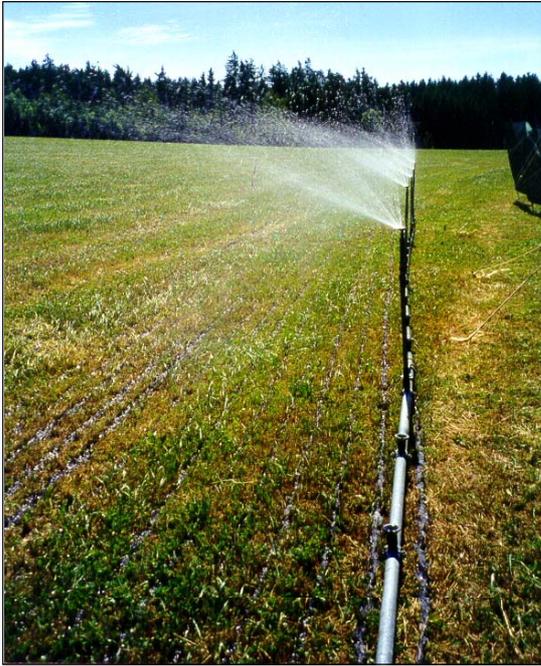


Abb. 7: Laufender Beregnungsversuch über Grünland

Varianten

Drei Varianten wurden untersucht: Beregnung ohne Gülleapplikation (Null), Beregnung unmittelbar nach oberflächlicher Gülleausbringung mit Prallteller und praxisüblicher Technik (Gülle-Prall) sowie Beregnung nach Gülleapplikation mittels Injektion (siehe nachstehende Abbildung 8) in 2 cm Tiefe (Gü-Inj.), wobei auch das hierfür verwendete Gerät in der Region in der Praxis eingesetzt wurde.



Abb. 8: Gülleausbringung mit flacher Injektion (Schlitztechnik)

In Hinblick auf die Ergebnisse und deren Diskussion ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei dieser Art der Injektion nicht um ein tiefes Einbringen der Gülle mit Durchtrennung der Wurzelmasse der Grasnarbe, sondern – wie auch Abbildung 8 zeigt - vielmehr um ein flaches „Einschlitzten“ handelte. Eine Verletzung der Grasnarbe bzw. eine damit verbun-

dene ungünstige Entwicklung der Pflanzenbestände konnte nach Rückmeldung aus der Praxis, die das Gerät großflächig im Einzugsgebiet einsetzte nicht beobachtet werden.

Bei beiden Güllevarianten wurde zu jeder Beregnung einheitlich eine Menge von jeweils 25 m²/ha Rindergülle ausgebracht. Bei naturgemäß starker Streuung einzelner Werte bei den TS-Gehalten und P-Konzentrationen (siehe Tabelle 3) bedeutete dies im Mittel eine Applikation von ca. 15 kg Gesamt-Phosphor (TP) bzw. ca. 34 kg P₂O₅. Davon bestand rund ein Drittel aus gelöstem Phosphor (DTP).

Tab. 3: Kennwerte zu der im Versuch eingesetzten Milchviehgülle

	TS (%)	TP *- Konzentration (kg/m³)	DTP *- Konzentration (kg/m³)	ausgebrachte TP *-Menge (kg/ha)
Min.	5,5	0,39	0,17	9,6
Max.	9,7	0,79	0,26	19,7
Mittel (n= 9)	6,9	0,61	0,21	14,8

* 1 kg P = 2,29 kg P₂O₅

Die drei Versuchsvarianten rotierten im Verlauf der zwei Untersuchungsjahre auf den fünf Plots, so dass damit eine gleichmäßige Verteilung der Versuchsvarianten (Randomisierung) über einen räumlich-zeitlichen Ansatz erzielt wurde.

Abflussmessung

Die Abflussmessung und Probenahme für die P-Bestimmung im Labor erfolgte automatisch jeweils am Ende eines Dräns, der zu diesem Zweck aufgegraben und mit einem automatischen Probenehmer verbunden war (siehe Abbildung 9). Das aus dem Drän ablaufende Wasser wurde in einen eigens installierten Putzkasten (Bauteil aus dem Bereich der Kanalisation), in den ein 60°V-Wehr und ein Probenahmeschlauch integriert waren, geleitet. Dabei wurde zum Einen die Pegelhöhe über ein Einperlmodul (Genauigkeit ± 0,003 m) gemessen und zum Anderen Wasserproben genommen und in den angeschlossenen Probenehmer gepumpt.

Die Berechnung des Abflusses erfolgte aus der Pegelhöhe nach Kalibrierung auf Basis von Schöpfproben zu unterschiedlichen Pegelständen. Mit der Probenahme wurde zu Abflussbeginn begonnen. Das aus dem Putzkasten hinten austretende Wasser wurde in eine kleine Grube geleitet, die mittels einer Tauchpumpe regelmäßig geleert wurde.

In Anbetracht der unterschiedlichen hydrologischen Gegebenheiten bei der Versuchsserie und der daraus resultierenden Differenzen bei den Abflussmengen wurde eine zeitproportionale Probenahme zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse bevorzugt.

Als Schema wurden folgende Intervalle nach Abflussbeginn der Dränage festgelegt:

- für die ersten 5 Flaschen alle 3 Minuten eine Probe,
- für die nächsten 5 Flaschen alle 6 Minuten eine Probe,
- für die nächsten 14 Flaschen alle 12 Minuten eine Probe,

wobei jeweils 5 Proben/Flasche zu je 150 ml gezogen wurden.



Abb. 9: Abflussmessung und Probenahme am Drän

3.4 Beregnungsversuche zur Wirkung von Randstreifen

Grundlegende methodische Betrachtung

In einem weiteren Teilprojekt wurde der bislang teilweise kontrovers diskutierten Frage nachgegangen, ob bzw. inwieweit sich bei hängigen und an Oberflächengewässer angrenzende Grünlandflächen durch ungedüngte Randstreifen eine Minderung des durch Oberflächenabfluss bewirkten P-Austrags erreichen lässt. Dies speziell bei Starkregenereignissen, welche kurz auf eine Gülledüngung folgen. In einer einjährigen (2004) Versuchsserie wurden zu mehreren Terminen mit einer Beregnungsanlage Starkniederschläge unterschiedlicher Intensität simuliert.

Varianten und Beregnung

Es wurden drei Versuchsglieder hinsichtlich ihres Abflussverhaltens und P-Austrages verglichen: Eine Kontrollvariante ohne Düngung (1) sowie bei zwei mit Gülle gedüngten Varianten eine ohne Randstreifen (2) und eine, bei der zwischen der begüllten Fläche und der Abflusserfassung ein 5 m breiter ungedüngter Randstreifen (3) lag.

Das Versuchsprinzip und den Versuchsaufbau verdeutlichen die Abbildungen 10 bzw. 11. Bei den Varianten 2 und 3 wurde die Gülle (ca. 25 m³/ha mit ca. 5,0 % TS) per Hand mit einer Gieskanne kurz vor der Beregnung ausgebracht. Tabelle 4 zeigt, dass damit durchschnittlich ca. 12 kg Gesamt-P/ha (TP in Elementform) bzw. 28 kg P₂O₅/ha (Oxidform) gedüngt wurden; etwa 30 % des TP lag als „löslicher“ - d. h. einen Mikrofilter passierbarer - Phosphor (DTP) vor.

Anzumerken ist, dass auf dem Praxisschlag (ca. 3 ha mit 14 % Gefälle) die drei Varianten nicht zu einem einzelnen Beregnungstermin zusammen geprüft wurden. Vielmehr wurde die Untersuchungsreihe folgendermaßen durchgeführt: Während der jeweils mehrere Tage dauernden „Versuchsperioden“ vom Frühjahr bis Herbst 2004 wurde zu den ortsüblichen

Düngungsterminen (niedriger Grünlandbestand im Frühjahr bzw. kurz nach den Schnitten) pro Tag eine Variante durchgeführt. Die einzelnen Varianten waren auch nicht ortsgebunden, sondern wechselten über den Praxisschlag, womit eine räumlich-zeitliche Randomisierung erreicht wurde. Es wurden pro Versuchsglied während jeder Versuchsperiode in der Regel mehrere Wiederholungen durchgeführt. Die Versuchsanordnung erfolgte in der Weise, dass bei allen Varianten nicht nur die begüllte Fläche (25 x 4,5 m) sondern auch die berechnete Fläche (30 x 4,5 m) stets gleich war. Somit erklärt sich die in Abbildung 10 ersichtliche Ausgleichsfläche bei Variante 2. Dadurch sollte erreicht werden, dass das Wasser bei allen drei Varianten stets über die gleiche Flächengröße läuft. Mittels eines Leitblechsystems (siehe Abbildungen 10 sowie 11 links) wurde das Wasser sowohl innerhalb der Versuchsparzelle gehalten als auch die Ausbildung bevorzugter Fließwege entlang der Seitenleitbleche verhindert.

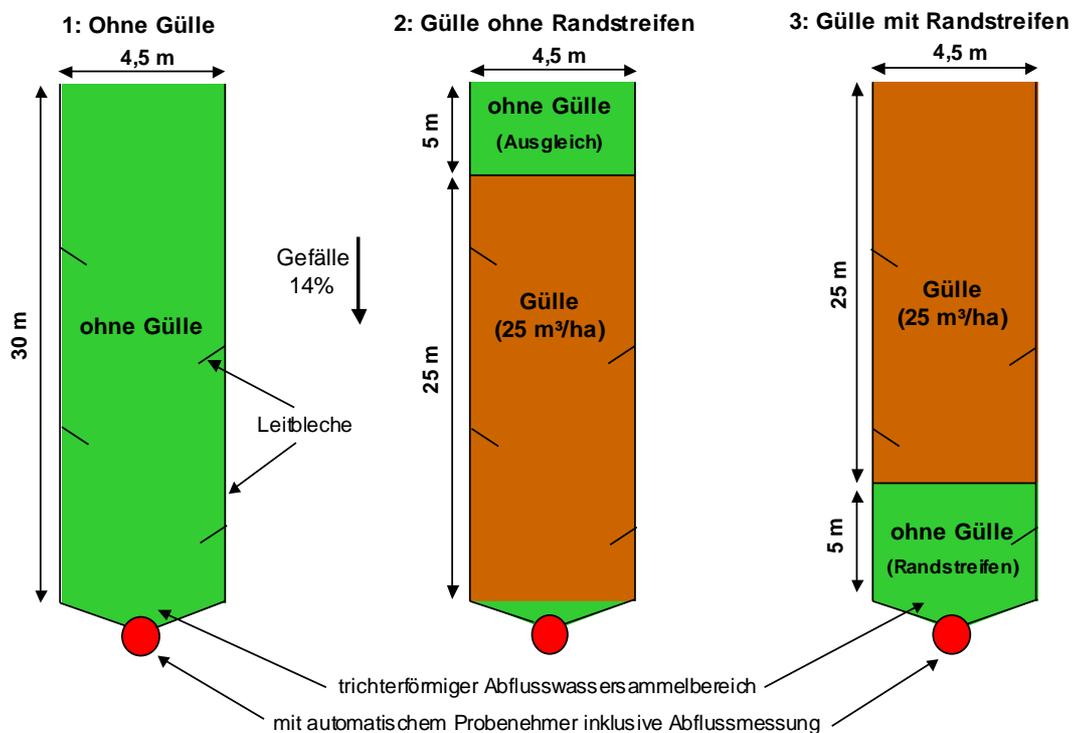


Abb. 10: Darstellung von Versuchsaufbau, Varianten und Abflussmessung

Mit einer Beregnungsanlage wurden künstlich Starkregenereignisse simuliert. Da während der einzelnen Versuchstage im Boden unterschiedliche Feuchteverhältnisse vorlagen, erwies es sich in Hinblick auf eine geeignete Auswertung am günstigsten, die Beregnung und Abflussmessung in folgender Weise durchzuführen: Es wurde solange beregnet, bis der Abfluss begann und die bis dahin ausgebrachte Wassermenge festgehalten. So konnten „einheitliche Ausgangsvoraussetzungen“ geschaffen werden. Dann wurde die Wassermenge stufenweise um je 5 l/m^2 erhöht. Pro Stufe wurde jeweils der entsprechende Abfluss aufgefangen, dann erst weiter beregnet. Dadurch erhielt man eine einheitliche Beregnungssteigerungsreihe ($5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ l/m}^2$) „nach Abflussbeginn“. Durch Stichproben wurde überprüft, ob diese gewählte Vorgehensweise zu keinen Verfälschungen führte.

Dabei wurden die Wasserabflüsse und P-Frachten bei „durchgehenden“ Beregnungsintensitäten mit den entsprechenden der „Beregnungssteigerungsreihen“ verglichen. Es zeigte sich, dass die Parameter bei beiden Verfahren gut miteinander vergleichbar waren – die Abweichungen zwischen beiden Verfahren lagen innerhalb des natürlichen Fehlerbereiches.

Die Erfassung des Wasserabflusses und die Probenahme erfolgten auch bei diesem Teilprojekt automatisch. Im aufgefangenen Wasser (technische Lösung durch Auffangtrichter; siehe auch Abbildung 11 rechts) wurden die Konzentrationen an Gesamt-P (TP) und an „löslichem“, Phosphor (DTP) bestimmt. Dadurch konnten die dazugehörigen, auf einen Hektar bezogenen TP/DTP-Frachten errechnet werden.



Abb. 11: Beregnungsanlage mit Windschutz und Leitblechen (links)
Detailaufnahme vom trichterförmigen Abflusssammelbereich (rechts)

Tab. 4: Kennwerte zu der im Zeitraum April bis November 2004 eingesetzten Milchviehgülle

	TS (%)	TP *- Konzentration (kg/m ³)	DTP *- Konzentration (kg/m ³)	ausgebrachte TP *-Menge (kg/ha)
Min.	4,1	0,44	0,10	10,9
Max.	5,7	0,52	0,20	13,1
Mittel (n= 5)	5,0	0,49	0,14	12,2

* 1 kg P = 2,29 kg P₂O₅

3.5 Methodik der Wasseranalytik

Die gewonnenen Proben wurden im Labor des Wasserwirtschaftsamtes Regensburg, das für das Forschungsvorhaben dankenswerterweise einen Laborarbeitsplatz samt Ausstattung zur Verfügung stellte, aufbereitet und untersucht.

Alle Proben wurden in PP-Faschen verwahrt, gekühlt zum Labor transportiert und im Kühlschrank bis zur Analyse zwischengelagert. Die Analyse von Phosphor erfolgte pho-

tometrisch mittels Ammoniummolybdat nach nach DIN-Vorschrift (Deutsche Einheitsverfahren, Kap. D 11). Nach Aufschluss mit Kaliumperoxidisulfat wurde der Gesamtphosphor (TP) und an filtrierten Proben (P-freier Mikrofilter 0,45 μ) der gelöste Gesamtphosphor (DTP) analysiert. Die Analytik erfolgte im Berichtszeitraum nach der Neuanschaffung eines Analysegerätes vorzugsweise mit dem Phosphat-Serienanalyser „Ganimede-P Laborautomat“ der Firma Dr. Lange. Das Gerät kombiniert Aufschluss, Anfärbung photometrische Messung analog DIN EN 1189.

Insgesamt wurden über 10.000 Wasserproben auf folgende Parameter untersucht:

- Gesamtphosphor roh (TP),
- Gesamtphosphor filtriert (DTP), < P-freier Membranfilter 0,45 μ ;
- elektrische Leitfähigkeit in μ S/cm.

Hinweis

Es wird für die Interpretation der Daten dieses Abschlussberichts darauf verwiesen, dass – soweit nicht ausdrücklich anders vermerkt – sämtliche P-Konzentrationen und P-Frachtangaben des Wassers in der Elementform angegeben sind. Es wird daher von Phosphor-Konzentrationen etc. gesprochen. Dies ist insbesondere dann zu beachten, wenn Wasser-, Bodengehalte und Nährstoffzugsdaten u.a. mit Literaturwerten aus dem landwirtschaftlichen Bereich - speziell dem Düngungssektor - verglichen werden.

3.6 Datenaufbereitung und -auswertung

- Die Steuerung der Probenehmer und die Datenauslese an den Hauptmessstellen und bei den Berechnungsversuchen erfolgte mit dem Softwareprogramm „Flowlink“ der Firma ISCO.
- Sämtliche Pegel- und Analysedaten wurden in einer Access-Datenbank zusammengefasst.
- Statistische Auswertungen erfolgten mit den Programmen Excel bzw. SAS.
- Zur graphischen Darstellung wurden Excel und Powerpoint verwendet.
- Der Umfang und die Flächennutzung der Einzugsgebiete wurde mit Hilfe des Globalen Informationssystems (GIS) „ArcView“ erstellt.

4 Ergebnisse

4.1 Lage der Einzugsgebiete

Die untersuchten Einzugsgebiete liegen in der nördlichen Oberpfalz in den Landkreisen Schwandorf und Cham und in der angrenzenden Tschechischen Republik (siehe Abbildung 13).

4.2 Klima

Die jährliche Niederschlagsmenge schwankte im Untersuchungszeitraum (1999 – 2004) zwischen 500 mm im Trockenjahr 2003 und fast 1200 mm im Jahr 2002. Der Schneeanteil am Niederschlag liegt bei ca. 25 %, die mittlere Jahrestemperatur zwischen 7 und 8,5 Grad Celsius. Die Niederschlagsverteilung und Temperaturen während des Untersuchungszeitraums sind in der Abbildung 12 dargestellt.

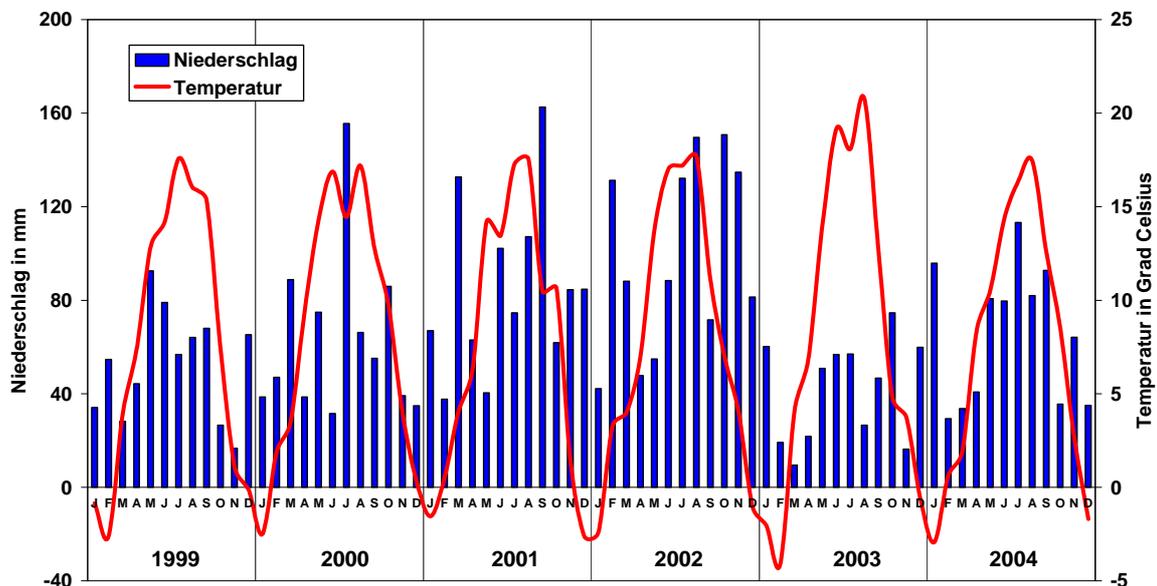


Abb. 12: Niederschlagsverteilung und Temperatur im Untersuchungszeitraum

4.3 Böden

4.3.1 Bodenart und Bodentyp

Als Ackerböden kommen in den Einzugsgebieten überwiegend sandig-lehmige Braunerden aus Granitzersatz oder mittel bis tiefgründigem Gneiszersatz bzw. Braunerden mittlerer Entwicklungstiefe aus Gneis vor. Grünlandstandorte sind häufig humose Pseudogleye aus tertiärem Verwitterungslehm.

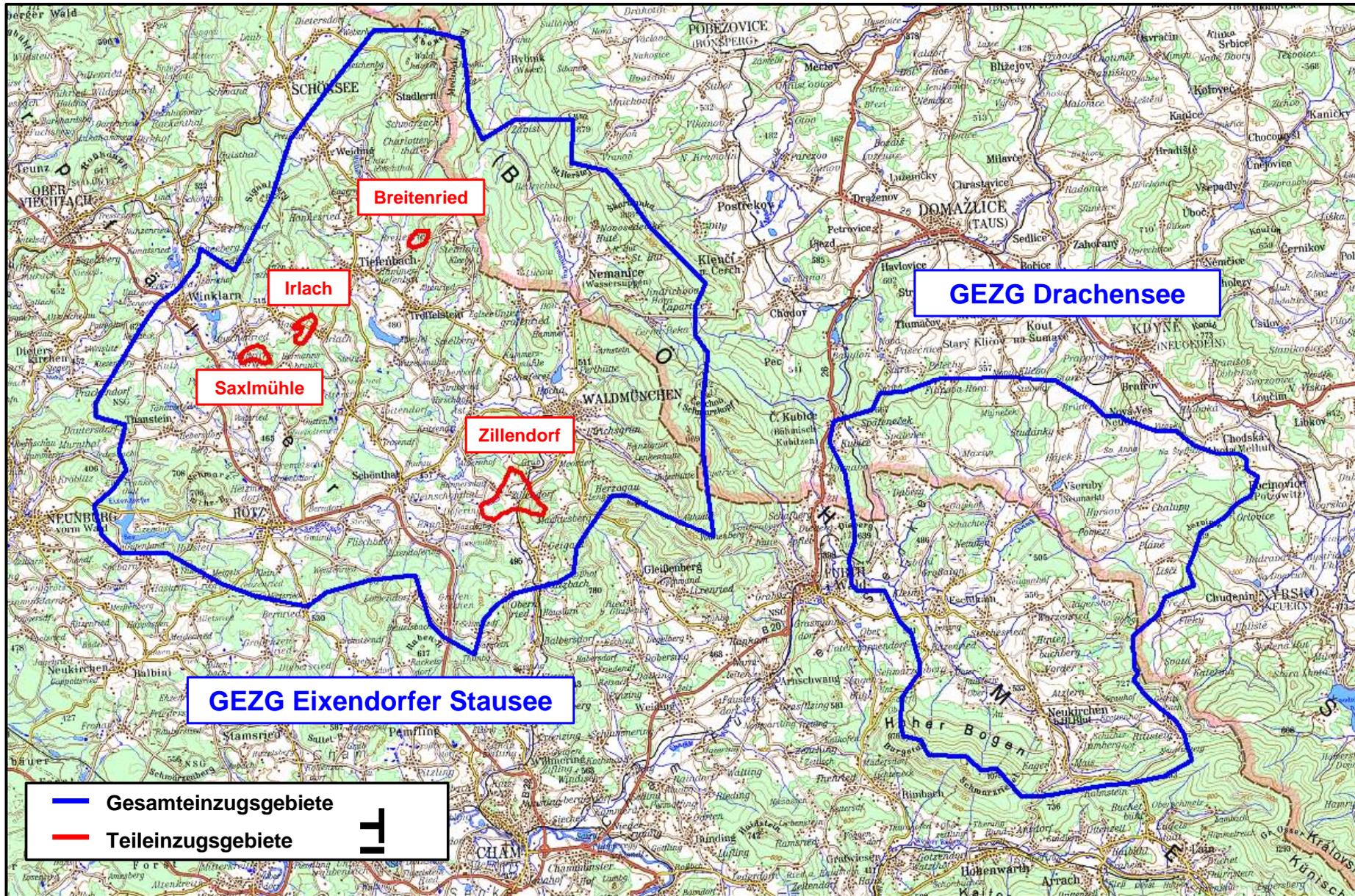


Abb. 13: Lage der untersuchten Einzugsgebiete

4.3.2 Phosphatversorgung der landwirtschaftlich genutzten Böden

Nachfolgend wird die P-Versorgung der auf bayerischer Seite liegenden landwirtschaftlichen Nutzflächen in den beiden Gesamteinzugsgebieten (Eixendorfer Stausee, Drachensee) genauer analysiert. Dazu wurden jeweils die Werte aus der Bodenuntersuchung aus sechs aufeinanderfolgenden Jahren verwendet. Da im Rahmen der Düngeverordnung eine Probenahme im 6-jährigen Turnus vorgeschrieben ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass jede in den Einzugsgebieten vorkommende Fläche einmal in der Statistik enthalten ist, relativ groß. Für die auf tschechischem Gebiet gelegenen landwirtschaftlichen Nutzflächen kann aufgrund fehlender Daten keine Analyse der P-Versorgung durchgeführt werden.

Gesamteinzugsgebiet Eixendorf

Tab. 5: Phosphatversorgung der in Bayern gelegenen landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees in den Jahren 1998 bis 2003 (Angaben zu den Gehaltsklassen in mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden)

n	Ackerflächen: Anteil in den Gehaltsklassen in %				
	A sehr niedrig (< 5)	B niedrig (5-9)	C optimal (10-20)	D hoch (20-30)	E sehr hoch (> 30)
6866	4	12	42	27	16
n	Grünland: Anteil in den Gehaltsklassen in %				
	A sehr niedrig (< 5)	B niedrig (5-9)	C optimal (10-20)	D hoch (20-30)	E sehr hoch (> 30)
5012	24	37	30	7	3

Tabelle 5 zeigt, dass 85 % der Ackerflächen eine optimale bis sehr hohe Phosphatversorgung (Gehaltsklassen C bis E) aufwiesen. Alleine im hohen bis sehr hohen Bereich lagen 43 % der in den Jahren 1998-2003 untersuchten 6.866 Bodenproben. Dagegen befanden sich nur 15 % der Ackerflächen unterhalb der als optimal definierten Gehaltklasse C.

Die Ergebnisse deuten auf eine Überversorgung eines erheblichen Teils der in Bayern liegenden Ackerflächen im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees hin, was eine reduzierte P-Düngung sinnvoll erscheinen lässt. Dies insbesondere deshalb, weil es einsichtig ist, dass bei gleicher Menge an durch Erosion abgetragenem Bodenmaterial umso mehr (leichtlöslicher) Phosphor in die Gewässer gelangt, je höher der P-Gehalt im Oberboden ist. Ebenfalls kann vermutet werden, dass dies auch für den Bereich des Zwischenabflusses – gerade nach hohen Niederschlagsereignissen – zutrifft.

Bei den Grünlandflächen zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Der Anteil hoher bis sehr hoher CAL-Phosphatkonzentration im Hauptwurzelraum lag bei 10 %. Optimale P-Gehalte zeigten 30 % der Grünlandflächen. Dagegen wiesen ca. 61 % der gezogenen Bodenproben eine niedrige bis sehr niedrige P-Versorgung auf.

Gesamteinzugsgebiet Drachensee

Einen Überblick über die Phosphatversorgung der in Bayern liegenden landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet des Drachensees gibt Tabelle 6. Auffallend ist hier, dass der Anteil hoch bis sehr hoch versorgter Ackerflächen mit 24 % deutlich niedriger als im EZG des Eixendorfer Stausees (45 %) lag und eine höherer Anteil (23 % statt 12 %) in der Gehaltsklasse B zu verzeichnen war. Für die Grünlandflächen gilt im Prinzip das Gleiche wie für die im Eixendorfer Gebiet, wobei die schlecht versorgten Flächen (Gehaltsklasse A und B) noch etwas stärker vertreten sind.

Tab. 6: Phosphatversorgung der in Bayern gelegenen landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet des Drachensees in den Jahren 1999 bis 2004 (Angaben zu den Gehaltsklassen in mg CAL-P₂O₅ pro 100 g Boden)

n	Ackerflächen: Anteil in den Gehaltsklassen in %				
	A sehr niedrig (< 5)	B niedrig (5-9)	C optimal (10-20)	D hoch (20-30)	E sehr hoch (> 30)
1028	6	23	47	15	9
n	Grünland: Anteil in den Gehaltsklassen in %				
	A sehr niedrig (< 5)	B niedrig (5-9)	C optimal (10-20)	D hoch (20-30)	E sehr hoch (> 30)
1392	28	40	25	5	2

Zusammenfassend bestätigen die Bodenuntersuchungsergebnisse beider Einzugsgebiete jedoch die bekannte Tatsache, dass in Ackerbau-Grünland-Gebieten Gülle vorzugsweise auf Ackerflächen ausgebracht wird. Sie zeigt aber auch, dass in diesem Fall der P-Abfuhr vom Grünland kein Ausgleich in Form von mineralischer P-Düngung gegenüber stand, somit die hohen P-Entzüge auf dem Grünland nicht abgedeckt wurden. Die Auswertung legt den Schluss nahe, dass gerade angesichts der später dargestellten häufig positiven P-Bilanzen (Hoftorbasis) seitens der Praxis einem Kreislaufdenken noch zu wenig Beachtung geschenkt wurde und die Wertschätzung der Gülle für das Grünland noch nicht einen entsprechenden Stellenwert gefunden hat. Die hohen P-Zuschläge, die auf vielen Grünlandflächen nach derzeitiger fachlicher Empfehlung (LfL, 2004) zusätzlich zu einer entzugsorientierten P-Düngung zur langfristigen Anhebung der Bodengehalte erforderlich wären, sind nicht nur aus ökonomischer Sicht problematisch. Gerade unter dem Aspekt des Gewässerschutzes dürfte mit hohen Düngergaben gerade nach Starkregen ein ansteigendes Risiko erhöhter P-Frachten über Makroporen einhergehen.

Aus Beratungssicht ergeben sich damit Ansätze zur optimalen Gülleverteilung und zu Fragen des optimalen Mineraldüngermanagements (u. a. Prüfung der Notwendigkeit einer P-Unterfußdüngung zu Mais). Gerade angesichts der viehstarken Region (1,6-1,8 GV/ha) des Einzugsgebiets müsste sich eine weitgehend einheitliche Nährstoffversorgung bei Grünland und Acker erreichen lassen. Seitens der Beratung wird diesem Sachverhalt besondere Beachtung in der Arbeit vor Ort geschenkt (Seminare, Führungen; siehe auch Kapitel 4.9.1).

4.4 Einzugsgebietsbeschreibung und P-Frachten

Da die Flächennutzung und der Viehbesatz einen maßgeblichen Einfluss auf die P-Einträge in Gewässer haben, sind im Folgenden in einem ersten Schritt jeweils die einzelnen Einzugsgebiete diesbezüglich genauer charakterisiert worden. Anschließend folgt in einem zweiten Schritt eine Analyse der P-Austräge für das jeweilige Einzugsgebiet.

4.4.1 Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer Stausee (Messstelle Wutzschleife)

4.4.1.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das 410.000 ha große Einzugsgebiet wird zu ca. 46 % als Wald, zu 7 % als Siedlungs und Verkehrsfläche und zu ca. 47 % als landwirtschaftliche Nutzfläche genutzt (siehe Abbildung 14). Die landwirtschaftliche Nutzfläche wird etwa zur einen Hälfte als Dauergrünland (24 %) und zu anderen Hälfte als Ackerfläche (23 %) bewirtschaftet. Auf den Ackerflächen werden vor allem Sommer- und Wintergetreide (12 %), Klee gras (6 %) und Mais (4 %) angebaut.

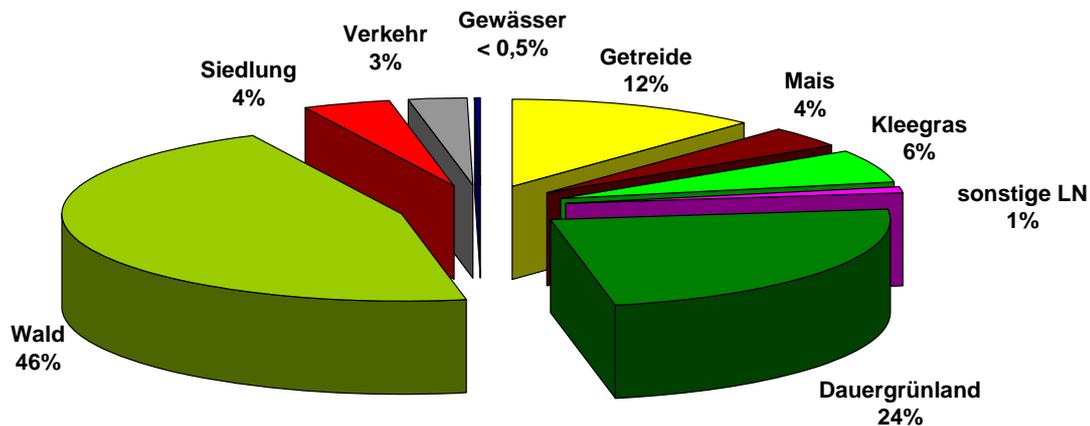


Abb. 14: Flächennutzung im Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer See

Der durchschnittliche Viehbesatz im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees liegt mit 1,7 GV/ha im Vergleich zum Regierungsbezirk Oberpfalz (1,0 GV/ha) und zu Bayern (1,1 GV/ha) vergleichsweise hoch. Die vorherrschende Viehhaltung ist die Milchviehhaltung.

4.4.1.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Während des Versuchszeitraums Mai 1999 bis November 2004 wurde an der Messstelle Wutzschleife ein jährlicher Abfluss von knapp 130 Millionen Kubikmetern Wasser aus dem 410 km² großen Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees (siehe Tabelle 7) gemessen. Dies entspricht rund 38 % der in diesem Zeitraum gefallenen Niederschlagsmenge.

Damit verbunden war eine jährliche Fracht von 21,5 Tonnen Gesamt-Phosphor (TP) bzw. eine flächenbezogene Fracht im Gesamteinzugsgebiet von durchschnittlich 0,52 kg TP/ha und Jahr. Mit 70 % bestand der überwiegende Teil aus partikulärem Phosphor (PP), 30 % konnten der löslichen Fraktion (DTP) zugeordnet werden.

Zu bemerken ist, dass bei einer durchschnittlichen Abflussrate von ca. 4 m³/s auch Abflüsse von über 16 m³/s gemessen wurden. Auch die Spannweite zwischen der 5 % und der 95 %-Quantile der 1217 Einzelproben weist bei einer mittleren TP-Konzentration von 0,17 mg/l auf die große Streuung bei den Einzelwerten hin, welche in die Mittelwertbildung eingingen.

Tab. 7: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht und TP-Konzentration in den Eixendorfer See (Messstelle Wutzschleife) im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	41.000 ha
Ø Niederschläge:	821 mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	129.586.443 m ³ /Jahr = 4,1 m ³ /Sekunde = 316 mm (l/m²) u. Jahr
Ø TP-Fracht (Gesamt-EZG):	21,5 t/Jahr 1,79 t/Monat 0,524 kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration (Spannweite der Quantilen 5 % - 95 %)	0,17 mg/l (0,06 - 0,40 mg/l)
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	70/30 Prozent

Festzuhalten ist, dass die ermittelte Jahresfracht von 21,5 Tonnen TP fast um das 2,5-fache höher lag als die für eine Sanierung des Eixendorfer Sees angestrebte Maximalfracht von 8,8 Tonnen pro Jahr, welche STEINBERG (2000) in seinem Gutachten nennt.

Niederschläge, Abflüsse, P-Konzentrationen und P-Frachten (Monatsmittelwerte)

Wie Tabelle 8 und Abbildung 15 zeigen, unterlagen die monatlichen Niederschlags- und Abflussmengen sowie die P-Konzentrationen und P-Frachten sehr hohen Schwankungen. Aufgrund sehr hoher Extremwerte (siehe Tabelle 8) lag das arithmetische Mittel generell deutlich höher als der Median, welcher sich demzufolge besser zur Beschreibung mittlerer Werte erwies.

Tab. 8: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Wutzschleife in den Monaten (n=68) des Zeitraums Mai 99 bis Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat

Parameter	Min	Q _{05%}	Q _{25%}	Median	Mittel	Q _{75%}	Q _{95%}	Max
Niederschlag (mm)	9,5	19,2	39,7	64,8	68,5	84,6	149,6	159,4
Abfluss (mm)	4,4	6,6	15,1	21,5	26,3	35,9	58,8	63,8
TP-Fracht (t)	0,41	0,57	1,07	1,56	1,79	2,34	4,17	5,05
PP-Fracht (t)	0,22	0,37	0,74	1,07	1,26	1,60	3,00	4,23
DTP-Fracht (t)	0,14	0,19	0,30	0,44	0,53	0,72	1,14	1,40
TP-Konzentr. (mg/l)	0,07	0,09	0,13	0,17	0,19	0,22	0,34	0,39

Bemerkenswert sind die starken Streuungen selbst innerhalb der 50 %-Quantile, vor allem jedoch diejenigen zwischen den Extremwerten, welche in Tabelle 8 auch durch die Spannweite zwischen der 5 % und 95 %-Quantile zum Ausdruck kommt.

So standen an der Messstelle Wutzschleife bei einer mittleren monatlichen Abflussrate von 21,5 mm (l/m^2) geringfügige Abflüsse von ca. 10 mm (l/m^2) und weniger (Juni/2000, von Juni bis November im Trockenjahr 2003, von Juni bis September 2004) sehr hohe Werte von über 50-60 mm bzw. l/m^2 (Februar und März 2000, März 2001, von Januar bis März 2002, von November 2002 bis Januar 2003) gegenüber.

Ähnliches gilt für die monatlichen P-Einträge in den See. Bei einem Monatsmittel von 1,56 Tonnen Gesamt-Phosphor im gesamten Betrachtungszeitraum wurden in den Monaten Juni 2000, September 2003, April, Juni und August 2004 sehr geringe Werte von unter 0,6 Tonnen gemessen. Dagegen kam es zu Spitzenfrachten in den See in einer Höhe von 3-5 Tonnen in den Monaten Januar bis März 2001, Januar und März 2002 sowie August und November 2002.

Vergleichsweise niedrige durchschnittliche P-Konzentrationen (Monatsmittel) im abfließenden Wasser von maximal 0,1 mg P/l traten in den Monaten Februar und März 2000, Februar und April 2002, Januar bis März 2003 sowie April 2004 auf. Demgegenüber standen Werte von über 0,3 mg P/l in den Monaten Juni bis August 2002 sowie in den Monaten Juni bis Oktober des Trockenjahres 2003.

Für eine detailliertere Analyse wurden die monatlichen Frachten an Gesamt-P (TP) in einem ersten Schritt ihrer Höhe nach angeordnet und in drei Gruppen unterteilt: Dabei sind bei einem gesamten Stichprobenumfang von 68 diejenigen 17 Monatsmittel, welchen einen Wert von 1,07 Tonnen und weniger bzw. 2,34 Tonnen und mehr erreichten (siehe auch Tabelle 8, Q_{25%} und Q_{75%}) als „unteres“ bzw. „oberes Viertel“ aufgeführt. Die Gruppen der 34 Monatsmittel, welche bezüglich ihrer TP-Fracht innerhalb der 50 %-Quantile lagen, werden als „Mitte“ bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt, wobei hier jeder der drei Gruppen die jeweiligen Durchschnittswerte (arithmetische Mittel) von Niederschlag, Abfluss, TP-Fracht, PP/DTP-Verhältnis und TP-Konzentration zugeordnet wurden.

Tab. 9: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatswerte

Gruppe P-Fracht	Ø TP-Fracht (t)	Ø NS (mm)	Ø Abfluss (mm)	Verhältnis PP / DTP	Ø TP-Konz. (mg/l)
unteres Viertel (n = 17)	0,780	56	12,7	2,1	0,186
Mitte (Q_{25%} - Q_{75%}) (n = 34)	1,601	60	23,4	2,3	0,192
oberes Viertel (n = 17)	3,183	98	45,8	2,5	0,180

Folgende Tendenzen können der Tabelle 9 entnommen werden:

Die Differenzen zwischen den Niederschlägen (Faktor 1,75 oberes/unteres Viertel) fallen deutlich geringer aus als die der Abflüsse (Faktor 3,6 oberes/unteres Viertel). Das bedeutet, dass hohe Monatsniederschläge nicht zwangsläufig zu hohen Abflüssen aus dem Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees führten.

Zwischen den drei Gruppen bestehen sehr starke Unterschiede sowohl zwischen den mittleren monatlichen Abflussraten als auch den mittleren monatlichen TP-Frachten. Dabei weisen die Monatswerte des oberen Viertels im Mittel einen rund vierfach höheren TP-Austrag gegenüber denen des unteren Viertels auf. Es zeigte sich somit auch, dass die Höhe der monatlichen P-Fracht in engem Zusammenhang mit der Höhe des Abflusses stand. Bei allen Gruppen liegt die partikuläre P-Fraktion (PP) um mehr als das Zweifache über dem löslichen Anteil (DTP). Bei zunehmenden Abflüssen und der damit verbundenen höheren P-Fracht steigt dieses Verhältnis scheinbar etwas an.

Die mittleren TP-Konzentrationen unterschieden sich hingegen kaum. Das bedeutet, dass die Ursache hoher monatlicher P-Frachten in erster Linie durch weit überdurchschnittliche Abflussraten bedingt sind.

In einem zweiten Schritt wurde untersucht, ob und inwiefern überdurchschnittlich hohe Monatsmittel von Niederschlag, Abfluss, TP-Fracht und TP-Konzentration in Verbindung mit bestimmten Jahreszeiten gebracht werden können. Das solche Häufungen zu existieren scheinen, lässt sich bereits aus den vorherigen Darstellungen ersehen.

Die 68 Monatswerte wurden vier Jahresquartalen zugeordnet (siehe Tabelle 10). Diese vierfache Unterteilung erschien sinnvoller, als eine Auflistung von 12 Monaten. Dies nicht nur aus Gründen der Übersichtlichkeit, sondern auch vor allem deswegen, da im Untersuchungszeitraum (Mai 1999 bis Dezember 2004) die einzelnen Monate teilweise unterschiedlich häufig vertreten waren. Hingegen ergibt sich bei der gewählten Vorgehensweise eine vergleichsweise „harmonische Verteilung“ auf die einzelnen Quartale (siehe Tabelle 10, linker Teil). In Tabelle 10 (rechter Teil) wurden nur diejenigen Monate berücksichtigt, bei denen bei den jeweiligen Parametern die Werte über dem Median (obere Zeile) bzw. im oberen Viertel (untere Zeile kursiv) lagen. Dieser Anteil ist absolut in Monaten (n) und relativ (%) in Bezug auf die Bezugsgrößen (n=34 bzw. n=17) ausgedrückt. Auffallend hohe Prozentanteile sind dabei fett hervorgehoben.

Tab. 10: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) überdurchschnittlicher und hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)

Quartal	Monate im Quartal		Auftreten überdurchschnittlicher und sehr hoher Werte (Zahlen obere Zeile: > Median, n=34; kursive Zahlen untere Zeile: oberes Viertel; n=17)							
			Niederschlag		Abfluss		TP-Fracht		TP-Konz.	
	n	%*	n	%	n	%	n	%	n	%
Jan. – März	15	22	6	18	15	44	12	35	4	12
			5	29	9	53	8	47	2	12
April – Juni	17	25	8	24	7	21	5	15	4	12
			2	12	2	12	1	6	2	12
Juli - Sept.	18	26	12	35	4	12	8	24	16	47
			7	41	1	6	3	18	9	53
Okt. – Dez.	18	26	8	24	8	24	9	26	10	29
			3	18	5	29	5	29	4	24

* in % vom Versuch

Die in Tabelle 10 dargestellten Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

Auf den ersten Blick ersichtlich ist die Tatsache, dass eine Häufung überdurchschnittlicher Werte von Niederschlag, Abfluss, TP-Fracht und TP-Konzentration teilweise bei unterschiedlichen Jahresabschnitten auftrat. Generell waren die Zeiträume April bis Juni sowie Oktober bis Dezember verhältnismäßig „ereignisarm“.

Überdurchschnittlich hohe bzw. sehr hohe Niederschläge im Einzugsgebiet traten im Zeitraum Juli bis September auf. Sie waren jedoch kaum mit hohen Abflüssen verbunden. Andererseits stiegen die TP-Konzentrationen (Monatsmittel) gerade in diesem Quartal auffallend oft an. Der Sachverhalt von auffallend hohen Niederschlägen und TP-Konzentrationen, jedoch geringen Abflüssen im Hochsommer dürfte seine Ursache in höheren Verdunstungs- bzw. geringeren Versickerungsraten haben, die ihrerseits zu einem Konzentrationseffekt im abfließenden Wasser führten.

Der Schwerpunkt überdurchschnittlicher Abflüsse und TP-Frachten lag in den Monaten Januar bis März. Da im Gegensatz dazu in diesem Quartal bei den Niederschlagswerten keine besonderen Auffälligkeiten zu verzeichnen sind, erklärt sich die Häufung von Abflusswerten und TP-Frachten vor allem durch eingetretene Schneeschmelzen.

Festzuhalten bleibt auch, dass im Zeitraum Oktober bis März rund drei Viertel aller Ereignisse mit mittleren Monatsfrachten von 2,3 Tonnen und darüber (Q_{75%}-Max) auftraten, also dieser Zeitraum für den P-Eintrag in den See eine weitaus größere Rolle spielte als das Sommerhalbjahr.

Tabelle 11 gibt die Bestimmtheitsmaße (r^2) einfacher Korrelationen wieder. Dabei sind – ungeachtet des Signifikanzniveaus – nur diejenigen Beziehungen, welche ein Bestimmtheitsmaß von über 50 %, d.h. einen Korrelationskoeffizienten von mindesten $r = 0,71$ erreichten, fett hervorgehoben. Korrelationen, die darunter liegen, müssen hingegen gerade hinsichtlich ihrer Aussagekraft aus praktischer Sicht als relativ „schwach“ gelten, da sich

hier der abhängige Faktor nur durch weniger als 50 % durch einen anderen Faktor erklären ließ. Sie werden daher als nicht relevant betrachtet.

Tab. 11: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben

	Abfluss	P-Frachten (kg)			P-Konzentrationen (mg/l)		
		Gesamt TP	partikulär PP	löslich DTP	Gesamt TP	partikulär PP	löslich DTP
Niederschlag	0,09 *	0,21 ***	0,15 ***	0,26 ***	n.s.	n.s.	0,06 *
Abfluss	-	0,58 ***	0,45 ***	0,67 ***	0,22 ***	0,18 ***	0,19 ***
TP-Fracht	0,58 ***	-	0,95 ***	0,69 ***	n.s.	n.s.	n.s.

n.s.: nicht signifikant; * : $p \leq 0,05$ ** : $p \leq 0,01$ *** : $p \leq 0,001$

Wie schon anhand der Ergebnisse des vorherigen Kapitels ersichtlich, bestätigt auch die Korrelationsanalyse zwar eine sachlogische und auch statistisch gesicherte Beziehungen zwischen monatlichen Niederschlägen und Abflüssen bzw. P-Frachten. Allerdings zeigen die Bestimmtheitsmaße von 0,09-0,26 nur einen sehr schwachen Zusammenhang an; d.h. aus der Höhe der monatlichen Niederschläge ließ sich nur zu ca. 10 % (r^2) die Höhe des monatlichen Wasserabflusses und nur zu 15-26 % die Höhe der monatlichen P-Frachten erklären.

Entscheidend hingegen war für das Ausmaß der monatlichen P-Frachten die Höhe des monatlichen Abflusses aus dem Einzugsgebiet. Tendenziell am engsten erwies sich dessen Einfluss auf die Fracht an löslichem Phosphor. Die enge Beziehung zwischen dem monatlichen Wasserabfluss an der Wutzschleife als Hauptmessstelle für das Gesamteinzugsgebiet des Eixendorfer Sees und dem Austrag an Gesamtphosphor in den Einzelmonaten verdeutlicht Abbildung 16 nochmals grafisch.

Je höher an der Wutzschleife die monatlich abfließende Wassermenge war, desto geringer schien deren mittlere P-Konzentration, wobei diese Beziehung allerdings mit einem Bestimmtheitsmaß von ca. 20 % nur schwach ausgeprägt war und keinesfalls überbewertet werden sollte. Dies vor allem auch deshalb, weil anhand einer Auswertung der ca. 1215 Einzelmessproben im Versuchszeitraum eine generelle Beziehung zwischen Abflusshöhe und TP-Konzentration nicht aufgestellt werden konnte.

Die partikuläre Phosphorfracht beeinflusste die Höhe der gesamten P-Fracht etwas mehr als die lösliche P-Fracht. Ein Zusammenhang zwischen der P-Konzentration und der P-Fracht schien bei Betrachtung der Monatsmittel (siehe Tabelle 11, auch Tabelle 9 und 10) nicht zu bestehen.

Verlässt man jedoch – wie bisher dargestellt – die Ebene der zu Monatsmitteln zusammengefassten Einzelwerten, sondern untersucht bei diesen 1215 Wertepaaren für TP generell die Beziehungen „Konzentration und Fracht“, „Abfluss und Fracht“ sowie „Abfluss und Konzentration“, so deutet sich an, dass die Höhe der in einem (kurzen Zeitabschnitt!)

in den See eingetragenen TP-Fracht tatsächlich nicht von der Höhe der in dieser Zeitspanne in den See eingetragenen Wassermenge, sondern von der deren P-Konzentration (siehe Abbildung 17) abhing.

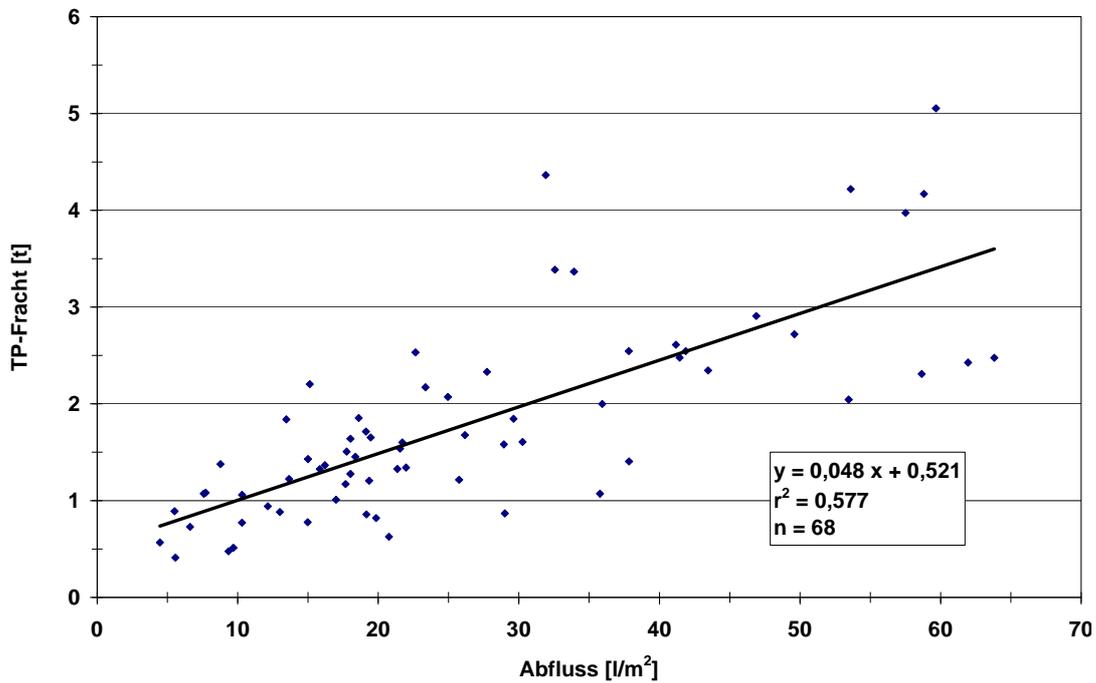


Abb. 16: Beziehung zwischen monatlicher Abflussmenge und TP-Fracht

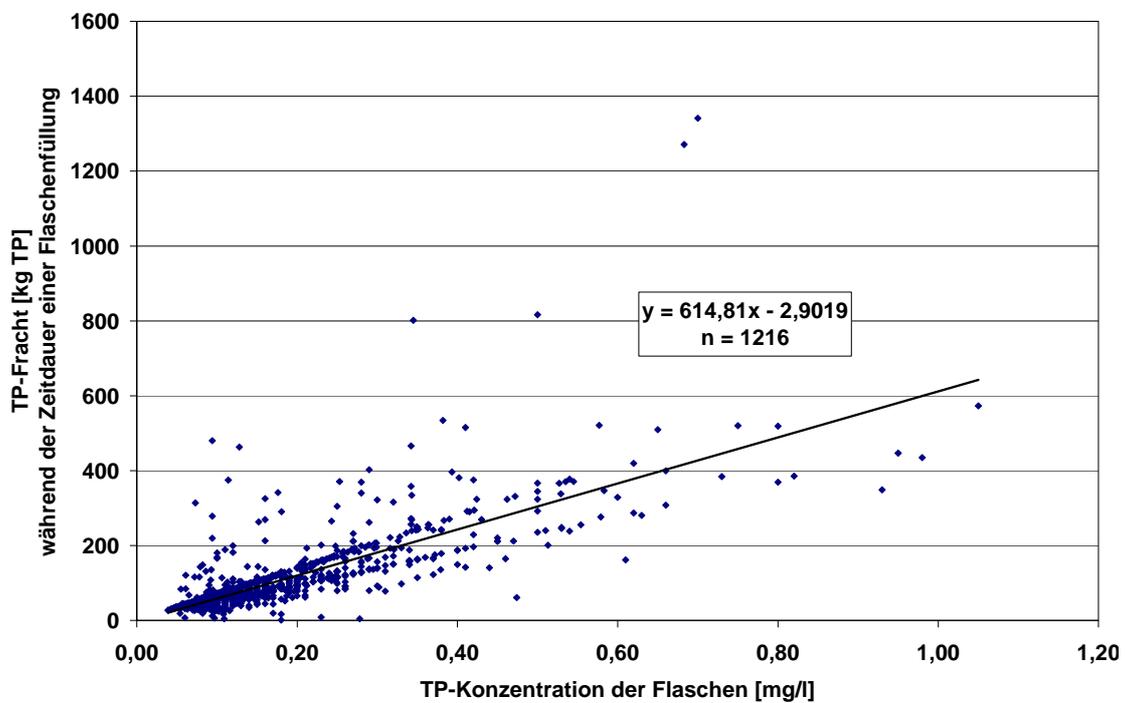


Abb. 17: Beziehung zwischen den TP-Konzentrationen der einzelnen Untersuchungsproben (Flaschen) und der während der Probenahme ausgetragenen TP-Fracht an der Messstelle Wutzschleife

Diese teilweise aufgetretene (scheinbaren) Widersprüche bei den Korrelationen mit Einzelwertepaaren und entsprechenden von Monatswertepaaren können dadurch erklärt werden, dass bei letzteren kompensierende bzw. verstärkende Effekte auftreten und damit größere Änderungen bewirken können. So geht bei 1215 Messwertepaaren ein einzelner Wert zu weniger als ein Promille in die Beziehung ein, hingegen ein Monatswert in Tabelle 11 oder Abbildung 16 zu ca. 1,5 %.

Es bleibt jedoch zu betonen, dass nicht nur wegen der Übersichtlichkeit, sondern auch wegen der praktischen Interpretierbarkeit bei allen Einzugsgebieten eine monatliche Betrachtungsweise gewählt wurde. Soweit von dieser bei der Ableitung von möglichen Beziehungen die Auswertung der Einzelergebnisse ein konträres Ergebnis aufweist, wird auch im Folgenden im Text darauf verwiesen.

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht in den Eixendorfer See

Zentrale Bedeutung für Sanierungsmaßnahmen des eutrophen Sees hat die Kenntnis, aus welchen Bereichen und in welcher Höhe die P-Einträge kommen. Da jedoch an der Messstelle Wutzschleife nur die Summe der aus dem gesamten Einzugsgebiet stammenden P-Frachten in den Eixendorfer See gemessen wurden, beruht die Differenzierung der Beiträge unterschiedlicher Flächennutzung, wie sie in Tabelle 12 vorgenommen wurde, auf rechnerischen Verfahren. Zu diesen wurden sowohl eigene Messergebnisse als auch regionale Zahlen anderer Quellen herangezogen.

Die Berechnung der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) wurden dabei aus der Differenz zwischen der (an der Wutzschleife gemessenen) TP-Fracht aus dem Gesamteinzugsgebiet und den (hochgerechneten) TP-Frachten aus Wald, Teichwirtschaft, Siedlung und Verkehr abgeleitet. Dies muss gerade in Hinblick auf die nachfolgende Interpretation vorausgeschickt werden, wobei auch zu betonen ist, dass ein anderes Verfahren nicht möglich war.

Anhand eigener zweijähriger Messreihen in zwei Waldgebieten (KREMB et al., 2002) waren die dort anfallenden TP-Frachten bekannt und konnten für das Gesamteinzugsgebiet hochgerechnet werden.

Die Höhe der aus dem Siedlungsbereich des Gebiets stammenden spezifischen jährlichen P-Fracht von 8,34 t wurde dem Bericht von SEIBOLD (2000) entnommen. Diese Summe setzt sich zusammen aus den Anteilen Kommunale Abwässer (4,45 t), Regentlastung (0,94 t) und Hauskläranlagen (2,95 t). Die Zahlen aus dem Bereich „Verkehr“ (Eintrag über nicht kanalisierte Gräben) wurden ebenfalls aufgrund von Literaturangaben (KREMB et al., 2002) über den Flächenanteil hochgerechnet.

Trotz dieser methodischen Grenzen dürften sich anhand Tabelle 12 einige zentrale Aussagen in Bezug auf die Eintragpfade und damit verbunden auf mögliche Sanierungsmaßnahmen ableiten lassen.

Erkennbar ist einerseits, die große Bedeutung der Landwirtschaft für den P-Eintrag in den Eixendorfer See. So konnte bei einem Anteil von 47 % LN am gesamten Einzugsgebiet ein Anteil von 50 % der gesamten jährlichen P-Fracht kalkuliert werden. An zweiter Stelle steht mit 38 % die hohe Belastung durch die Siedlung (d.h. Abwässer), wobei hier bei einem geringen Flächenanteil die hohe spezifische Belastung (kg/ha und Jahr) sofort auffällt. Obwohl die Waldfläche 46 % des Einzugsgebiets einnimmt, beträgt deren Anteil am P-Eintrag in den See nur ca. 5,5 %.

Tab. 12: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im GEZG Eixendorfer See (Messstelle Wutzschleife)

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	19.270	47,0	0,56	10.759	50,0
Wald	18.860	46,0	0,06	1192	5,5
Teiche	70	0,2	3,21	225	1,1
Siedlung	1.570	3,8	5,31	8.340	38,8
Verkehr	1.230	3,0	0,80	984	4,6
Summe (Mittel)	41.000	100	(0,52)	21.500	100

Inwieweit die Belastungen durch die Landwirtschaft noch näher quantifiziert werden können, wird im Folgenden (siehe Tabelle 13) beschrieben, wobei es sich auch hier um vorsichtige Schätzungen handelt.

Bei Tabelle 13 werden von der nach Tabelle 12 ermittelten TP-Fracht aus der LN die geschätzten Frachten aus den Bereichen Grundwasser, Zwischenabfluss, Drainagen und Oberflächenabfluss aus Grünland abgezogen. Der Rest ist die rechnerisch ermittelte, TP-Fracht, deren Herkunft vor allem aus der Erosion von Ackerflächen stammt.

Bezüglich der Abschätzung des Frachtanteiles aus dem Oberflächenabfluss von Grünlandflächen wurden Ergebnisse von POMMER et al. (2001) herangezogen und auf die Eixendorfer Verhältnisse übertragen.

Die Summe der Frachten aus dem Bereich Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen wurde folgendermaßen abgeschätzt: Anhand von Messergebnissen von DIEPOLDER et al. (2006) von zwei Lysimeteranlagen unter Acker (Puch) und Grünland (Kempten) wurden deren Ergebnisse auf die Eixendorfer Standortverhältnisse für den Bereich Grundwasser, Zwischenabfluss übertragen. Hierbei wurde durch die in Tabelle 13 genannten Spannweiten mit gewissen Plausibilitäts Grenzen gearbeitet. Die spezifischen TP-Austräge aus Drainagen gründen sich auf Messergebnisse aus durchgeführten Drainageversuchen sowie auf Ergebnisse von MERTENS (2004) vom oberfränkischen Weißenstädter See. Diese wurden für die Drainageflächen des Eixendorfer Einzugsgebiets hochgerechnet. Dabei wurde der Umfang der dortigen Drainageflächen aufgrund von Schätzungen durch Fachleute aus der Region (u.a. MALY, pers. Mitteilung) ermittelt.

Tabelle 13 zeigt, dass die Höhe der aus der Landwirtschaft stammenden TP-Frachten im Einzugsbereich des Eixendorfer Stausees schätzungsweise zu ca. 60 % durch Erosionsereignisse aus dem Ackerbau stammen dürften. Einen erheblichen Anteil von rund 40 % kommt jedoch auch dem vertikalen Austragspfad durch die Bodenmatrix zu.

Tab. 13. Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht (Mittel und Spannweiten) aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Eixendorfer Stausee

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (in kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen	4.022 2.870 – 4.797	37 27 – 45
Oberflächenabfluss Grünland	315	3
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	6.422 5.647 – 7.574	60 52 – 70
Summe aus LN	10.759	100

Fazit: Mit einer Jahresfracht von 21,5 t Gesamt-Phosphor aus dem Einzugsgebiet liegt der P-Eintrag in den Eixendorfer See um fast das 2,5-fache höher als der für eine erfolgreiche Sanierung des Sees ausgewiesene maximale jährliche P-Eintrag von 8,8 t. Sehr hohe Monatsfrachten, welche vorwiegend in den Monaten Januar bis März auftraten, ergaben sich durch überdurchschnittliche Abflüsse aus der Fläche, meist jedoch nicht durch hohe P-Konzentrationen.

Der P-Austrag aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen entsprach 50 % der gesamten P-Fracht in den See. Der Anteil des aus Siedlungs- und Verkehrsflächen stammenden P-Eintrags betrug 43 %. Daher sind Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität sowohl in einer Reduzierung der P-Einträge aus dem kommunalen Bereich als auch in einer Minderung der flächengebundenen Belastung aus der Landwirtschaft zu sehen. Da am diffusen P-Austrag aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen die Erosion mit schätzungsweise 60 % den Hauptbestandteil bildete, jedoch vertikale P-Verluste aus der Bodenmatrix mit knapp 40 % ebenfalls beträchtlich waren, stellen beide Pfade Ansatzpunkte für Verbesserungen im produktionstechnischen Bereich dar, um die aus der Landwirtschaft stammende P-Fracht in den See zu minimieren.

4.4.2 Teileinzugsgebiet Saxlmühle

4.4.2.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das ca. 73,5 ha große Teileinzugsgebiets Saxlmühle ist in der Abbildung 18 dargestellt.

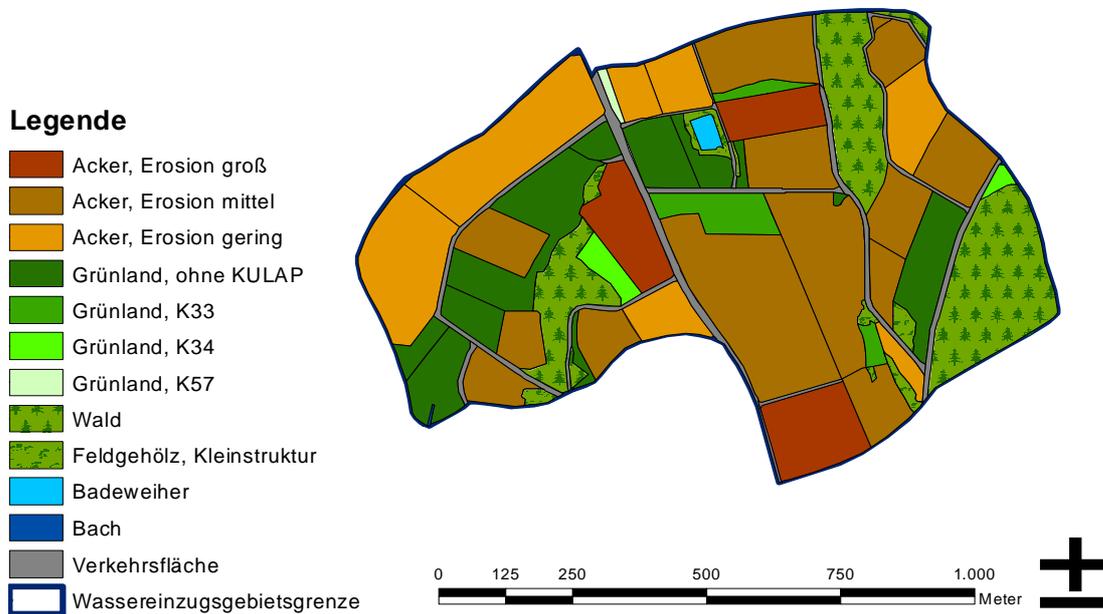


Abb. 18: Teileinzugsgebiet Saxlmühle mit Flächennutzung

Die Flächennutzung besteht mit 58 % vorwiegend aus ackerbaulicher Nutzung (siehe Abbildung 19). Von den Ackerflächen sind nach Einschätzung von FRIEDL, 2002 (modifiziert) rund 30 % als gering, dagegen ca. 56 % als mittel und 14 % als stark erosionsgefährdet einzustufen. Der Grünlandanteil beträgt 13 %, der Anteil von Wald, Feldgehölzen und Kleinstrukturen 17%. Das Gebiet ist nicht besiedelt, der Anteil der Verkehrsflächen beträgt rund 6 %.

Der mittlere Viehbesatz liegt mit rund 1,8 GV/ha etwas über dem Mittel des Gesamteinzugsgebiets (1,7 GV/ha).

Somit sind Ergebnisse des TEZG Saxlmühle in Hinblick auf dessen P-Austräge als ein Beispiel für Gebiete mit rein land- und forstwirtschaftlicher, dabei vorwiegend ackerbaulicher Nutzung mit vergleichsweise hohem Erosionspotenzial sowie intensiver Viehhaltung zu interpretieren.

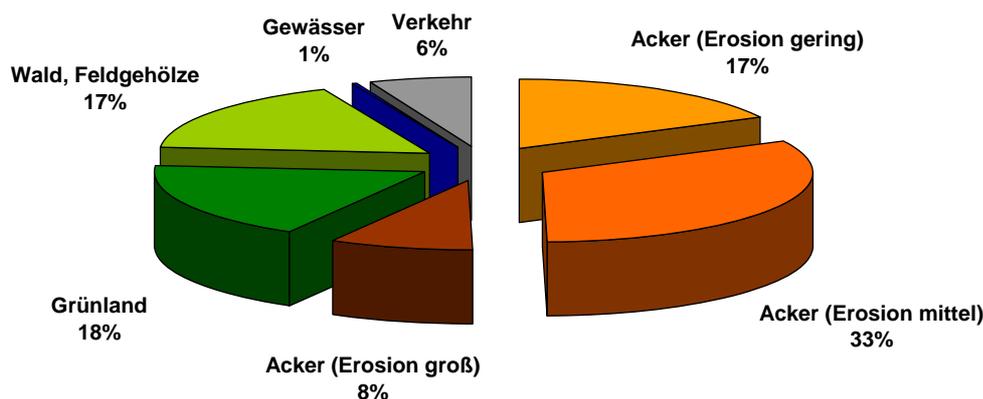


Abb. 19: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Saxlmühle

4.4.2.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Tab. 14: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht und TP-Konzentration im TEZG Saxlmühle im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	73,52 ha
Ø Niederschlag:	821 mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	191.806 m ³ /Jahr = 6,17 l/Sekunde = 261 mm/(l/m²) u. Jahr
Ø TP-Fracht:	40,4 kg/Jahr 3,37 kg/Monat 0,549 kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration (Spannweite der Quantilen 5 % - 95 %)	0,21 mg/l (0,04 - 0,60 mg/l)
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	70/30 Prozent

Aus Tabelle 14 kann entnommen werden, dass der durchschnittliche Jahresabfluss aus dem TEZG Saxlmühle bei ca. 6,2 l/s lag, wobei darauf hinzuweisen ist, dass bei Einzelmessungen auch Abflüsse von über 40 l/s auftraten. Das Mittel von 261 mm (l/m²) betrug nur 83 % des Wertes, welcher an der Wutzschleife (Gesamteinzugsgebiet) gemessen wurde (316 l/m² u. Jahr). Dagegen lag der durchschnittliche TP-Austrag pro Hektar Fläche von 0,549 kg TP pro Jahr um 5 % höher als beim Gesamteinzugsgebiet (0,524 kg TP/ha und Jahr). Die Zusammensetzungen der TP-Frachten (partikulärer und lösliche Fraktion) unterschieden sich dagegen nicht. Der überwiegende Anteil bestand auch hier aus partikulärem Phosphor. Die mittlere TP-Konzentration lag bei 0,21 mg/l. Sie wies ebenfalls wie die Abflüsse bei den 1233 durchgeführten Einzeluntersuchungen eine sehr hohe Streuung auf, wie die Darstellung der Spannweite zwischen der 5 % und der 95 %-Quantile in Tabelle 14 belegt.

Niederschläge, Abflüsse, P-Konzentrationen und P-Frachten (Monatsmittelwerte)

Abbildung 20 stellt den monatlichen Niederschlags- und Abflussmengen die P-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel) für den Messzeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004 gegenüber. In den Tabellen 15 bis 18 werden diese Parameter statistisch näher untersucht. Die graphischen Darstellung (Abbildung 20) zeigt, dass bei allen genannten Parametern sehr starke Schwankungen zwischen den einzelnen Monaten im Messzeitraum vorhanden waren.

Aus Tabelle 15 kann entnommen werden, dass im Teileinzugsgebiet Saxlmühle pro Monat durchschnittlich 17,6 mm (Median) Wasser abgeflossen sind, was im Mittel rund 27 % der gefallen Niederschläge entsprach. Damit verbunden war ein mittlerer TP-Austrag von 2,34 kg pro Monat (Median), der zu 70 % in Form von partikulärem Phosphor erfolgte.

Tab. 15: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Saxlmühle in den Monaten (n = 68) des Zeitraums Mai 99 – Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat

Parameter	Min	Q _{05%}	Q _{25%}	Median	Mittel	Q _{75%}	Q _{95%}	Max
Niederschlag (mm)	9,5	19,2	39,7	64,8	68,5	84,6	149,6	159,4
Abfluss (mm)	3,1	5,9	13,6	17,6	21,7	26,7	49,4	51,2
TP-Fracht (kg)	0,37	0,47	0,97	2,34	3,37	4,28	10,44	12,84
PP-Fracht (kg)	0,11	0,23	0,61	1,61	2,36	3,25	7,50	9,48
DTP-Fracht (kg)	0,06	0,14	0,29	0,51	1,01	1,33	3,84	5,15
TP-Konzentr. (mg/l)	0,04	0,04	0,09	0,17	0,22	0,29	0,63	1,17

Die mittlere monatliche TP-Konzentration von 0,17 mg/l entsprach der des Gesamteinzugsgebiets. Die maximale monatliche TP-Konzentration im TEZG Saxlmühle lag deutlich über der im GEZG. Spitzenbelastungen von über 0,6 mg TP/l im abfließenden Wasser traten dabei in den Monaten Mai bis August 2000 und im Mai 2001 auf.

Generell zeigt Tabelle 15, dass die Mittelwerte der einzelnen Parameter stets über den jeweiligen Medianen lagen. Dies ist ein Indiz für den großen Einfluss von eingetretenen Extremereignissen.

Die höchsten TP-Austräge von über 10 kg aus dem Teileinzugsgebiet wurden im Juni und Juli 2000, im Mai 2001, im Januar und März 2002 gemessen. Insgesamt gesehen erwies sich aber genau wie für das Gesamteinzugsgebiet auch für die Saxlmühle der Zeitraum Januar bis März als besonders problematisch hinsichtlich der TP-Fracht, was auch in Tabelle 17 zum Ausdruck kommt.

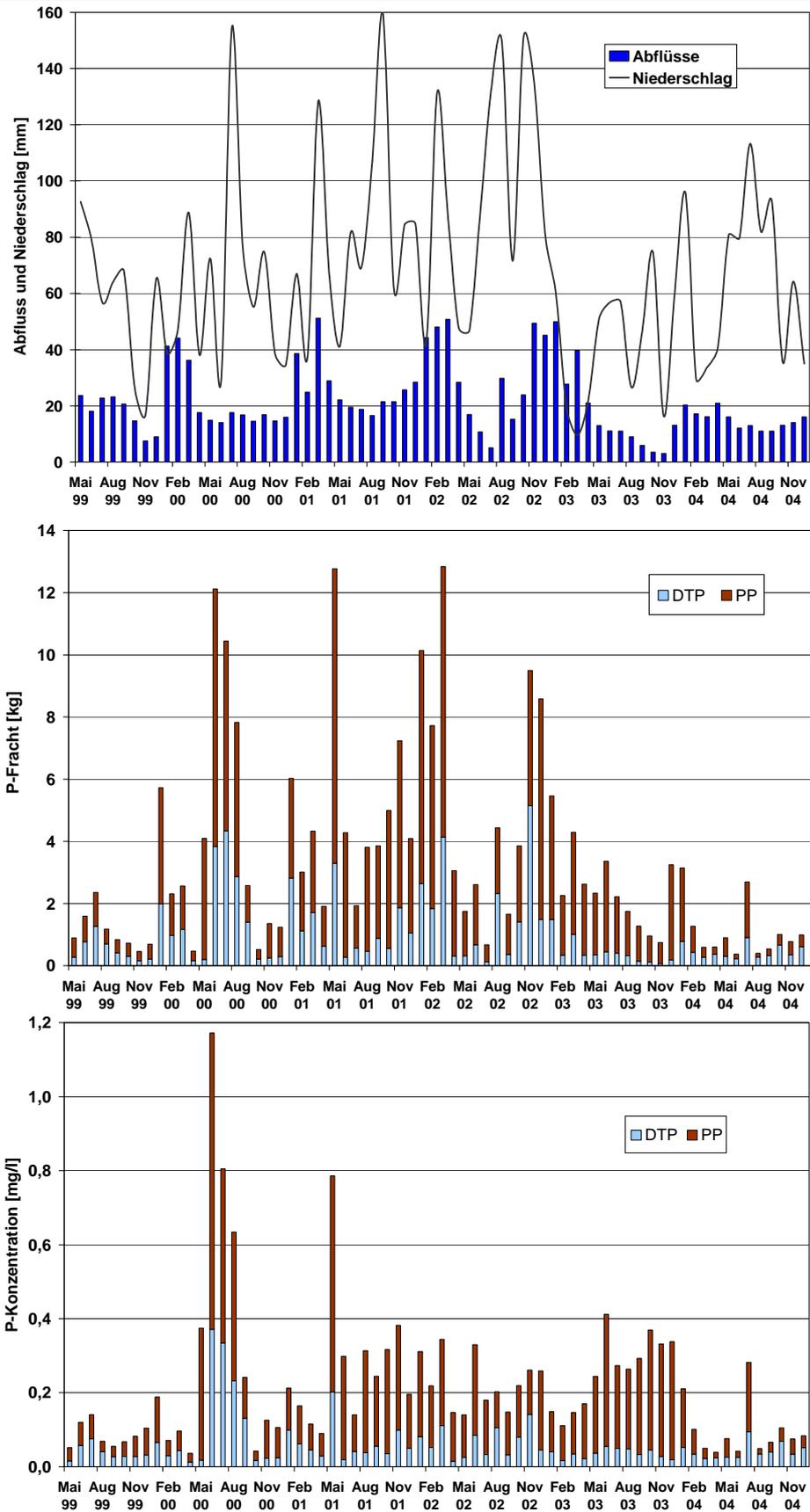


Abb. 20: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teil-einzugsgebiet Saxlmühle im Zeitraum Mai 99 bis Dez. 04

Tab. 16: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatsmittelwerte

Gruppe P-Fracht	Ø TP-Fracht (kg)	Ø NS (mm)	Ø Abfluss (mm)	Verhältnis PP / DTP	Ø TP-Konz. (mg/l)
unteres Viertel (n = 17)	0,656	63	13,1	1,7	0,101
Mitte (Q_{25%} - Q_{75%}) (n = 34)	2,449	65	19,1	3,0	0,196
oberes Viertel (n = 17)	7,908	81	35,7	2,1	0,383

Gruppiert man die TP-Frachten nach ihrer Höhe (Tabelle 16), so erkennt man die starken Schwankungsbreiten der monatlichen TP-Austräge, welche im Vergleich der unteren Viertels (0,66 kg TP) mit dem oberen Viertel (7,91 TP) sich mehr als eine Zehnerpotenz (Faktor 12) unterschieden. Auffallend ist jedoch, dass höhere monatlich Frachten nicht einheitlich wie beim Gesamteinzugsgebiet mit einem zunehmenden Anteil an partikulärem Phosphor verbunden waren. Ebenfalls ist bemerkenswert, dass die sich die mittleren monatlichen TP-Konzentrationen zwischen den einzelnen Gruppen stark unterschieden, was für das Gesamteinzugsgebiet nicht beobachtet werden konnte.

Demzufolge zeichnete sich im Teileinzugsgebiet Saxlmühle die Gruppe mit hohen monatlichen TP-Austrägen („oberes Viertel“) durch hohe mittlere Abflussraten (absolut und in Relation zu den Niederschlägen) als auch durch höhere Konzentrationen an Gesamt-Phosphor aus.

Die positive Beziehung von Monatmitteln der P-Konzentrationen (PP und DTP) und TP-Frachten ließ sich auch statistisch absichern, was Tabelle 18 entnommen werden kann. Es ist allerdings festzuhalten, dass anhand der Untersuchung der 1233 Einzelproben sich praktisch nur ein schwacher Hinweis darauf fand, dass beim Einzugsgebiet Saxlmühle hohe P-Frachten (Einzelwerte) generell mit hohen P-Konzentrationen einhergingen.

Kein gesicherter Zusammenhang bestand zwischen der Höhe des monatlichen Niederschlages und dem Monatsmittel des Abflusses.

Gerade der Einfluss der Höhe des abfließenden Wassers auf den TP-Austrag (Fracht) wird auch in Tabelle 17 ersichtlich, wobei für beide Parameter das erste Quartal des Jahres aufgrund eintretender Schneeschmelzen besonders problematisch erscheint. Dies trifft sowohl für das TEZG Saxlmühle wie auch für das gesamte Einzugsgebiet zu. Aus statistischer Sicht war die Beziehung zwischen monatlichem Abfluss und TP-Fracht für das Teileinzugsgebiet weniger eng ($r^2 = 0,30$) als für das Gesamteinzugsgebiet ($r = 0,58$) und konnte als quasi nicht relevant betrachtet werden. Dies bestätigten auch die 1233 Einzelanalysen.

Abweichend dazu verhält es sich aber mit der Häufigkeit des zeitlichen Auftretens von sehr hohen TP-Konzentrationen im abfließenden Wasser (Monatsmittel). Während für die Messtelle Wutzschleife diesbezüglich der Zeitraum Hochsommer bis Frühherbst (Juli bis September) als besonders kritisch angesehen werden konnte, liegt der Schwerpunkt beim TEZG Saxlmühle (siehe Tabelle 17) mit einem hohen Anteil an erosionsgefährdeten Ackerflächen tendenziell im April bis Juni.

Tab. 17: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)

Quartal	Monate im Quartal		Auftreten sehr hoher Werte (oberes Viertel; n=17 von 68 Monatswerten)							
	n	%*	Niederschlag		Abfluss		TP-Fracht		TP-Konz.	
	n	%*	n	%	n	%	n	%	n	%
Jan. - März	15	22	5	29	11	65	8	47	2	12
April - Juni	17	25	2	12	2	12	2	12	6	35
Juli - Sept.	18	26	7	41	1	6	3	18	4	24
Okt. – Dez.	18	26	3	18	3	18	4	23	5	29

* in % des Versuchs

Tab. 18: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatswerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben

	Abfluss	P-Frachten			P-Konzentrationen		
		Gesamt TP	parikular PP	löslich DTP	Gesamt TP	parikular PP	löslich DTP
Niederschlag	n.s.	0,06 *	n.s.	0,11 **	n.s.	n.s.	n.s.
Abfluss	-	0,30 ***	0,25 ***	0,30 ***	n.s.	n.s.	n.s.
TP-Fracht	0,30 ***	-	0,94 ***	0,77 ***	0,53 ***	0,45 ***	0,52 ***

n.s.: nicht signifikant; * : $p \leq 0,05$ ** : $p \leq 0,01$ *** : $p \leq 0,001$

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht

Tab. 19: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Saxlmühle

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	56,2	76	0,64	36,00	89,3
Wald, Feldgehölze.	12,5	17	0,05	0,65	1,6
Verkehr	4,8	6	0,80	3,68	9,1
Summe (Mittel)	73,5	100	(0,55)	40,40	100

Tabelle 19 zeigt die P-Frachten in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Saxlmühle. Von der landwirtschaftlichen Nutzfläche, deren Anteil an der Gesamtgebietsfläche 76 % umfasst, stammen 89 % der gesamten ausgetragenen TP-Fracht. Nach Tabelle 20 dürfte dabei der Hauptanteil auf Erosionsereignisse zurückzuführen sein. Jedoch trägt auch das versickernde Wasser aus Acker- und Grünlandflächen mit 33 % erheblich zu den TP-Austrägen aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche bei.

Tab. 20: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Saxlmühle

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (in kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen	12	33
Oberflächenabfluss Grünland	< 1	2
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	23	65
Summe aus LN	36	100

Fazit: Saxlmühle ist ein Teileinzugsgebiet mit rein land- und forstwirtschaftlicher, dabei vorwiegend ackerbaulicher Nutzung mit vergleichsweise hohem Erosionspotential und intensiver Viehhaltung. Hohe TP-Frachten – überwiegend in Form von partikulärem Phosphor – wurden durch hohe Wasserabflüsse von der Fläche bedingt, die zudem oft auch hohe TP-Konzentrationen aufwies. Extrem hohe Abflussraten und TP-Frachten waren verstärkt in den Monaten Januar bis März zu beobachten. Die Herkunft des aus der LN ausgetragenen Phosphors konnte zu etwa zwei Drittel der Erosion aus Ackerflächen zugeordnet werden.

4.4.3 Teileinzugsgebiet Irlach

4.4.3.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das ca. 64 ha große Teileinzugsgebiets Irlach ist in der Abbildung 21 dargestellt.

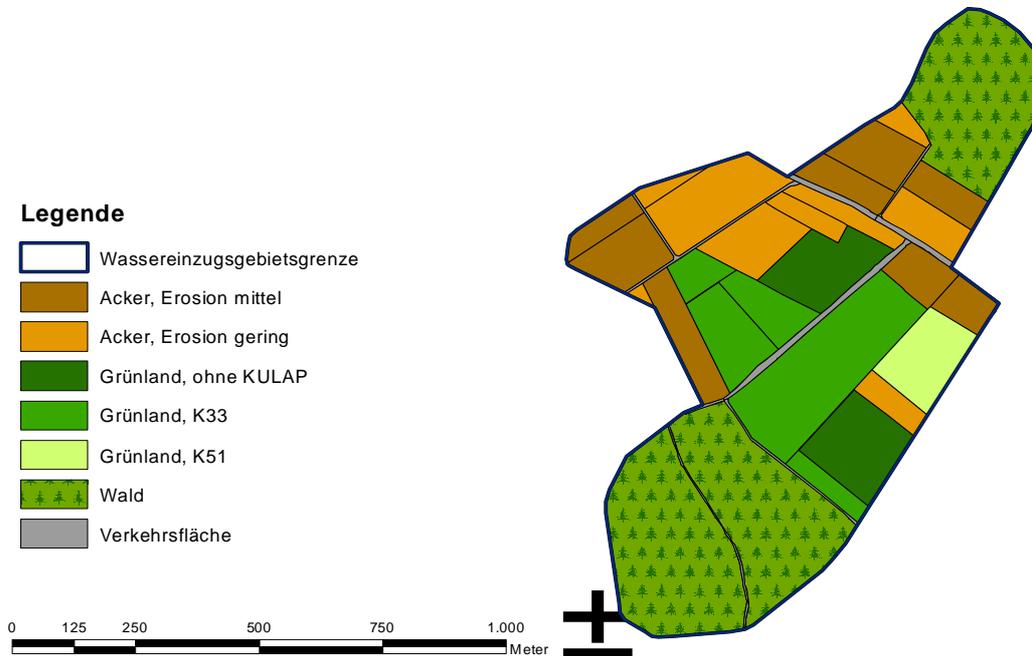


Abb. 21: Teileinzugsgebiet Irlach mit Flächennutzung

Das TEZG Irlach wird zu 61 % landwirtschaftlich genutzt, wobei Acker- und Grünlandflächen jeweils ca. 30 % der Gesamtfläche einnehmen. Von den Grünlandflächen sind über 50 % drainiert. Die Ackerflächen sind zu 48 % als gering und zu 52 % als mittel erosionsgefährdet einzustufen. Im Gegensatz zum TEZG Saxlmühle fehlen stark erosionsgefährdete Ackerflächen. Der Anteil an Waldflächen liegt bei rund 37 %. Das Teileinzugsgebiet ist nicht besiedelt, der Anteil der Verkehrsflächen umfasst knapp 3 % (siehe Abbildung 22).

Der mittlere Viehbesatz liegt bei rund 1,8 GV/ha.

Somit sind Ergebnisse des TEZG Irlach in Hinblick auf dessen Abflüsse und P-Austräge als ein Beispiel für Gebiete mit land- und forstwirtschaftlicher Nutzung mit etwa gleichen Anteilen an Wald, Grünland- sowie Ackerflächen mit geringem bis mittlerem Erosionspotenzial und hohem Viehbesatz zu interpretieren. Hinsichtlich der Grünlandflächen ist der hohe Drainageanteil festzuhalten.

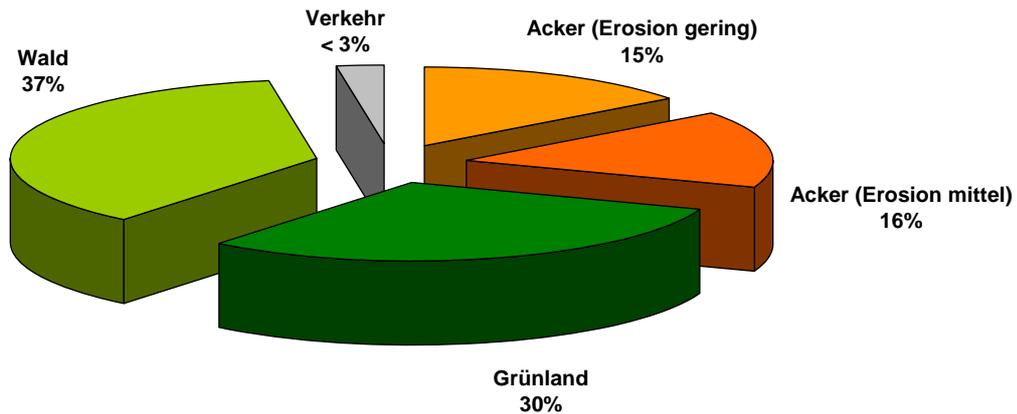


Abb. 22: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Irlach

4.4.3.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Tab. 21: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im TEZG Irlach im Zeitraum Mai 2000 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	63,60 ha
Ø Niederschlag:	851 mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	193.962 m ³ /Jahr = 6,15 l/Sekunde = 305 mm/(l/m ²) u. Jahr
Ø TP-Fracht:	21,0 kg/Jahr 1,75 kg/Monat 0,330 kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration (Spannweite der Quantilen 5 % - 95 %)	0,11 mg/l (0,016 - 0,584 mg/l)
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	36/64 Prozent

Aus Tabelle 21 kann entnommen werden, dass der durchschnittliche Jahresabfluss aus dem TEZG Irlach ca. 6,2 l/s betrug. Hinzuzufügen ist, dass auch Abflussereignisse von über 110 l/s zu verzeichnen waren. Das Abflussmittel (305 mm) lag um 17 % höher als im TEZG Saxlmühle (261 mm).

Der durchschnittliche jährliche TP-Austrag lag in Irlach mit 0,330 kg TP/ha deutlich unter den Austrägen des Gesamteinzugsgebiets (0,524) bzw. dem TEZG Saxlmühle (0,549). Die mittlere TP-Konzentration des abgeflossenen Wassers betrug in Irlach mit 0,11 mg/l nur etwa die Hälfte des Wertes des TEZG Saxlmühle (0,21 mg/l) bzw. zwei Drittel des Wertes an der Messstelle Wutzschleife (0,17 mg/l). Auffallend war aber auch die große Streuung bei den 1120 gewonnenen einzelnen Messdaten zur TP-Konzentration, wie die Darstel-

lung der Spannweite zwischen der 5 % und der 95 %-Quantile in Tabelle 21 belegt.

Die Zusammensetzung der TP-Frachten bzw. TP-Konzentrationen (partikuläre und lösliche Fraktion) unterschieden sich prinzipiell von der an der Wutzschleife (GEZG) oder der im TEZG Saxlmühle. Während bei diesen beiden Messstellen die Phosphorfracht im jährlichen Mittel zu über zwei Drittel (70 %) aus partikulärem Phosphor (PP) bestand, lag dessen Anteil bei dem aus dem TEZG Irlach abfließenden Wasser im Mittel nur bei ca. einem Drittel (36 %).

Es ist allerdings zu vermerken, dass strenggenommen ein direkter Vergleich der Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen zwischen dem TEZG Irlach und dem TEZG Saxlmühle bzw. den Ergebnissen der Messstelle Wutzschleife aufgrund der unterschiedlichen Messzeiträume (Beginn Mai 2000 in Irlach gegenüber Mai 1999) nur eingeschränkt möglich ist. Dennoch zeigt sich in Bezug auf die Zusammensetzung des Gesamtposphors auch für die gemeinsame Untersuchungsperiode aller drei Einzugsgebiete (Mai 2000 bis Dezember 2004) eine prinzipiell unterschiedliche Fraktionierung des TP mit dem Resultat eines relativ wesentlich höheren Anteils an löslichem Phosphor beim TEZG Irlach.

Niederschläge, Abflüsse, P-Konzentrationen und P-Frachten (Monatsmittelwerte)

Abbildung 23 stellt den monatlichen Niederschlags- und Abflussmengen die P-Frachten und TP-Konzentrationen für den Messzeitraum Mai 2000 bis Dezember 2004 gegenüber. In den Tabellen 22 bis 25 werden diese Parameter statistisch näher untersucht. Die graphischen Darstellung (Abbildung 23) zeigt, dass bei allen genannten Parametern sehr starke Schwankungen zwischen den einzelnen Monaten im Messzeitraum vorhanden waren.

Tab. 22: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Irlach in den Monaten (n = 56) des Zeitraums Mai 2000 – Dez. 04; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat

Parameter	Min	Q _{05%}	Q _{25%}	Median	Mittel	Q _{75%}	Q _{95%}	Max
Niederschlag (mm)	9,5	19,2	41,0	67,2	70,9	86,4	150,8	159,4
Abfluss (mm)	7,6	9,6	13,6	18,4	25,4	26,2	66,8	141,2
TP-Fracht (kg)	0,09	0,15	0,32	0,64	1,75	1,73	6,80	14,88
PP-Fracht (kg)	0,04	0,09	0,22	0,40	0,63	0,76	1,83	3,99
DTP-Fracht (kg)	0,04	0,04	0,09	0,22	1,11	1,02	5,22	10,89
TP-Konzentr. (mg/l)	0,01	0,02	0,03	0,06	0,09	0,10	0,25	0,48

Aus den statistischen Kenngrößen (Boxplot) von Tabelle 22 kann entnommen werden, dass im Teileinzugsgebiet Irlach pro Monat durchschnittlich 18,4 mm (Median) Wasser abgeflossen sind, was im Mittel rund 27 % der gefallen Niederschläge entsprach. Damit verbunden war ein monatlicher TP-Austrag von 0,64 kg (Median).

Die durchschnittlichen monatlichen Abflussraten (mm bzw. l/m²) schwankten zwischen ca. 8 und 141 mm. Herausragende Extremereignisse mit Monatsmitteln über 50 mm traten

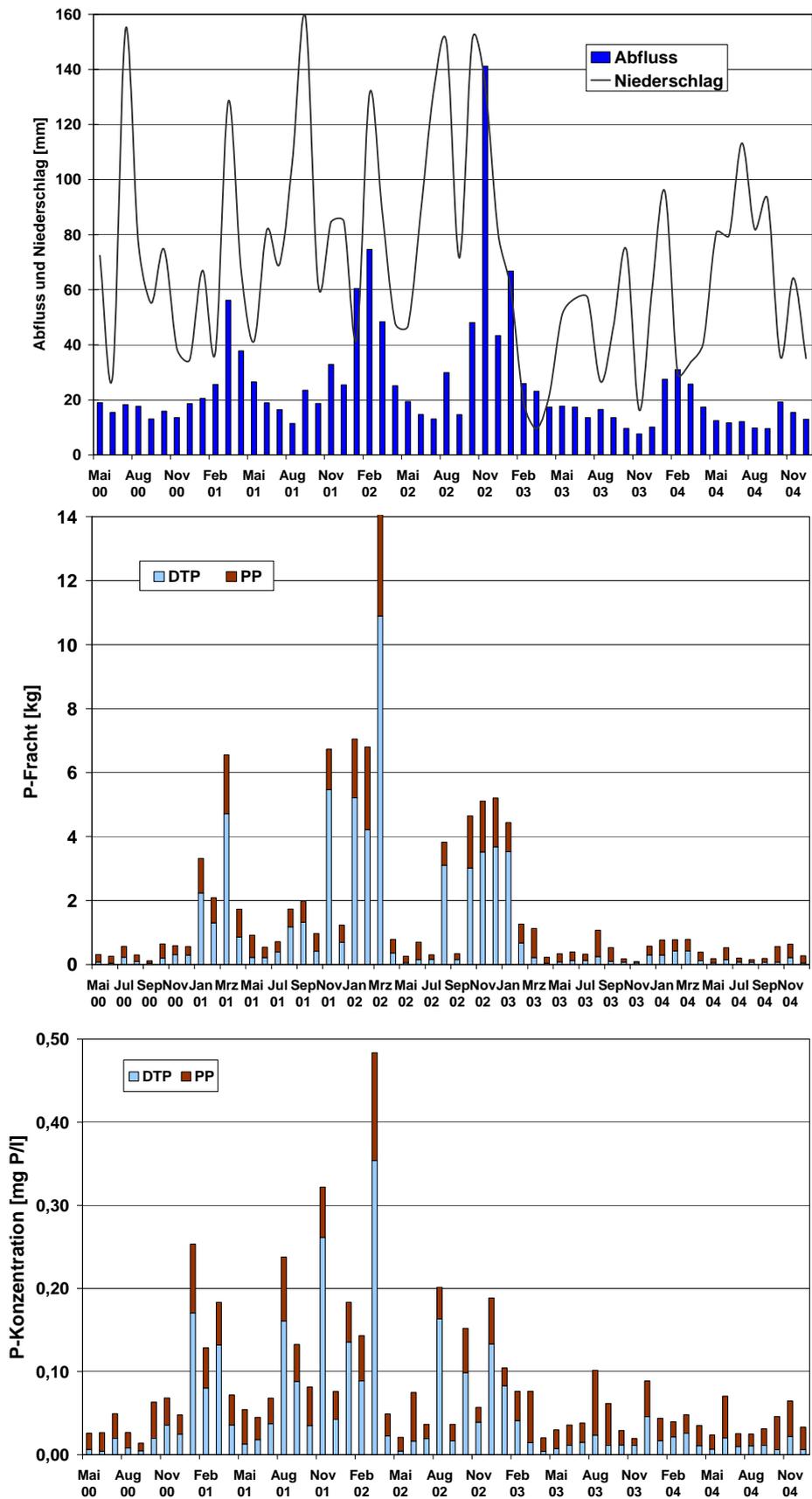


Abb. 23: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teil-einzugsgebiet Irlach im Zeitraum Mai 00 bis Dez. 04

im März 2001, im Januar, Februar und November 2002 und im Januar 2003 auf. Bemerkenswert ist, dass der Spitzenwert, welcher im November 2002 erreicht wurde, die Extrema an der Wutzschleife bzw. am TEZG Saxlmühle bei weitem übertraf.

Generell zeigt Tabelle 22, dass wie in den anderen Einzugsgebieten die Mittelwerte der einzelnen Parameter stets über den jeweiligen Medianen lagen. Dies ist ein Indiz für den großen Einfluss von eingetretenen Extremereignissen.

Sowohl die mittlere monatliche TP-Konzentration als auch die oberen Extrema lagen mit 0,06 mg/l (Median) bzw. 0,25-0,48 mg/l (95 %-Quantile bis Maximum) im Vergleich zu den vorher beschriebenen Einzugsgebiet Saxlmühle (0,17 mg/l bzw. 0,63-1,17 mg/l) vergleichsweise niedrig, was als ein Indiz für die andere Flächennutzung mit mehr Wald und Grünland des TEZG's Irlach gewertet werden kann. Die Spitzenbelastungen im abfließenden Wasser traten in den Monaten Januar und August und November 2001 sowie im März 2002 (Maximum) auf.

Die höchsten TP-Austräge von über 6 kg aus dem Teileinzugsgebiet wurden im März und November 2001 sowie im Januar und Februar 2002 gemessen. Das absolute Maximum war mit einer TP-Fracht von ca. 15 kg im März des gleichen Jahres zu verzeichnen und dürfte in Zusammenhang mit dem Zeitpunkt der üblichen Gülleausbringung auf Grünland zu sehen sein. Dafür spricht auch, dass in diesem Monat sich die TP-Konzentration, welche überwiegend aus löslichem Phosphor bestand, mit Abstand am höchsten im gesamten Untersuchungszeitraum war, während die Abflussmenge in diesem Monat (knapp 50 mm) nicht im Bereich extrem hoher Werte lag. Interessant ist der Vergleich der einzelnen Quantilen bzw. der Mediane und Mittelwerte bei den verschiedenen P-Frachtanteilen. So deutet die untere Hälfte der TP-Frachten (Minimum bis Median) auf einen höheren Anteil der partikulären P-Fraktion (PP) hin. Die obere Hälfte der insgesamt 56 Monatwerte zeigt dagegen nicht nur einen sprunghaften Anstieg bei der TP-Fracht, sondern auch insbesondere der Fracht an löslichem Phosphor (DTP).

Bemerkenswert ist, dass einzelne Monate zu 22 % (Wert 95 %-Quantile) bis 46 % (Maximum) zum durchschnittlichen Jahresabfluss (305 l/m²) bzw. zu 32 % bis 71 % zur durchschnittlichen jährlichen TP-Fracht (21 kg TP) aus dem TEZG beitrugen.

Tab. 23: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 56 Monatsmittelwerte

Gruppe P-Fracht	Ø TP-Fracht (kg)	Ø NS (mm)	Ø Abfluss (mm)	Verhältnis PP / DTP	Ø TP-Konz. (mg/l)
unteres Viertel (n = 14)	0,219	66	13,5	2,2	0,026
Mitte (Q_{25%} - Q_{75%}) (n = 28)	0,728	58	19,7	1,5	0,059
oberes Viertel (n = 14)	5,313	102	48,8	0,4	0,198

Gruppiert man die TP-Frachten nach ihrer Höhe (Tabelle 23), so erkennt man die starken Schwankungsbreiten der monatlichen Austräge, welche im Vergleich der unteren Viertels (0,22 kg TP) mit dem oberen Viertel (5,31 TP) sich um den Faktor 24 unterschieden.

Aus Tabelle 23 ist ebenfalls der gegebene Zusammenhang zwischen der Höhe der monatlichen TP-Fracht und der monatlichen Abflussmenge ersichtlich, der auch statistisch (für

die 56 Monatsmittel) abgesichert werden kann. Hingewiesen sei allerdings, dass daraus kein genereller Zusammenhang zwischen Abflussmenge und TP-Fracht abzuleiten war, worauf die Auswertung von 1120 Einzelmesswertspaaren hindeutete. Daraus kann geschlossen werden, dass hohe TP-Monatsfrachten nicht prinzipiell durch hohe monatliche Abflussmengen als solche verursacht worden sind, sondern sich vielmehr weitere Einflüsse auswirkten. Dies könnten z. B. Düngungsmaßnahmen gewesen sein, die in einzelnen Monaten mit höheren Abflüssen zu einem zusätzlichen Konzentrationsanstieg und somit zu einem starken Frachtanstieg führten. Auf diese These weist sowohl die (allerdings sehr schwache) Korrelation „Abflussmenge und TP-Konzentration“ in Tabelle 24 ($B = 0,10$) als auch die Auswertung der entsprechenden 1120 Paare der Einzelmesswerte hin. Dafür spricht als Beispiel auch der schon vorher beschriebene Monat März 2002, wo das Maximum der abgeflossenen TP-Fracht aus dem TEZG Irlach mehr auf eine extrem hohe TP-Konzentration als auf eine extrem hohe Abflussmenge zurückgeführt werden konnte. In der Tabelle 23 ist ebenfalls erkennbar, dass sich – wie bereits vorher schon anhand Tabelle 22 und dem vorgenannten Beispiel angedeutet – der Bereich sehr hoher TP-Frachten bei den 56 Monatsmitteln überwiegend aus löslichem Phosphor (DTP) bestand, dagegen sehr niedrige und mittlere monatlich TP-Frachten überwiegend aus partikulärem Phosphor bestanden. Der Zusammenhang zwischen der TP-Fracht und dem Anteil an partikulärem Phosphor ließ sich am besten mit einer Potenzfunktion ($r^2 = 0,58$) beschreiben, die in Abbildung 24 dargestellt ist.

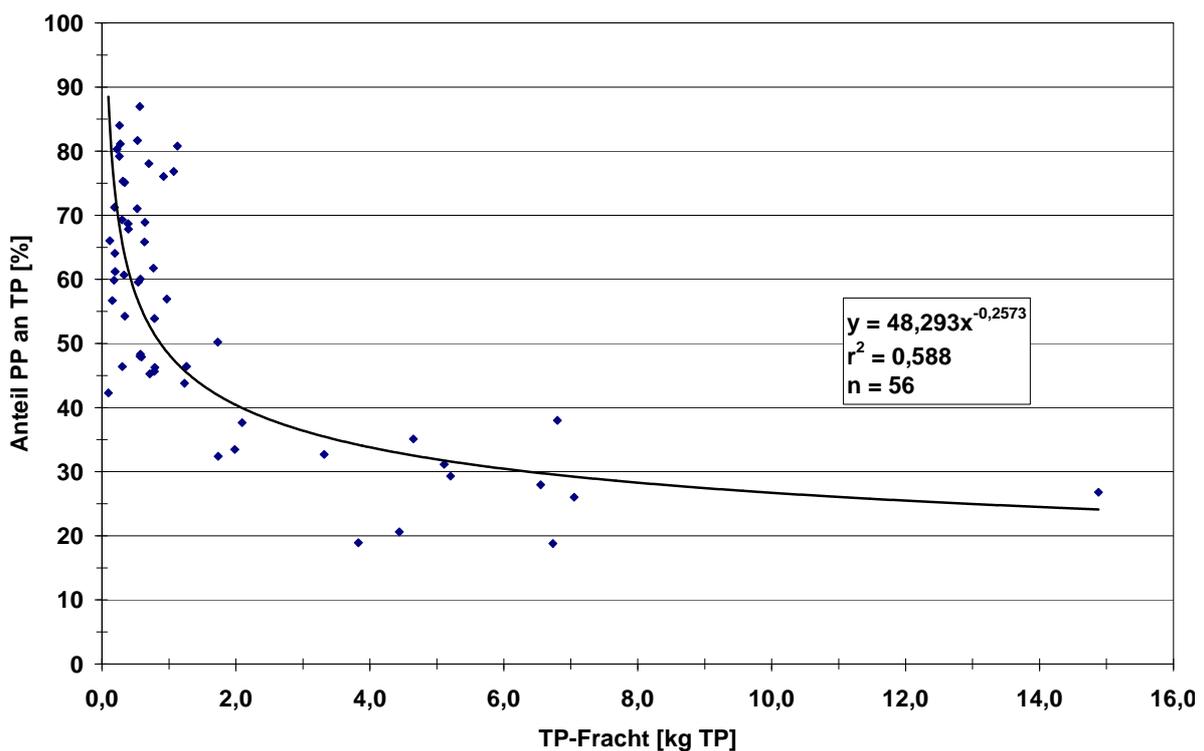


Abb. 24: Beziehung zwischen TP-Fracht und Anteil des partikulären Phosphors am TP

Auch ist für Irlach - gleichwie für Saxlmühle – bemerkenswert, dass die sich die mittleren monatlichen TP-Konzentrationen zwischen den einzelnen Gruppen stark unterschieden, was für das Gesamteinzugsgebiet nicht beobachtet werden konnte. Das bedeutet, dass in Irlach hohe monatliche TP-Austrägen („oberes Viertel“) durch hohe Abflussraten (absolut

und in Relation zu den Niederschlägen) und durch höhere Konzentrationen an Gesamt-Phosphor zustande kamen.

Tab. 24: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben

	Abfluss	P-Frachten (kg)			P-Konzentrationen (mg/l)		
		gesamt TP	parikular PP	löslich DTP	gesamt TP	parikular PP	löslich DTP
Niederschlag	0,11 *	0,10 *	0,09 *	0,11 *	0,08 *	n.s.	0,10 *
Abfluss	-	0,41 ***	0,44 ***	0,39 ***	0,10 *	n.s.	0,13 **
TP-Fracht	0,41 ***	-	0,92 ***	0,99 ***	0,76 ***	0,45 ***	0,78 ***

n.s.: nicht signifikant; * : $p \leq 0,05$ ** : $p \leq 0,01$ *** : $p \leq 0,001$

Die positive Beziehung von P-Konzentrationen (PP und DTP) und TP-Fracht ließ sich – wie auch für das TEZG Saxlmühle - statistisch absichern, was Tabelle 24 entnommen werden kann. Ebenfalls bestand ein schwacher, jedoch gesicherter Zusammenhang zwischen der Höhe des monatlichen Niederschlages und dem Monatsmittel des Abflusses. Dies war bei den vorgenannten Einzugsgebieten nicht der Fall.

Tab. 25: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)

Quartal	Monate im Quartal		Auftreten sehr hoher Werte (oberes Viertel; n=14 von 56 Monatswerten)							
	n	%*	Niederschlag		Abfluss		TP-Fracht		TP-Konz.	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Jan. – März	12	21	4	29	7	50	7	50	7	50
April – Juni	14	25	1	9	2	14	0	0	0	0
Juli - Sept.	15	27	7	50	1	7	3	21	4	29
Okt. – Dez.	15	27	2	2	4	29	4	29	3	21

* in % des Versuchs

Gerade der Einfluss der Höhe des abfließenden Wassers auf den monatlichen TP-Austrag (Fracht) wird auch in Tabelle 25 ersichtlich, wobei für beide Parameter das erste Quartal des Jahres aufgrund eintretender Schneeschmelzen besonders problematisch erscheint. Dies war auch im TEZG Saxlmühle und im GEZG so. Im Gegensatz zu diesen war aber beim TEZG Irlach im Zeitraum Januar bis März auch das Auftreten sehr hoher TP-Konzentrationen erkennbar. Es ist zu vermuten, dass sich hier bei dem zu 50 % vorhande-

nen Grünlandanteil – mehr als die Hälfte davon drainiert - die Gülleausbringung Ausgang des Winters, verbunden mit hohen Abflussraten negativ auswirkte. Es ist somit generell anzunehmen, dass aufgrund der starken Verrohrung im TEZG Irlach hohe Niederschläge oder Schneeschmelzen relativ schnell abfließen. Dabei dürfte gerade nach organischer Düngung insbesondere das lösliche Phosphat, welches nach eigenen Untersuchungen (siehe Material und Methoden, Kapitel 3.3, Tabelle 3 bzw. Kapitel 3.4, Tabelle 4) rund ein Drittel des in der Gülle enthaltenen TP beträgt, schnell ausgetragen werden, während der partikulär gebunden Phosphor stärker zurückgehalten wird. Der hohe Anteil an löslichem Phosphat bei sehr hohen P-Frachten scheint diese These zu erhärten.

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht

Tabelle 26 zeigt die P-Frachten in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Saxlmühle. Der weitaus größte Teil der TP-Fracht aus dem TEZG Irlach stammt aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Diese trägt mit einem Flächenanteil von 61 % zu fast 87 % zur gesamten P-Fracht bei. Es ist allerdings festzuhalten, dass der auf einen Hektar LN und Jahr bezogene durchschnittliche TP-Austrag von 0,47 kg TP beim Teileinzugsgebiet Irlach deutlich niedriger als beim TEZG Saxlmühle (0,64 kg TP/ha und Jahr) bzw. tendenziell etwas niedriger als beim Gesamteinzugsgebiet (0,56 kg TP/ ha u. Jahr) lag. Daraus resultiert, dass ein hoher Grünlandanteil im Wassereinzugsgebiet zu niedrigeren TP-Belastungen von Oberflächengewässern führen kann.

Tab. 26: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im Teileinzugsgebiet Irlach

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	38,7	61	0,47	18,18	86,7
Wald	23,3	37	0,06	1,42	6,8
Verkehr	1,7	< 3	0,80	1,36	6,5
Summe (Mittel)	63,7	100	(0,33)	20,96	100

Tab. 27: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Irlach

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss, Drainagen	8	45
Oberflächenabfluss Grünland	2	8
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	8	47
Summe aus LN	18	100

Tabelle 27 zeigt eine Abschätzung der einzelnen Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Maßgeblich für die aus der LN stammenden TP-Frachten waren zu etwa gleichen Teilen die durch Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen

und die durch die Erosion von Ackerflächen bedingten TP-Austräge. Der Anteil des Oberflächenabflusses vom Grünland spielte nur eine untergeordnete Rolle.

Fazit: Kennzeichnend für das TEZG Irlach waren hohe TP-Austräge im Zeitraum Januar bis März. Sie wurden bedingt durch das Auftreten von hohen Abflussraten, verbunden mit hohen TP-, speziell DTP-Konzentrationen. Daraus und aus der Erkenntnis, dass der durch Drainagen, Zwischenabfluss und Grundwasser bedingte P-Austrag – neben der Erosion – eine bedeutende Rolle spielte, ist es wichtig, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie gerade auf drainierten Grünlandflächen P-Austräge minimiert werden können. Dazu zählen neben einem optimierten Gülle-Management auch die Prüfung von technischen Möglichkeiten bezüglich der Gülleausbringung.

4.4.4 Teileinzugsgebiet Zillendorf

4.4.4.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das ca. 288,5 ha große Teileinzugsgebiets Zillendorf ist in der Abbildung 25 dargestellt.



Abb. 25: Teileinzugsgebiets Zillendorf mit Flächennutzung

Die Flächen des TEZG Zillendorf werden zu 62 % landwirtschaftlich genutzt, wobei die Grünlandflächen ca. 26% und die Ackerflächen ca. 36% des Einzugsgebiets ausmachen (siehe Abbildung 26). Die Ackerflächen sind zu rund 39 % als gering und zu ca. 59 % als mittel erosionsgefährdet einzustufen. Im Gegensatz zum TEZG Saxlmühle und ähnlich wie im TEZG Irlach fehlen stark erosionsgefährdete Ackerflächen fast völlig (< 2 %). Etwa 8 % der Ackerflächen und 40 % der Grünlandflächen sind drainiert. Der Anteil an Waldflächen und Feldgehölzen liegt bei 29 %. Im Gegensatz zu den TEZG Saxlmühle und Irlach ist das Einzugsgebiet Zillendorf besiedelt. Der Siedlungsanteil beträgt 4 %. Der Anteil der Verkehrsflächen umfasst ca. 5 %.

Der mittlere Viehbesatz liegt mit 1,6 GV/ha etwa auf dem Niveau vom GEZG Eixendorf.

Im Hinblick auf Abflüsse und P-Austräge sind die Ergebnisse des TEZG Zillendorf als ein Beispiel für Gebiete mit land- und forstwirtschaftlicher Nutzung mit hohem Viehbesatz sowie einem gewissen Siedlungseinfluss zu interpretieren. Hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung steht Zillendorf für teilweise drainierte Einzugsgebiete mit Acker und Grünlandnutzung mit geringem und mittleren Erosionspotential.

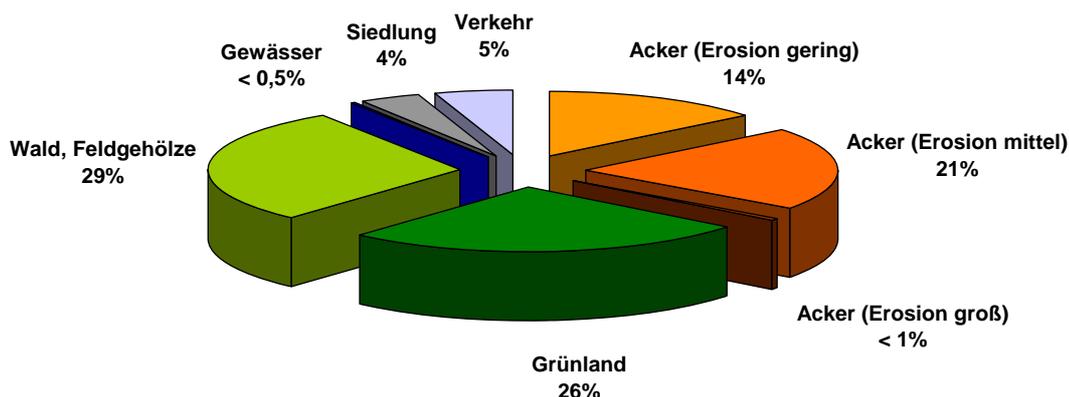


Abb. 26: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Zillendorf

4.4.4.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Tab. 28: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im TEZG Zillendorf im Zeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	288,52	ha
Ø Niederschlag:	821	mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	722.425	m ³ /Jahr
	22,9	l/Sekunde
	250	mm/(l/m ²) u. Jahr
Ø TP-Fracht:	159.1	kg/Jahr
	13,3	kg/Monat
	0,552	kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration (Spannweite der Quantilen 5 % - 95 %)	0,22	mg/l
	0,08 - 0,55	mg/l)
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	61 / 39	Prozent

Tabelle 28 zeigt, dass der durchschnittliche Jahresabfluss 22,9 l/s betrug. Hinzuzufügen ist, dass auch Abflussereignisse von über 170 l/s zu verzeichnen waren. Der mittlere Jahresabfluss aus der Fläche von 250 mm (l/m²) lag auf etwa gleicher Höhe wie im TEZG Saxlmühle.

Die durchschnittliche jährliche Phosphor-Fracht betrug 0,552 kg TP/ha. Sie lag damit in etwa auf dem Niveau des Gesamteinzugsgebiets.

Die Zusammensetzung der TP-Frachten bzw. TP-Konzentrationen bestand wie im Gesamteinzugsgebiet und im TEZG Saxlmühle (je 70 % PP) vorwiegend aus partikulärem Phosphor (61 % PP). Die über die gesamte Versuchsperiode (Mai 1999 bis Dezember 2004) gemittelte TP-Konzentration des abgeflommenen Wassers lag bei 0,22 mg TP/l. Auf-

fallend war aber auch die große Spannweite der TP-Konzentrationen an der Messstelle, die sich innerhalb der 90 %-Quantile der 965 gewonnenen Einzelmessungen in einem Rahmen von 0,08 bis 0,55 mg TP/l bewegte und auf Eintragungsspitzen hindeutet.

Niederschläge, Abflüsse, P-Konzentrationen und P-Frachten (Monatsmittelwerte)

Abbildung 27 stellt den monatlichen Niederschlags- und Abflussmengen, die P-Frachten und TP-Konzentrationen für den Messzeitraum Mai 1999 bis Dezember 2004 gegenüber. Die Abbildung zeigt wie auch bei den bisher vorgestellten Einzugsgebieten bei allen genannten Parametern teilweise sehr starke Schwankungen zwischen den einzelnen Monaten. Eine differenzierte statistische Auswertung der oben angeführten Parameter erfolgt in den Tabellen 30 bis 32.

Tab. 29: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Zillendorf in den Monaten (n = 68) des Zeitraums Mai 1999 – Dez. 2004; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat

Parameter	Min	Q _{05%}	Q _{25%}	Median	Mittel	Q _{75%}	Q _{95%}	Max
Niederschlag (mm)	9,5	19,2	39,7	64,8	68,5	84,6	149,6	159,4
Abfluss (mm)	8,9	10,2	13,8	18,7	20,9	23,4	43,9	56,3
TP-Fracht (kg)	3,1	4,9	7,3	10,6	13,3	16,5	28,1	44,9
PP-Fracht (kg)	1,3	2,4	4,6	6,6	8,1	11,5	17,1	27,6
DTP-Fracht (kg)	1,3	2,1	3,1	4,0	5,2	5,9	11,4	22,8
TP-Konzentr. (mg/l)	0,11	0,12	0,16	0,21	0,22	0,28	0,37	0,39

Tabelle 29 zeigt, dass die Mittelwerte der einzelnen Parameter stets über den jeweiligen Medianen lagen. Dies ist ein Indiz für den Einfluss von eingetretenen monatlichen Extremereignissen. Es ist aber im Vergleich mit den beiden vorher dargestellten Teileinzugsgebieten festzuhalten, dass die relativen Abweichungen zwischen Mittelwert und Median wesentlich geringer ausfielen. Dies ist als Indiz einer gleichmäßigeren Streuung der einzelnen Monatswerte um den Mittelwert zu werten und bedeutet, dass Extremereignisse zwar auch in Zillendorf auftraten, deren Abweichungen vom Mittel aber geringer waren als bei den vorgenannten Teileinzugsgebieten.

Aus den statistischen Kenngrößen (Boxplot) von Tabelle 29 kann entnommen werden, dass im Teileinzugsgebiet Zillendorf pro Monat durchschnittlich 18,7 mm (Median) Wasser abgeflossen sind, was im Mittel rund 30 % der gefallen Niederschläge entsprach. Die durchschnittlichen monatlichen Abflussraten schwankten zwischen ca. 9 und 56 mm. Herausragende Extremereignisse mit Monatsmitteln über 40 mm traten im März 2001, im Januar bis März, im November und Dezember 2002 sowie im März 2003 auf. Der Spitzenwert von 56 mm wurde im November 2002 erreicht.

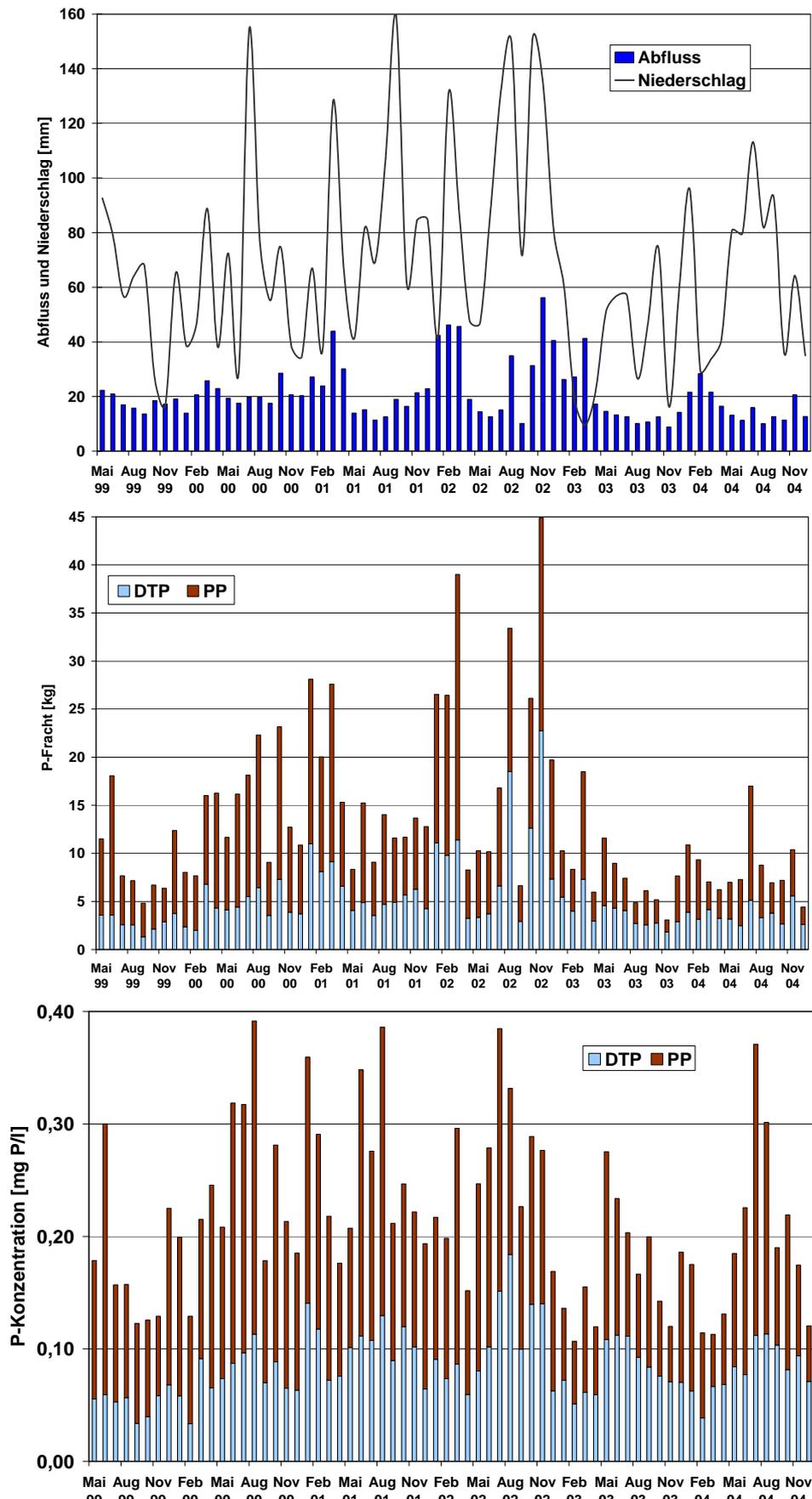


Abb. 27: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teil-einzugsgebiet Zillendorf im Zeitraum Mai 1999 bis Dez. 2004

Der Median der monatlichen TP-Fracht lag bei 10,6 kg. Extreme Monatsfrachten mit Austrägen von über 25 kg TP traten im Januar und März 2001, im Januar bis März 2002, im August 2002 sowie im Oktober und November 2002 auf. Das Maximum von 45 kg TP wurde im November 2002 erreicht. Die Tabelle 29 zeigt, dass einzelne Monate von 18 % (Wert 95 %-Quantile) bis zu 23 % (Maximum) zum durchschnittlichen Jahresabfluss (250 l/m^2) bzw. zu 18 % bis 28 % zur durchschnittlichen jährlichen TP-Fracht (159 kg TP) beitrugen. Der zweithöchste Monatswert von 39 kg TP trat im gleichen Monat (März 2002) wie der absolute Spitzenwert beim TEZG Irlach auf. Interessant sind hierbei zwei Sachverhalte: Zum einen lag in Zillendorf dieser Monatswert um etwa das Dreieinhalbfache über dem dortigen Median, während zum gleichen Datum in Irlach die durchschnittliche Monatsfracht um das Dreiundzwanzigfache überschritten wurde. Zum anderen bestand in Irlach die P-Fracht zu über 70 % aus löslichem Phosphor, in Zillendorf hingegen zu 70 % aus partikulärem Phosphor (PP). Dies ist ein Beispiel dafür, dass Frachten aus Teileinzugsgebieten innerhalb des selben Messzeitraums in Bezug auf den Durchschnitt nicht nur unterschiedlich abweichen, sondern auch in ihrer Zusammensetzung völlig verschieden sein können.

Die mittlere monatliche TP-Konzentration betrug 0,21 mg/l. Sie lag damit auf ähnlicher Höhe wie der Median beim TEZG Saxlmühle (0,17 mg/l). In Zillendorf fielen die oberen Extrema von 0,37-0,39 mg/l (95 %-Quantile bis Maximum) im Vergleich zu Saxlmühle (0,17 mg/l bzw. 0,63-1,17 mg/l) jedoch wesentlich niedriger aus. Dies könnte an dem höheren Waldanteil, dem geringeren Anteil an Ackerflächen sowie der niedrigeren Erosionsgefährdung liegen. Spitzenkonzentrationen im abfließenden Wasser von über 0,30 mg TP/l (Monatsmittel) waren in den Monaten Mai bis August 2000, Januar, Juni und August 2001, Juli und August 2002 sowie Juli und August 2004 zu verzeichnen. Die Monate August 2001/2002 und Juli 2002/2004 lagen über der 95 %-Quantile und sind zumindest teilweise auch im Zusammenhang mit niedrigen Monatabflüssen (Konzentrationseffekt) zu sehen. Generell bestand aber keine Beziehung zwischen der Menge des monatlich abgeflossenen Wasser und dem Monatsmittel der TP-Konzentration (siehe auch Tabelle 31).

Gruppiert man die TP-Frachten nach ihrer Höhe (Tabelle 30), so erkennt man die starken Schwankungsbreiten der monatlichen TP-Austräge, welche im Vergleich des unteren Viertels (6 kg TP) mit dem oberen Viertel (25 TP) sich um den Faktor 4 unterschieden.

Tab. 30: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 68 Monatsmittelwerte

Gruppe P-Fracht	Ø TP-Fracht (kg)	Ø NS (mm)	Ø Abfluss (mm)	Verhältnis PP / DTP	Ø TP-Konz. (mg/l)
unteres Viertel (n = 14)	6,062	49	13,8	1,2	0,158
Mitte (Q_{25%} - Q_{75%}) (n = 28)	11,003	64	18,7	1,6	0,215
oberes Viertel (n = 14)	25,049	97	32,6	1,6	0,285

Aus Tabelle 30 ist ebenfalls der enge Zusammenhang zwischen der Höhe der monatlichen TP-Fracht und der monatlichen Abflussmenge ersichtlich, der auch statistisch für die 68 Monatsmittel (Tabelle 31) abgesichert ($B = 0,69$) werden konnte. Hingewiesen sei aller-

dings, dass sich bei der Auswertung der 965 Einzelmessungen nur ein sehr schwacher genereller Zusammenhang zwischen Abflussmenge und TP-Fracht ableiten ließ. Daraus kann geschlossen werden, dass hohe TP-Monatsfrachten nicht prinzipiell durch hohe monatliche Abflussmengen als solche verursacht worden sind, sondern sich auch weitere Einflüsse auswirkten. Ferner zeigt die Tabelle 30, dass sich niedrige und hohen Phosphorfrachten (ähnlich wie beim TEZG Saxlmühle) kaum in der Zusammensetzung der P-Fraktionen unterschieden, wobei der partikuläre Phosphor stets dominierte.

In Zillendorf kamen hohe monatliche TP-Austrägen („oberes Viertel“) in erster Linie durch hohe monatliche Abflüsse zustande (siehe auch Abbildung 28.). Die TP-Konzentration beeinflusste zwar generell auch die Höhe der TP-Fracht, was durch eine Analyse der 965 Einzelmessungen nachgewiesen werden konnte. In Bezug auf die monatlichen TP-Frachten war sie jedoch im Vergleich zum monatlichen Wasserabfluss aus der Fläche von untergeordneter Bedeutung. So liegt nach Tabelle 31 das Bestimmtheitsmaß für die Korrelation „Abfluss und TP-Fracht“ ($B = 0,69$) deutlich über dem der Beziehung „TP-Konzentration und TP-Fracht“ ($B = 0,31$).

Tab. 31: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben

	Abfluss	P-Frachten (kg)			P-Konzentrationen (mg/l)		
		gesamt TP	parikulär PP	löslich DTP	gesamt TP	parikulär PP	löslich DTP
Niederschlag	0,09 *	0,28 ***	0,23 ***	0,27 ***	0,28 ***	0,18 ***	0,27 ***
Abfluss	-	0,69 ***	0,60 ***	0,63 ***	n.s.	n.s.	n.s.
TP-Fracht	0,69 ***	-	0,92 ***	0,84 ***	0,31 ***	0,24 ***	0,24 ***

n.s.: nicht signifikant; * : $p \leq 0,05$ ** : $p \leq 0,01$ *** : $p \leq 0,001$

Auch die in Tabelle 32 vorgenommene zeitliche Auswertung zeigt, dass das Auftreten sehr hoher Abflussraten häufig mit sehr hohen TP-Frachten gekoppelt war. Die Wahrscheinlichkeit solcher Extrema war in den Monaten Januar bis März besonders hoch, also in Phasen, wo Niederschlägen und Schneeschmelzen gerade bei Ackerflächen nur ein geringer Bedeckungsgrad gegenüber stand. Im Quartal Juli bis September kam es vermehrt zu hohen Niederschlägen, die aber nur selten hohe Abflussraten zur Folge hatten, sondern meist vom Boden und der Vegetation aufgenommen und gespeichert wurden bzw. verdunsteten. Bei geringen Wasserabflüssen von der Fläche ging aber damit gerade in diesem Zeitraum eine erhöhte Wahrscheinlichkeit des Auftretens sehr hoher TP-Konzentrationen einher. So lagen deren Spitzen zu 41 % in diesem Quartal.

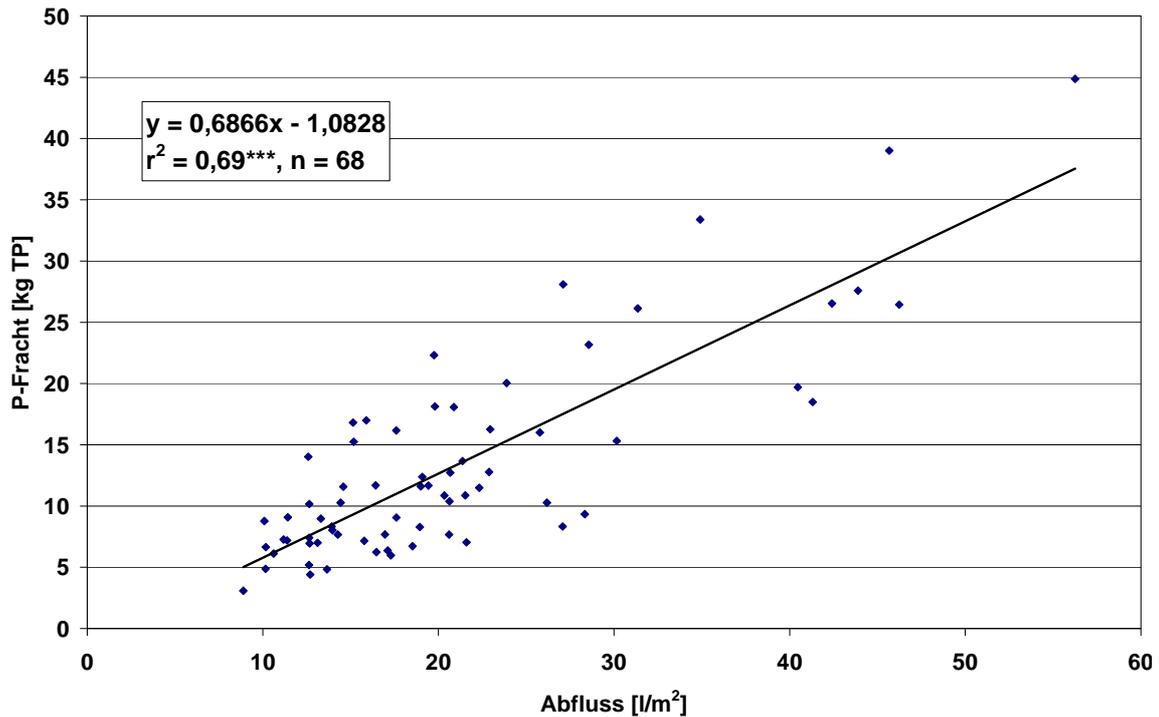


Abb. 28: Beziehung zwischen der monatlichen Abflussmenge und der aus dem TEZG Zillendorf ausgetragenen TP-Fracht

Tab. 32: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) sehr hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)

Quartal	Monate im Quartal		Auftreten sehr hoher Werte (oberes Viertel; n=17 von 68 Monatswerten)							
			Niederschlag		Abfluss		TP-Fracht		TP-Konz.	
	n	%*	n	%	n	%	n	%	n	%
Jan. – März	15	22	5	29	11	65	7	41	3	18
April – Juni	17	25	2	12	1	6	1	6	4	24
Juli - Sept.	18	26	7	41	1	6	5	29	7	41
Okt. – Dez.	18	26	3	18	4	24	4	24	3	18

* in % des Versuchs

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht

Tabelle 33 zeigt eine Abschätzung der Beiträge unterschiedlicher Flächennutzung zur TP-Fracht im Teileinzugsgebiet Zillendorf. Der überwiegende Teil der TP-Fracht stammt aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Diese trägt mit einem Flächenanteil von 61,5 % zu 61 % zur gesamten TP-Fracht bei. Ein nicht unbeträchtlicher Teil von 29 % kann der Siedlungsfläche zugeschrieben werden.

Tab. 33: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Zillendorf

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	177,4	61,5	0,55	97,3	61,0
Wald	84,1	29,2	0,05	4,2	2,6
Siedlung	11,3	3,9	4,14	46,8	29,0
Verkehr	13,5	5,1	0,80	10,81	6,8
Rest	2,2	< 1	-	-	-
Summe (Mittel)	288,5	100	(0,55)	159,1	100

Tabelle 34 stellt eine Quantifizierung der TP-Frachten aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche dar. Es sei an dieser Stelle nochmals hervorgehoben, dass es sich - wie auch in den anderen Einzugsgebieten bei den entsprechenden Tabellen - um eine vorsichtige Schätzung mittels Messergebnissen sowie auch aus der Literatur übernommenen Daten handelt. Für das TEZG Zillendorf zeigt sich, dass für den gesamten TP-Austrag aus der landwirtschaftlichen Fläche der vertikale Austrag (Grundwasser, Zwischenabfluss, Drainagen) und die durch Erosion bedingten TP-Fracht etwa die gleiche Rolle spielten. Der Anteil des Oberflächenabflusses vom Grünland war hingegen unbedeutend.

Tab. 34: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Zillendorf

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (in kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss, Drainagen	45,3	47
Oberflächenabfluss Grünland	4,8	5
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	47,2	48
Summe aus LN	97,3	100

Fazit: Kennzeichnend für das TEZG Zillendorf waren hohe TP-Austräge im Zeitraum Januar bis März. Ursache hierfür waren in erster Linie hohe Abflüsse in diesem Zeitraum. Hohe Phosphorkonzentrationen wurden dagegen gerade im Zeitraum Juli bis September gemessen. Der überwiegende Teil der ausgetragenen TP-Fracht stammte mit 61 % aus der Landwirtschaft. Hier nahmen Erosion (47 %) und vertikaler P-Austrag (Drainagen, Zwischenabfluss und Grundwasser) (45 %) einen etwa gleich großen Anteil ein. So ist künftig für die Minderung des P-Austrages entscheidend, ob und inwieweit durch produktionstechnische Maßnahmen sowohl der vertikale P-Austrag als auch die Erosion gemindert werden können. Ebenfalls kommt einer Reduzierung der P-Frachten aus dem häuslichen Abwasserbereich erhebliche Bedeutung zu.

4.4.5 Teileinzugsgebiet Breitenried

4.4.5.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das ca. 43,5 ha große Teileinzugsgebiets Breitenried ist in der Abbildung 29 dargestellt.

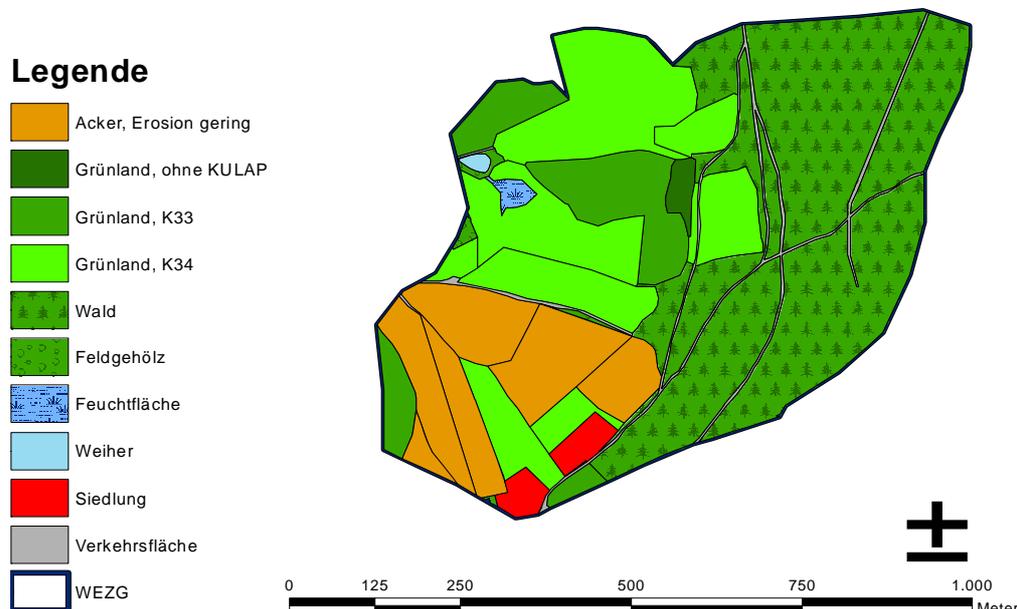


Abb. 29: Teileinzugsgebiets Breitenried mit Flächennutzung

Die Flächen im TEZG Breitenried werden zu 43 % als Wald und zu 36 % als Grünland genutzt (siehe Abbildung 30). Die Grünlandwirtschaft wird überwiegend ohne Einsatz von mineralischer N-Düngung oder schnell löslichen P-Düngern betrieben, was aus der großen Inanspruchnahme der KULAP-Programmpunktes K 34 ersichtlich ist. Der Anteil von K 34-Flächen am gesamten Grünland beträgt 72 %. Nur 2 % der Grünlandflächen haben keine Bewirtschaftungsauflagen durch das bayerische Kulturlandschaftsprogramm. Die vergleichsweise wenigen Ackerflächen (16 %) im Einzugsgebiet unterliegen alle einer geringen Erosionsgefahr. Das Teileinzugsgebiet ist kaum besiedelt, der Anteil der Verkehrsflächen liegt unter 3 %.

Der mittlere Viehbesatz von 1,1 GV/ha ist mit Abstand der niedrigste von allen bisher beschriebenen Einzugsgebieten.

Somit sind Ergebnisse des TEZG Breitenried in Hinblick auf dessen Abflüsse und P-Austräge als ein Beispiel für ein wald- und grünlanddominiertes Gebiet zu interpretieren, in dem die Grünlandwirtschaft vorwiegend extensiv betrieben wird und die Viehhaltung als vergleichsweise extensiv einzustufen ist. Da zudem die Ackerflächen nur eine geringe Erosionsgefährdung aufweisen, ist Breitenried von allen Teileinzugsgebieten das insgesamt am extensiv bewirtschaftetste.

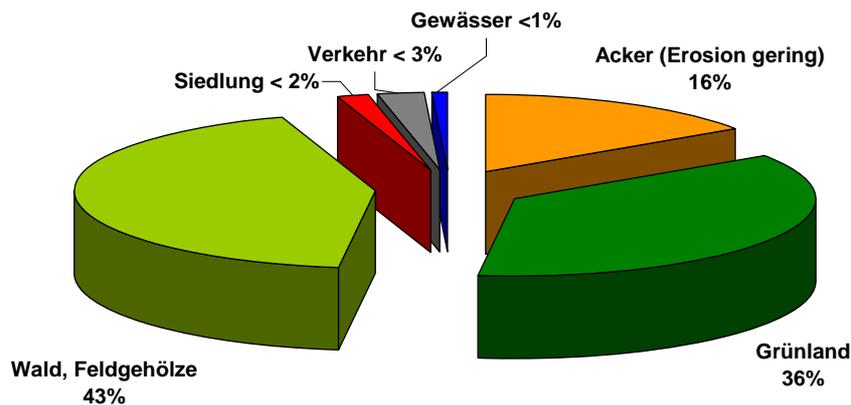


Abb. 30: Flächennutzung des Teileinzugsgebiets Breitenried

4.4.5.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Hinsichtlich des Vergleichs mit den vorher genannten vier (Teil-) Einzugsgebieten ist zu vermerken, dass beim TEZG Breitenried mit 27 Monaten (Oktober 2002 bis Dezember 2004) der kürzeste Untersuchungszeitraum vorlag.

Tab. 35: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im TEZG Breitenried im Zeitraum Oktober 2002 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	43,4 ha
Ø Niederschlag:	733 mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	99.482 m ³ /Jahr * 3,2 l/Sekunde 229 mm/(l/m ²) u. Jahr
Ø TP-Fracht:	8,05 kg/Jahr 0,67 kg/Monat 0,19 kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration (Spannweite der Quantilen 5 %-95 %)	0,08 mg/l (0,03-0,18 mg/l)
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	54 / 46 Prozent

* davon 6500 m³ aus Trinkwasserversorgung

Aus Tabelle 35 kann entnommen werden, dass der durchschnittliche Jahresabfluss 3,2 l/s betrug. Hinzuzufügen ist, dass auch Abflussereignissen mit über 50 l/s auftraten. Der mittlere Jahresabfluss aus der Fläche von 229 mm war der niedrigste aller Einzugsgebiete. Dies lag jedoch vor allem daran, dass innerhalb des vergleichsweise kurzen Messzeitraums sich die Auswirkungen des Trockenjahres 2003 stärker auf das Gesamtergebnis auswirkten als bei den übrigen Einzugsgebieten. Unter Berücksichtigung identischer Untersuchungsperioden wies Breitenried ähnliche mittlere Jahresabflüsse wie die Teilein-

zugsgebiete Saxlmühle oder Zillendorf auf.

Die durchschnittlich jährlich TP-Fracht lag bei 0,19 kg TP/ha. Dies war im Vergleich zu allen anderen Einzugsgebieten die mit Abstand niedrigste Fracht. Die Zusammensetzung der TP-Frachten bzw. TP-Konzentrationen bestand in Breitenried ähnlich wie in fast allen anderen Einzugsgebieten (Ausnahme Irlach) vorwiegend aus partikulärem Phosphor (54 % PP).

Die gemittelte TP-Konzentration des abgeflossenen Wassers lag bei 0,08 mg TP/l und damit etwa demselben Niveau wie beim gleichfalls wald- und grünlandreichen TEZG Irlach (0,11 mg TP/l). Auffallend war aber auch die vergleichsweise wesentlich geringere Spannweite der TP-Konzentrationen an der Messstelle, die - wie Tabelle 35 zeigt - sich innerhalb der 90 %-Quantile der 275 gewonnenen Einzelmessungen in einem Rahmen von 0,03 bis 0,18 mg TP/l bewegte und damit auf vergleichsweise niedrige Eintragungsspitzen hindeutet.

Niederschläge, Abflüsse, P-Konzentrationen und P-Frachten (Monatsmittelwerte)

Abbildung 31 stellt den monatlichen Niederschlags- und Abflussmengen die P-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel) für den Messzeitraum Oktober 2002 bis Dezember 2004 gegenüber. Die Abbildung zeigt bei allen genannten Parametern teilweise starke Schwankungen zwischen den Monaten. In den Tabellen 36 bis 39 werden die angeführten Parameter statistisch näher untersucht.

Tab. 36: Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, durchschnittliche P-Konzentrationen an der Messstelle Breitenried in den Monaten (n = 27) des Zeitraums Okt. 2002 – Dez. 2004; Mittelwerte, Minima, Maxima und Quantilen; Angaben jeweils pro Monat

Parameter	Min	Q _{05%}	Q _{25%}	Median	Mittel	Q _{75%}	Q _{95%}	Max
Niederschlag (mm)	9,5	16,3	33,7	57,0	61,1	81,4	134,7	150,8
Abfluss (mm)	4,9	5,3	6,6	13,5	17,9	25,2	43,5	57,9
TP-Fracht (kg)	0,11	0,13	0,29	0,51	0,67	0,85	1,98	2,30
PP-Fracht (kg)	0,07	0,07	0,13	0,33	0,35	0,54	0,81	0,92
DTP-Fracht (kg)	0,03	0,04	0,07	0,16	0,32	0,53	1,17	1,38
TP-Konzentr. (mg/l)	0,03	0,04	0,06	0,08	0,09	0,11	0,18	0,20

Tabelle 36 zeigt, dass die Mittelwerte der einzelnen Parameter stets über den jeweiligen Medianen lagen. Vor allem trifft das für die Frachten an TP und DTP zu. Dies ist ein Hinweis auf den Einfluss von eingetretenen monatlichen Extremereignissen.

Der mittlere Abfluss pro Monat lag bei durchschnittlich 13,5 mm (Median), was im Mittel knapp 30 % der gefallen Niederschläge entsprach. Die durchschnittlichen monatlichen Abflussraten (mm bzw. l/m²) schwankten zwischen ca. 5 und 58 mm. Herausragende Extremereignisse mit Monatsmitteln über 30 mm traten im November (Maximum) und Dezember 2002 sowie nochmals im Januar und März 2003 auf.

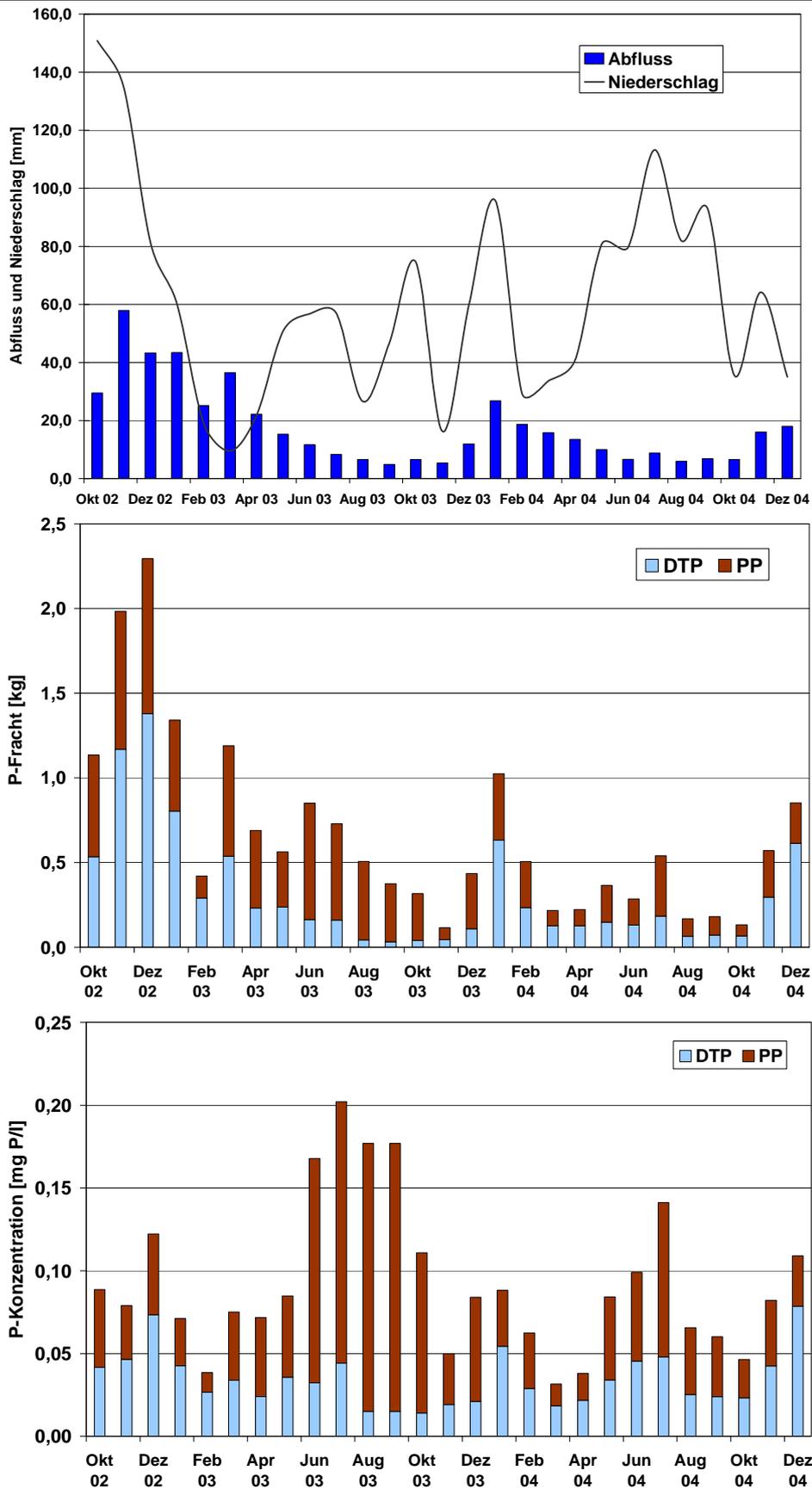


Abb. 31: Monatliche Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten und P-Konzentrationen im Teileinzugsgebiet Breitenried im Zeitraum Oktober 2002 bis Dez. 2004

Der Median der mittleren monatlichen TP-Fracht lag bei 0,51 kg. Extreme Monatsfrachten von über 1,0 kg TP wurden im Zeitraum von Oktober 2002 bis Januar 2003, im März 2003 und im Januar 2004 gemessen. Die höchsten TP-Frachten von 2,0-2,3 kg traten im November und Dezember 2002 auf. Somit trugen einzelne Monate zu 19 % (Wert 95 %-Quantile) bis 25 % (Maximum) zum durchschnittlichen Jahresabfluss (229 l/m^2) bzw. zu 25 % bis 29 % zur durchschnittlichen jährlichen TP-Fracht (8,05 kg TP) bei. Die Spitzenfrachten bestanden ähnlich wie in Irlach vorwiegend aus löslichem Phosphor (DTP).

Die mittlere monatliche TP-Konzentration des abfließenden Wassers betrug 0,08 mg/l. Sie lag damit auf ähnlichem Niveau wie in Irlach. Spitzenkonzentrationen im abfließenden Wasser von deutlich über 0,10 mg TP/l waren im Dezember 2002, im gesamten Zeitraum Juni bis Oktober 2003 und im Juli 2004 zu verzeichnen. Dabei dürften die vergleichsweise hohen Werte im Zeitraum Juni bis Oktober 2003 in Zusammenhang mit den sehr geringen Abflussraten dieses Trockenjahres (Konzentrationseffekt) zu sehen sein. Bemerkenswert war auch der vergleichsweise hohe Anteil an partikulärem Phosphor in diesem Zeitraum.

Gruppiert man die TP-Frachten nach ihrer Höhe (Tabelle 37), so erkennt man die starken Schwankungsbreiten, welche im Vergleich des unteren Viertels (0,19 kg TP) mit dem oberen Viertel (1,40 TP) sich um den Faktor 7 unterschieden. Diese Relation lag in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den anderen Messstellen (Faktoren 4-12) mit Ausnahme des TEZG Irlach (Faktor 24).

Aus Tabelle 37 sowie Abbildung 32 ist der enge Zusammenhang zwischen der Höhe der monatlichen TP-Fracht und der monatlichen Abflussmenge ersichtlich, der auch statistisch für die 27 Monatsmittel (Tabelle 38) gut abgesichert ($B = 0,78$) werden kann. Das bedeutet hohe TP-Frachten wurden in erster Linie durch hohe Abflüsse verursacht, weniger durch sprunghaft ansteigende TP-Konzentrationen. So unterschied sich das obere vom unteren Viertel bei einer siebenmal höheren TP-Fracht um einen vierfach höheren Abfluss, jedoch nur um eine 1,5fach höhere durchschnittliche TP-Konzentration. Eine signifikante Beziehung zwischen TP-Fracht und TP-Konzentration war nicht abzuleiten (siehe Tabelle 38). Es ist ebenfalls erkennbar, dass hohe TP-Frachten (ähnlich wie beim TEZG Irlach) überwiegend aus löslichem Phosphor (DTP) bestanden. Auch Tabelle 38 gibt Aufschluss darüber, dass die Höhe des Abflusses generell wesentlich enger mit der DTP-Fracht ($B = 0,84$) als mit der PP-Fracht ($B = 0,47$) korrelierte.

Tab. 37: Analyse niedriger, mittlerer und hoher P-Frachten nach Gruppierung der 27 Monatsmittelwerte

Gruppe P-Fracht	Ø TP-Fracht (kg)	Ø NS (mm)	Ø Abfluss (mm)	Verhältnis PP / DTP	Ø TP-Konz. (mg/l)
unteres Viertel (n = 7)	0,189	54,4	8,7	1,1	0,056
Mitte (Q_{25%} - Q_{75%}) (n = 13)	0,528	53,9	12,8	2,2	0,114
oberes Viertel (n = 7)	1,403	81,0	35,5	0,7	0,090

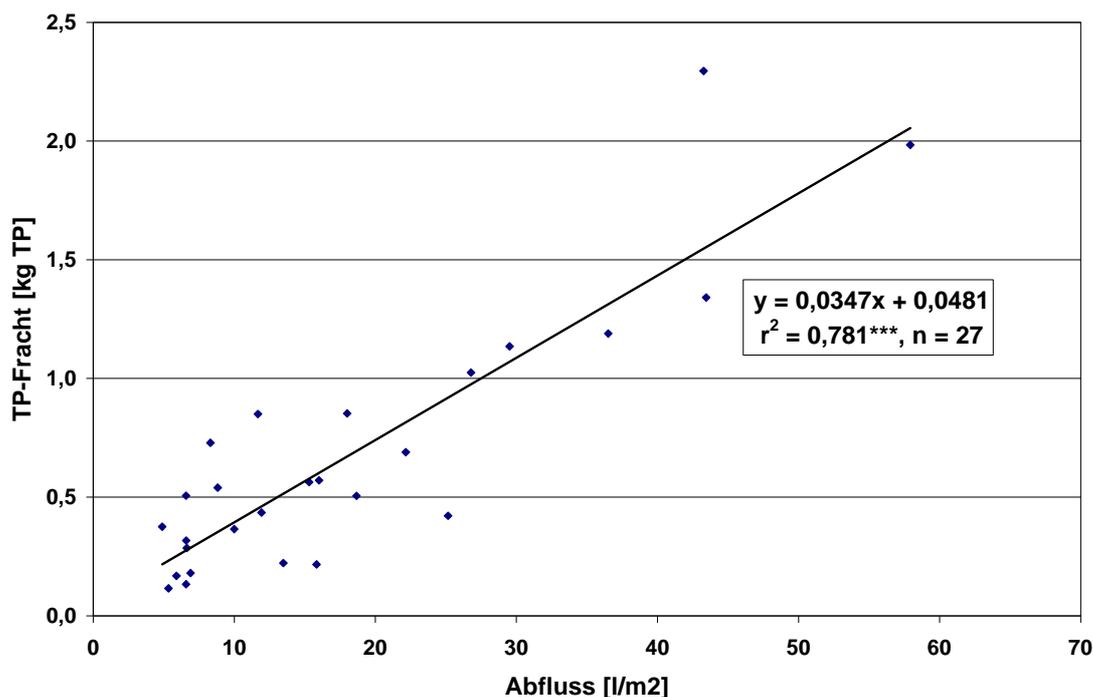


Abb. 32: Beziehung zwischen der monatlichen Abflussmenge und der aus dem TEZG Breitenried ausgetragenen TP-Fracht

Tab. 38: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen den Monatwerten von Niederschlag, Abfluss und TP-Fracht mit denen von Abfluss, P-Frachten und P-Konzentrationen; Werte von $B > 0,5$ sind fett hervorgehoben

	Abfluss	P-Frachten (kg)			P-Konzentrationen (mg/l)		
		gesamt TP	parikulär PP	löslich DTP	gesamt TP	parikulär PP	löslich DTP
Niederschlag	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Abfluss	-	0,78 ***	0,47 ***	0,83 ***	n.s.	n.s.	0,24 **
TP-Fracht	0,78 ***	-	0,80 ***	0,91 ***	n.s.	n.s.	0,44 ***

n.s.: nicht signifikant; * : $p \leq 0,05$ ** : $p \leq 0,01$ *** : $p \leq 0,001$

Die in Tabelle 39 vorgenommene zeitliche Auswertung zeigt ebenfalls, dass das Auftreten überdurchschnittlicher Abflussraten häufig mit überdurchschnittlichen TP-Frachten gekoppelt war. Diese Wahrscheinlichkeit war in den Monaten Oktober bis Dezember leicht erhöht, also in Phasen, in denen Niederschläge zu einer Abschwemmung von spät gegebenem Wirtschaftsdünger führen können. Allerdings sind die dargestellten Ergebnisse – aufgrund des im Vergleich zu den anderen Messstellen sehr eingeschränkten Untersuchungsumfangs – vorsichtig zu interpretieren, da bereits wenige Ereignisse die prozentuale Ver-

teilung stark beeinflussten. Jedoch zeigt die Tabelle 39, dass während der Monate Juli bis September überhaupt keine überdurchschnittlichen Abflussereignisse und im Quartal Januar bis März kaum überdurchschnittliche P-Konzentrationen im Wasser gemessen wurden.

Tab. 39: Zeitliche Analyse (Jahres-Quartale) überdurchschnittlich hoher Niederschläge, Abflüsse, TP-Frachten und TP-Konzentrationen (Monatsmittel)

Quartal	Monate im Quartal		Auftreten hoher Werte (über Median; n=13 von 27 Monatswerten)							
			Niederschlag		Abfluss		TP-Fracht		TP-Konz.	
	n	%*	n	%	n	%	n	%	n	%
Jan. – März	6	22	2	15	6	46	3	23	1	8
April – Juni	6	22	2	15	2	15	3	23	4	31
Juli - Sept.	6	22	3	23	0	0	2	15	4	31
Okt. – Dez.	9	33	6	46	5	38	5	38	4	31

* in % des Versuchs

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht

Tabelle 40 zeigt eine Abschätzung der Beiträge unterschiedlicher Flächennutzung zur TP-Fracht im Teileinzugsgebiet Breitenried. Etwas mehr als die Hälfte der gesamten TP-Fracht stammt aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Diese trägt mit einem Flächenanteil von 52 % zu 54 % zur gesamten TP-Fracht bei. Ein nicht unbeträchtlicher Teil von 24 % der Gesamt-TP-Fracht kann den Siedlungsflächen zugeschrieben werden. Insgesamt gesehen war jedoch sowohl der durchschnittliche hektarbezogene jährliche P-Austrag aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche (0,20 kg/ha) als auch der aus der gesamten Gebietsfläche (0,19 kg/ha) mit weitem Abstand der niedrigste aller Messstellen.

Tab. 40: TP-Fracht in Abhängigkeit von der Flächennutzung im TEZG Breitenried

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	22,53	51,9	0,20	4,41	54,4
Wald	18,69	43,0	0,05	0,86	10,6
Siedlung	0,80	1,8	2,44	1,95	24,1
Verkehr	1,14	2,63	0,77	0,88	10,9
Rest	0,29	0,66	-	-	-
Summe (Mittel)	43,45	100	(0,19)	8,10	100

Tabelle 41 stellt eine Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche dar. Es zeigte sich, dass der TP-Austrag zu etwa zwei Drittel auf den vertikalen Austrag (Grundwasser, Zwischenabfluss, Drainagen) zurückzuführen war, während der Oberflächenabfluss vom Grünland und der erosionsbedingte Oberflächenabfluss auf Ackerflächen nur eine untergeordnete Rolle spielten.

Tab. 41: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Teileinzugsgebiet Breitenried

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (in kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen	3,0	67
Oberflächenabfluss Grünland	0,6	14
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	0,8	18
Summe aus LN	4,4	100

Fazit: Die Ergebnisse des Teileinzugsgebiets Breitenried zeigen, dass sich eine extensive Landnutzung, hier gekennzeichnet durch hohe Wald- und Grünlandanteile sowie niedrige Viehdichten, stark senkend auf die Phosphor-Einträge in Oberflächengewässer auswirken kann. Auch in Breitenried kamen erhöhte TP-Frachten durch hohe Abflussmengen im Winterhalbjahr zustande. Die durchschnittliche TP-Jahresfracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche erreichte mit 0,20 kg TP/ha (0,46 kg P₂O₅/ha) nur rund ein Drittel bis knapp die Hälfte des Niveaus der vier anderen Messstellen.

4.4.6 Gesamteinzugsgebiet Drachensee

4.4.6.1 Flächennutzung und Viehbesatz

Das Einzugsgebiet beträgt 212 km², wobei 120 km² auf deutschem und 92 km² auf tschechischem Gebiet liegen. Es wird zu ca. 55% landwirtschaftlich, zu 40% forstwirtschaftlich und zu ca. 5% als Siedlungs- und Verkehrsfläche genutzt. Auf den Ackerflächen werden vor allem Sommer und Wintergetreide (12%), Mais (5%) und Klee gras (2%) angebaut (siehe Abbildung 33).

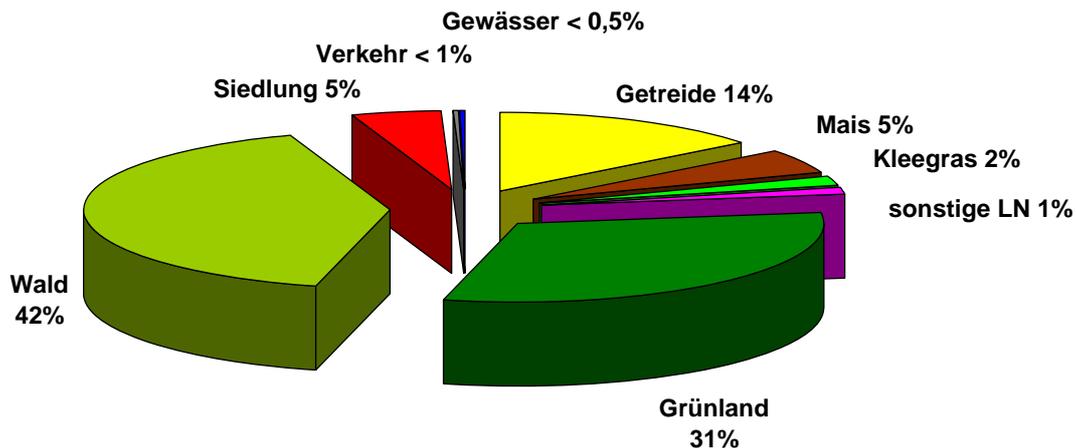


Abb. 33: Flächennutzung des Einzugsgebiets Drachensee (nach JÜRGENS, 2006)

Der durchschnittliche Viehbesatz auf der bayerischen Seite des Einzugsgebiets Drachensee liegt mit ca. 1,7 GV/ha auf dem hohen Niveau vom Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees. Auf der tschechischen Seite liegt der mittlere Viehbesatz bei ca. 0,4 GV/ha. Die vorherrschende Viehhaltung im GEZG ist die Milchviehhaltung.

4.4.6.2 Analyse der P-Frachten

Niederschläge, Abflüsse, P-Frachten, P-Konzentrationen (Jahresmittelwerte)

Der durchschnittliche Zufluss in den Drachensee lag im Mittel des 25monatigen Messzeitraums (12/02 bis 12/04) bei 55,3 Mio. Kubikmeter Wasser pro Jahr (siehe Tabelle 42).

Der gesamte P-Eintrag in den See wird überwiegend (87 %) von der P-Fracht des Flusses Chamb bestimmt. Hinzu kommt ein geringer Anteil aus nach der Messstelle einmündenden Pfaden (Dangelsbach, Zuleitung Kläranlage Eschelkamb). Der jährliche TP-Eintrag in den Drachensee betrug im Messzeitraum 9,95 t. Das entspricht in etwa der Obergrenze der von SEYBOLD UND HEYN (2001) abgeschätzten Spannweite von 7,0-9,5 t/Jahr. Der Anteil an löslichem Phosphor (DTP) lag mit 38 % über dem Mittel des Eixendorfer Einzugsgebiets (30 %).

Die mittlere TP-Konzentration im Seezufluss entsprach mit 0,18 mg TP/l etwa der TP-Konzentration des in den Eixendorfer Stausee abfließenden Wassers (0,17 mg TP/l) sowie dem bei SEYBOLD UND HEYN (2001) für den Drachensee veranschlagten Wert (0,19 mg TP/l). Damit wird der von den genannten Autoren vermutete polytrophe Gewässerzustand (> 0,08 mg TP/l) des künftigen Drachensees bestätigt. Für eine mesotrophe Gewässergüte mit nur geringer Algenbildung müsste die Nährstoffkonzentration unter 0,03 mg TP/l liegen.

Tab. 42: Einzugsgebietsgröße, mittlere Niederschläge, Abflüsse, TP-Fracht, TP-Konzentration und Verhältnis der P-Fractionen im Einzugsgebiet Drachensee im Zeitraum Dezember 2002 bis Dezember 2004

Größe des Einzugsgebiets:	21.261 ha
Ø Niederschlag:	655 mm (l)/Jahr
Ø Jahresabfluss:	55.299.639 m ³ /Jahr * 1,8 l/Sekunde 261 mm/(l/m ²) u. Jahr
Ø TP-Fracht:	9.950 kg/Jahr** 829 kg/Monat 0,47 kg /Hektar und Jahr
Ø TP-Konzentration	0,18 mg/l
Anteil P_{partikulär} (PP) und P_{löslich} (DTP) am Gesamt-P (TP)	62 / 38 Prozent

* Chamb, Danglsbach und Kläranlage Eschelkamb

** davon 8.650 kg TP Chamb, 500 kg TP Danglsbach, 800 kg TP Kläranlage Eschelkamb

P-Frachten, Abflüsse, und P-Konzentrationen (Monatsmittelwerte)

Im Gegensatz zu den anderen (Teil-) Einzugsgebieten wird beim Drachensee auf eine detaillierte graphische und statistische Auswertung der Monatsmittelwerte verzichtet. Als Gründe hierfür werden der vergleichsweise kurze Messzeitraum von nur 24 Monaten genannt, in dem zudem auch die Methodik der Probenahme umgestellt wurde (Ort der Probenahme und Umstellung von zeitgesteuerter auf abflussgesteuerte Probenahme). Hinzu kommt, dass der Wasserabfluss und die P-Fracht nicht nur aus dem Fluss Chamb, an dem die Messstelle stand, alleine stammen. Jedoch sollen kurz wesentliche Charakteristika herausgestellt werden:

Die monatlichen Abflussmengen, TP-Frachten und TP-Konzentrationen schwankten wie bei allen anderen Einzugsgebieten auch zwischen den einzelnen Monaten in weiten Grenzen. In der Tendenz bestätigte sich jedoch auch für den Chamb, dass hohe P-Frachten oft auf hohe Abflussraten in den Wintermonaten zurückzuführen waren. Bei einer durchschnittlichen monatlichen TP-Fracht aller Eintragspfade von 0,83 t wurden im Chamb TP-Frachten von deutlich über 1,0 t in den Monaten Dezember 2002 (2,02 t), Januar (1,43 t), März (1,69 t) und Juni (1,14 t) 2003 sowie im Januar 2004 (1,35 t) gemessen.

Die Abflüsse im Dezember 2002 (52 l/m²) und Januar 2003 (63 l/m²) im März 2003 (40 l/m²) und im Januar 2004 (47 l/m²) überstiegen das gesamte Monatsmittel von 22 l/m² bei weitem.

Während die durchschnittliche TP-Konzentration des aus allen Eintragspfaden abfließenden Wassers im Mittel des Messzeitraums 0,18 mg TP/l betrug (siehe Tabelle 42), kam es im Chamb in den Monaten Mai bis September des trockenen Sommers 2003 zu Spitzenwerten der mittleren monatlichen TP-Konzentrationen in einem Bereich von 0,31 bis 0,47 mg TP/l.

Herkunftsbereiche der mittleren jährlichen TP-Fracht

Die jährliche TP-Fracht von 0,47 kg TP (Tabellen 42 und 43) pro Hektar Gesamtfläche liegt auf ähnlichem Niveau wie beim Eixendorfer Stausee (0,52 kg TP/ha und Jahr). Diese Zahl widerlegt somit eine erste Gesamteinschätzung der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP) im Jahr 2001. Hier wurde von einer gegenüber dem Eixendorfer See höheren Nährstoffbelastung des Drachensees (0,7-0,8 kg TP/ha und Jahr; im Falle deutlicher Extensivierung 0,5-0,6 kg TP/ha und Jahr) aus diffusen Einträgen ausgegangen. Die Ergebnisse bestätigen aber dennoch das damalige Fazit der LBP für den Drachensee, dass mit großer Wahrscheinlichkeit „eine hinreichend gute Seequalität, d.h. eine relativ günstige Badewasserqualität nicht dauerhaft erreicht werden“ kann.

Die hektarbezogene TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche war beim Einzugsgebiet Drachensee (0,40 kg TP/ha und Jahr) niedriger als beim Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees (0,56 kg TP/ha und Jahr). Die Ursache hierfür ist im höheren Grünlandanteil (59 % statt 49 %) sowie in der generell extensiveren Landbewirtschaftung (ca. 43 % der LN liegen in Tschechien) zu sehen. Mit einem Anteil von ca. 45 % fiel der Anteil des Eintragspfades „Siedlung“ an der Gesamt-TP-Fracht in den Drachensee höher aus als beim Eixendorfer Stausee, wo dieser Pfad 39 % des gesamten P-Eintrags ausmachte. Bei einem Anteil der Siedlungsfläche von 5 % erreichte der daraus stammende TP-Eintrag in den Drachensee die gleiche Größenordnung wie die TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (ca. 47 %), die jedoch 54 % der Gesamtgebietsfläche ausmachte.

Tab. 43: TP-Fracht in den Drachensee in Abhängigkeit von der Flächennutzung

Flächennutzung	Fläche		Ø TP-Fracht kg/ha u. Jahr	TP-Fracht	
	ha	%		kg/Jahr	%
LN	11595	54	0,40	4664	46,9
Wald	8566	40	0,05	447	4,5
Siedlung	1011	5	4,45	4500	45,2
Verkehr	53	< 1	6,40	339	3,4
Rest	36	< 1	-	-	-
Summe(Mittel)	21261	100	(0,47)	9950	100

Tabelle 44 stellt eine Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche dar. Von den 4664 kg TP, welche aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche jährlich in den Drachensee eingetragen wurden, kann der überwiegende Teil (57 %) der Erosion aus Ackerflächen (57 %) zugeordnet werden. Ca. 38 % kamen über den Eintragspfad aus Grundwasser, Zwischenabfluss (Interflow) und Drainagen. Kaum ins Gewicht fällt der Oberflächenabfluss aus dem Grünland.

Tab. 44: Abschätzung der Herkunftsbereiche der TP-Fracht in den Drachensee aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche

Herkunftsbereiche	TP-Fracht (in kg und Jahr)	Anteil an Gesamtfracht aus LN (%)
Grundwasser, Zwischenabfluss und Drainagen	1776	38
Oberflächenabfluss Grünland	217	5
Rest (v.a. Erosion aus Acker)	2671	57
Summe aus LN	4664	100

Fazit:

Trotz der im Vergleich zum Einzugsgebiet des Eixendorfer Staussees geringeren diffusen P-Belastung aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist für den Drachensee von einer eutrophen/polytrophen Nährstoffbelastung auszugehen, welche eine befriedigende Gewässerqualität bislang unwahrscheinlich macht.

Entscheidende Verbesserungsmöglichkeiten liegen in einer Verbesserung der Abwassersituation des Siedlungsbereiches und in einer bezüglich des Gewässerschutzes Optimierung der landwirtschaftlichen Produktionstechnik, speziell in erosionsmindernden Maßnahmen im Ackerbau auf problematischen Flächen.

4.5 Schöpfproben

4.5.1 Siedlungseinfluss auf die P-Konzentration in Fließgewässern

Fluss Schwarzach

Am Fluss Schwarzach, welcher das aus dem Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees kommende Wasser in den Stausee abführt, wurde untersucht, ob und inwieweit sich im Falle des Vorhandenseins einer kommunalen Kläranlagen die P-Konzentrationen entlang der Fließstrecke verändern. Hierzu wurden im Zeitraum Mai 1999 bis Januar 2005 sowohl am Ablauf des Perlsees vor der Kläranlage Waldmünchen als auch an der Schwarzach nach dem Ort Waldmünchen Schöpfproben genommen und die jeweiligen TP-Konzentrationen sowie die P-Fractionen analysiert. Die zeitlichen TP-Verläufe sind in Abbildung 34 dargestellt. Die vor der Kläranlage gemessenen Werte zeigten sowohl einen wesentlich konstanteren Verlauf als auch ein insgesamt deutlich niedrigeres Niveau als die TP-Konzentrationen, welche einige Kilometer weiter an der Schwarzach nach dem Ort Waldmünchen (kommunale Kläranlage) erreicht wurden. Gerade hier fällt die enorme zeitliche Variabilität der Einzelwerte auf.

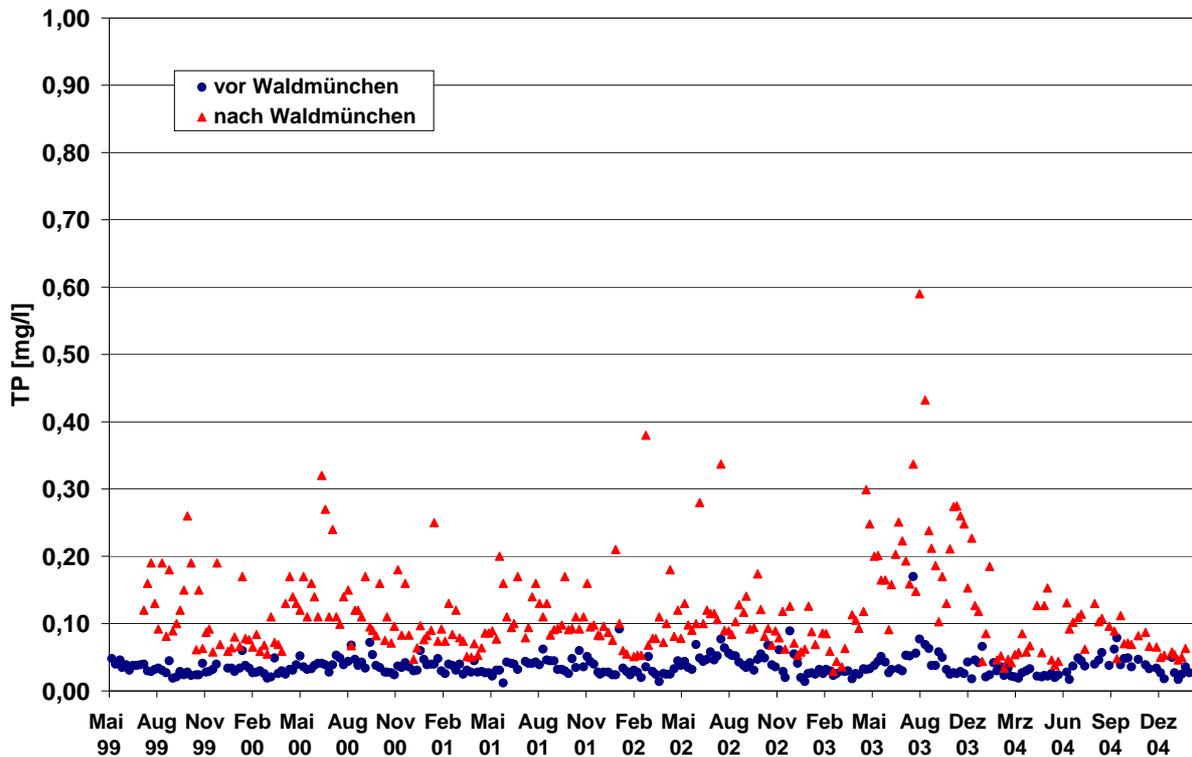


Abb. 34: Verlauf der TP-Konzentrationen an der Schwarzach vor und nach der Kläranlage Waldmünchen

Im Mittel wurde nach dem Ort Waldmünchen eine um mehr als dreifach höhere TP-Konzentration als vor dem Ort erreicht (siehe Tabelle 45). Dabei stieg die Konzentration von löslichem Phosphor (DTP) um das Vierfache, die Konzentration von partikulärem Phosphor nur um das 2,4-fache an.

Tab. 45: Mittelwerte der P-Konzentrationen (gesamt, löslich, partikulär) an der Schwarzach vor und nach der Kläranlage Waldmünchen

Ort der Probenahme	n	TP (mg/l)	DTP (mg/l)	PP (mg/l)	DTP/TP (%)
vor Waldmünchen	286	0,037	0,015	0,023	40
nach Waldmünchen	273	0,116	0,060	0,055	52

Bach in Zillendorf

Ein weiteres Beispiel für den Siedlungseinfluss ist die Messreihe an einem kleinen Bach im Teileinzugsgebiet Zillendorf im Zeitraum März 2003 bis Februar 2005. Auch hier wurden Schöpfproben in einem engen zeitlichen Abstand vor und nach der Siedlung genommen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu bemerken, dass hier naturgemäß die Wassermengen wesentlich geringer als bei der Schwarzach waren und dass die Häuser in Zillendorf nicht an eine kommunale zentrale Kläranlage angeschlossen sind, sondern i.d.R. Hauskläranlagen (Dreikammergruben) besitzen.

Die Messergebnisse zeigten (siehe Abbildung 35) sehr niedrige und vergleichsweise konstante Werte des Bachwassers vor der Siedlung. Die Werte nach der Siedlung waren deutlich höher und wiesen eine große zeitlicher Variabilität auf.

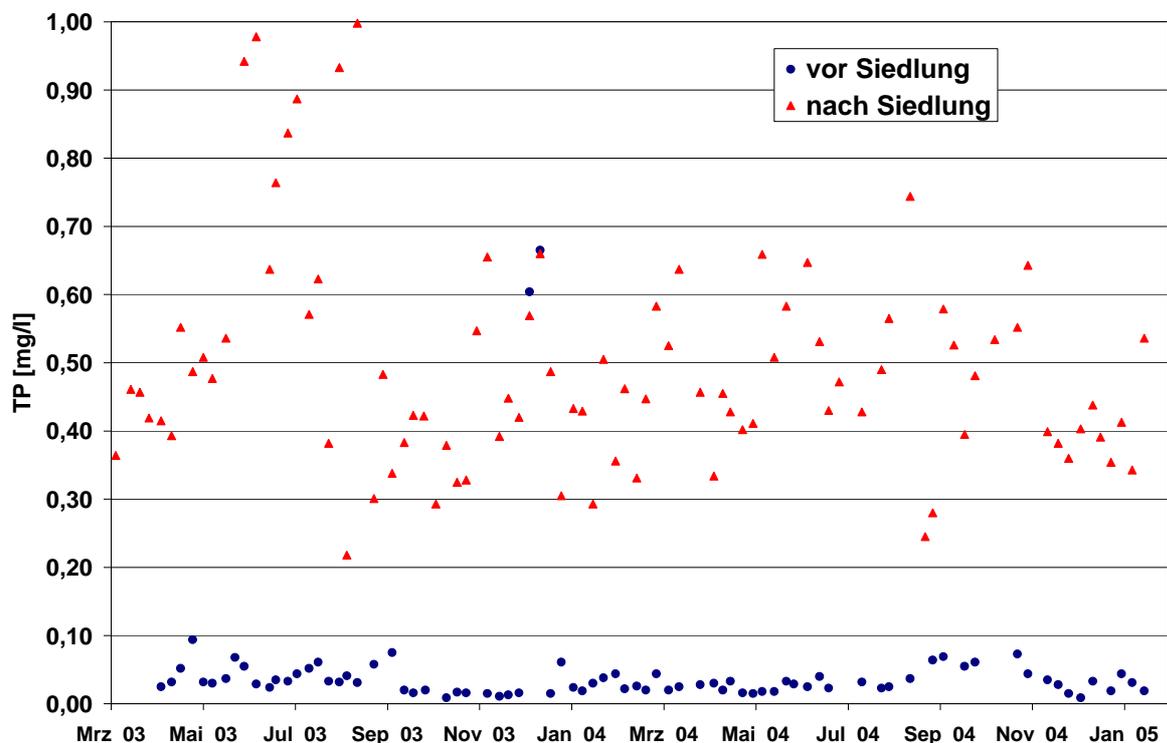


Abb. 35: Verlauf der TP-Konzentrationen vor und nach der Siedlung Zillendorf

In Tabelle 46 sind die arithmetischen Mittelwerte der TP-, DTP- und PP-Konzentrationen zusammengestellt. Nach der Siedlung war die mittlere TP-Konzentration um mehr als das 10fache höher als vor der Siedlung. Die durchschnittliche Konzentration an löslichem Phosphor (DTP) nahm ca. um das 22fache, die an partikulärem Phosphor (PP) hingegen nur um das 3,7-fache zu. Während vor der Siedlung die lösliche P-Fraktion 38 % am TP betrug, lag ihr Anteil nach der Siedlung bei 80 %. Der Anstieg der TP-Konzentration war demnach auch am Zillendorfer Bach wie bei der Schwarzach vor allem auf die Zunahme an löslichem Phosphor aus dem Siedlungsabwasser zurückzuführen.

Tab. 46: Mittelwerte der P-Konzentrationen (gesamt, löslich, partikulär) am Bach vor und nach der Siedlung Zillendorf

Ort der Probenahme	n	TP (mg/l)	DTP (mg/l)	PP (mg/l)	DTP/TP (%)
vor Siedlung	79	0,048	0,018	0,029	38
nach Siedlung	86	0,503	0,400	0,103	80

Fazit: Mittels zweier Beispiele konnte nachgewiesen werden, dass nach der Siedlung (Kläranlage) die Konzentrationen an Gesamt-P (TP) deutlich ansteigen können, außerdem nimmt der Anteil an löslichem (DTP) Phosphor wesentlich mehr als der Anteil an partikulärem Phosphor (PP) zu. Diese Effekt wirkten sich in den zwei dargestellten Beispielen bei dem kleinen Fließgewässer (höherer Beitrag des Abwassers am Abfluss) stärker als bei dem größeren aus.

4.5.2 Einfluss der Entnahmestelle auf die P-Konzentration in Fließgewässern

Fließgewässer führen naturgemäß Sedimentfrachten mit sich, die sich in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit und den topographischen Verhältnissen des Flussufers (Biegungen) in unterschiedlichem Maße transportiert werden können. Demnach wäre es möglich, dass mit einem höheren Sedimentanteil in der Außenkurve eines Fließgewässers auch die dort gemessene Phosphorkonzentration im Wasser gegenüber der anderen Flussseite zunimmt.

Zur Klärung dieser Frage wurden am Chamb in einer von Januar bis November 2004 dauernden Messreihe sowohl direkt neben dem an der Innenkurve (rechte Flussseite) stationär eingerichteten automatischen Probenehmer als auch auf der gegenüberliegenden Außenkurve (linke Flussseite) Schöpfproben genommen und die üblichen P-Fractionen bestimmt.

Abbildung 36 zeigt, dass bei den gemessenen TP-Konzentration zwar für alle Entnahmestellen eine hohe zeitliche Variabilität zu verzeichnen war, jedoch meist keine oder nur geringfügige Unterschiede bezüglich der Probenahmestelle selbst (Schöpfproben auf linker und rechter Flussseite, automatischer Probenehmer) auftraten.

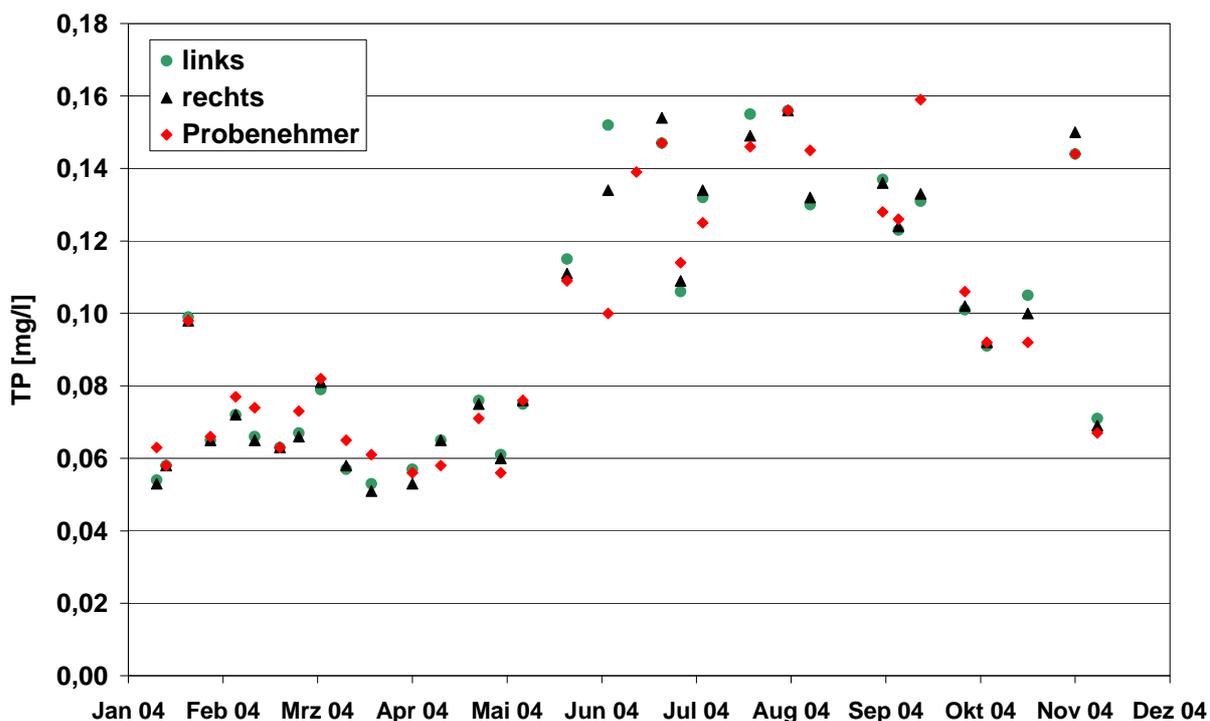


Abb. 36: Verlauf der TP-Konzentrationen bei Schöpfproben an der Oberfläche des linken und rechten Ufers des Flusses Chamb sowie bei Wasserproben deutlich unter der Oberfläche mittels des automatischen Probenehmers

Die in Tabelle 47 aufgeführten Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung zeigen keinen signifikanten Effekt des Ortes der Probenahme, wohl aber einen sehr hoch signifikanten Effekt des Zeitpunktes der Probenahme auf die Schwankungen der TP-Konzentration. Als Zwischenfazit kann gefolgert werden, dass im Falle des an der Messstelle langsam strömenden Champs die Seite des Flussufers auf die mittlere Höhe der gemessenen TP-Konzentration keinen Einfluss hatte.

Tab. 47: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme auf die der TP-Konzentration am Fluss Chamb

Faktor	n	TP-Mittel (mg/l)	Einfluss Pr > F *
Datum Probenahme	96	0,095	< 0,0001 ***
Ort Probenahme (links, rechts, Probenehmer)			0,9371 n.s.

* Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit und Signifikanzniveau

n.s.: nicht signifikant; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ (sehr hoch signifikant)

Wohl aber hatte der Ort der Probenahme einen statistisch gesicherten Einfluss auf die Höhe der gemessenen Konzentrationen an löslichem Phosphor (DTP) und – daraus resultierend – auf die Höhe der errechneten partikulären P-Konzentrationen (PP). Dies wird anhand der in Tabelle 48 zusammengefassten Ergebnisse ersichtlich. Daraus geht hervor, dass zwar zwischen den Schöpfproben der beiden Flussseiten keine Unterschiede zwischen den mittleren DTP- bzw. PP-Konzentrationen festgestellt werden konnten, jedoch

zwischen Schöpfproben und automatischem Probenehmer Unterschiede auftraten. Hier wurden – bei gleicher TP-Konzentration – geringfügig niedrigere Gehalte an löslichem Phosphor bzw. um etwa 13-16 % höhere Gehalte an partikulärem Phosphor ermittelt.

Tab. 48: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme auf die DTP-Konzentration am Fluss Chamb

Faktor	n	DTP-Mittel PP-Mittel (mg/l)	Einfluss Pr > F *
Datum Probenahme	96	0,056	< 0,0001 ***
Ort Probenahme		0,039	< 0,0001 ***
Schöpfprobe, linke Flusseite	32	0,058 a 0,038	
Schöpfprobe, rechte Flusseite	32	0,058 a 0,037	
autom. Probenehmer (rechte Flusseite)	32	0,052 b 0,043	

* Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit und Signifikanzniveau;
unterschiedliche Kleinbuchstaben bedeuten signifikante Mittelwertsunterschiede
n.s.: nicht signifikant; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ (sehr hoch signifikant)

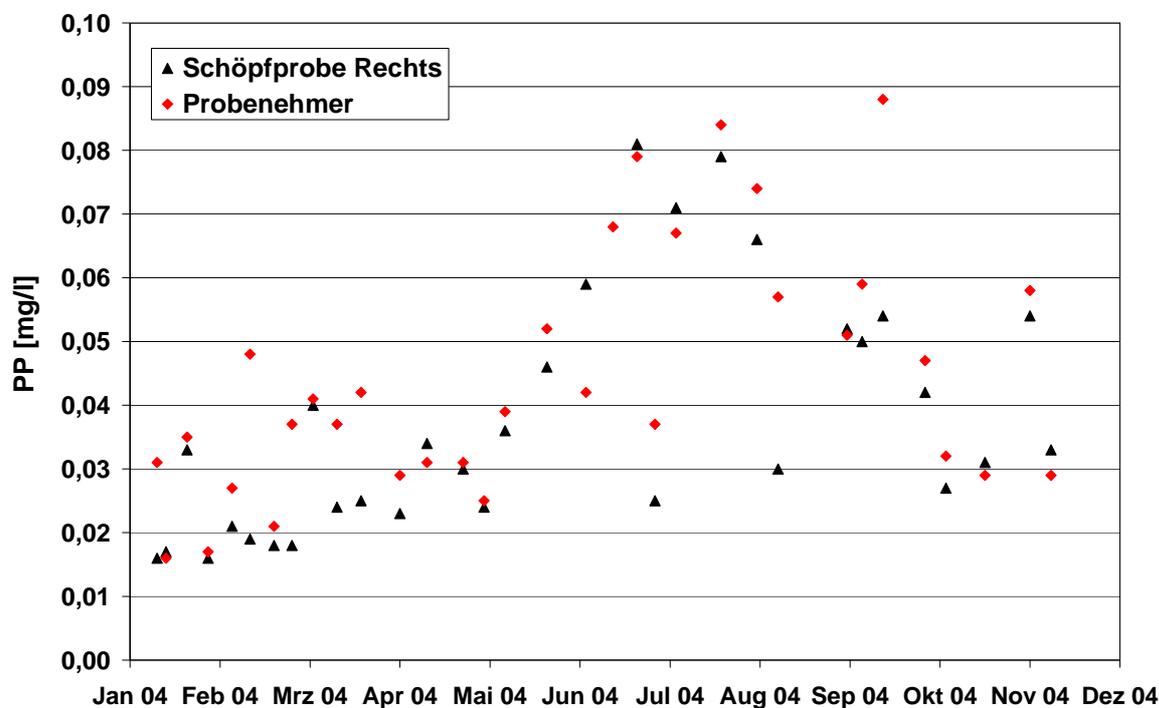


Abb. 37: Verlauf der Konzentrationen von partikulärem Phosphor am Fluss Chamb bei Schöpfproben an der Oberfläche des rechten Ufers sowie bei Wasserproben deutlich unter der Oberfläche mittels eines automatischem Probenehmers

In Abbildung 37 ist der Verlauf der PP-Konzentrationen für die rechte Schöpfprobenstelle und den automatischen Probennehmer dargestellt. Eine Erklärung für den geringfügig höheren Mittelwert an partikulärem Phosphor bei der automatischen Probenahme ist, dass hier die Wasserentnahme (Ansaugschlauch) tiefer als bei den Schöpfproben erfolgte und demnach etwas mehr P-haltige Schwebstoffe aufgefangen wurden.

4.5.3 Einfluss der Probenahmetiefe auf die P-Konzentration in Fließgewässern

Im Folgenden soll die Frage beantwortet werden, inwieweit sich die Beprobungstiefe generell auf das Messergebnis einer Wasserprobe auswirken kann bzw. ob sich – wie beim Chamb – bei langsam fließenden Gewässern in unterschiedlichen Wassertiefen die Konzentration an Schwebstoffen und dadurch die P-Konzentration merklich ändern.

Zu diesem Zweck wurde eigens eine Beprobungsvorrichtung konstruiert und am Flussufer stationär befestigt. Mittels eines in die Flussmitte schwenkbaren Armes, wurden zu 25 Terminen im Zeitraum März bis November 2004 Wasserproben zeitgleich aus 20 cm, 40 cm und 60 cm über dem Flussgrund entnommen (abgesaugt) und im Labor analysiert. Als Vergleich dieser Messungen dienten Schöpfproben, die in der Nähe am rechten Flussufer (Innenkurve) direkt an der Oberfläche genommen wurden.

Tab. 49: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss von Beprobungsdatum und dem Ort der Probenahme (hier: Messungen in der Flussmitte bei unterschiedlicher Höhe über Grund und am rechten Ufer) auf die TP- bzw. DTP-Konzentration im Chamb

Faktor	n	TP-Mittel DTP-Mittel (mg/l)	Einfluss Pr > F *
Datum Probenahme	99	0,100 0,056	< 0,0001 *** < 0,0001 ***
Ort Probenahme (Tiefen, Schöpfprobe)			0,0044 ** < 0,001 ***
Flussmitte 20 cm über Grund	25	0,098 b 0,052 b	
Flussmitte 40 cm über Grund	25	0,100 ba 0,055 b	
Flussmitte 60 cm über Grund	25	0,100 ba 0,054 b	
Schöpfprobe, rechtes Flussufer	24	0,104 a 0,062 a	

* Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit und Signifikanzniveau; unterschiedliche Kleinbuchstaben bedeuten signifikante Mittelwertsunterschiede (hier getrennte Mittelwertsvergleiche für TP und DTP)
n.s.: nicht signifikant; * $p \leq 0,05$ (signifikant); ** $p \leq 0,01$ (hoch sign.); *** $p \leq 0,001$ (sehr hoch sign.)

Die Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung und die Mittelwerte sind in Tabelle 49 dargestellt. Sie lassen als entscheidende Aussage zu, dass bei einer Probenahme deutlich unter der Oberfläche (im Gegensatz zu an der Wasseroberfläche entnommenen Schöpfproben) die Beprobungstiefe in weiten Grenzen (20-60 cm) keinen Einfluss auf die gemessenen P-Konzentrationen (TP, DTP, PP) hatte. Daraus wiederum kann gefolgert werden, dass es beim Chamb keinen horizontalen Gradienten der Schwebstoffdichte innerhalb des gewählten Messbereiches gab.

Ein Vergleich dieser in der Flussmitte genommenen Wasserproben mit zeitgleich genommenen Schöpfproben am rechten Flussufer wies im Mittel signifikant höhere TP- und DTP-Konzentrationen bzw. niedrigere PP-Konzentrationen bei den Schöpfproben auf. Jedoch sind diese Unterschiede zwischen der tiefen (Flussmitte) und der oberflächlichen-nahen (Schöpfprobe Nähe Flussufer) Technik der Probenahme mit relativen Abweichungen von 4-6 % bei TP, 13-19 % bei DTP bzw. bei 7-9 % bei PP als gering zu bezeichnen, gerade wenn man im Vergleich dazu die hohe zeitliche Variabilität der P-Konzentrationen im Wasser berücksichtigt.

Fazit: Bei langsam strömenden Fließgewässern dürften vom Ort der Probenahme (Flussseite, Flussmitte) und von der Probenahmetiefe nur geringe Effekte auf die gemessene TP-Konzentration ausgehen. Im Gegensatz dazu spielt der Zeitpunkt der Probenahme eine große Rolle.

4.6 Berechnungsversuche über Drainagen

Bei der in den Versuchen gewählten Beregnungsintensität (15-20 l/h) und -menge (30 l/m²) betrug die durchschnittliche Abflussrate 13 % (4,0 l/m²). Trotz der Vorwässerung der Parzellen am Abend vor der eigentlichen künstlichen Beregnung schwankten die Abflüsse am Drän, die P-Konzentrationen und die ausgetragenen P-Frachten selbst bei gleichen Varianten in einem weiten Rahmen. Dies erfordert eine differenzierte Betrachtung. Jedoch kann hinsichtlich der „Güte“ der Versuchsdurchführung festgehalten werden, dass trotz der offensichtlichen Heterogenität der Bodeneigenschaften der Parzellen und der P-Gehalte der Güllegaben (vgl. Tabelle 3 in Kapitel 3.3) bei der Abflussmenge und insbesondere bei der Düngung im Mittel keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei bzw. zwei Varianten bestanden (siehe Tabelle 50 oben). Jedoch weisen die starken Streuungen bei allen erfassten Parametern – ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten (v) und die Spannweite zwischen Minima und Maxima - darauf hin, dass bei derartigen Messreihen eine ausreichende Zahl an Wiederholungen (mindestens ca. 10) zur Absicherung von Aussagen nötig war. Bei der gewählten Versuchsanordnung konnten nach Tabelle 50 (Spalte $Pr > F$) für die mittleren Frachten an Gesamt-Phosphat, an löslichem Phosphat, für das Verhältnis der P-Fractionen sowie für die TP- und DTP-Konzentration überwiegend hochsignifikante Unterschiede zwischen den drei Varianten beobachtet werden.

Um einen ersten optischen Eindruck von den unterschiedlichen (P-)Austrägen zu bekommen, sind in der Abbildung 38 zwei Wasserproben, die während des Versuchs aus den Drainagen entnommen wurden, dargestellt.



Abb. 38: Wasserproben aus Drainagen nach einem simulierten Starkregenereignis (links nach vorausgegangener Gülleapplikation, rechts nach Beregnung ohne vorheriger Gülleausbringung)

4.6.1 P-Frachten

Tabelle 50 zeigt, dass im Mittel aller Versuche nach einem künstlichen „Starkregenereignis“ über die Drainage ohne Gülledüngung 45 g Gesamtphosphor (TP), nach Gülleappli-

kation mit Prallteller 300 g TP und nach flacher Gülle-Injektion 120 g TP pro Hektar ausgetragen wurden. Dabei konnten die Mittel zwischen den beiden Ausbringungstechniken signifikant abgesichert werden.

Tab. 50: P-Frachten und P-Konzentrationen im Drainageabfluss nach künstlich erzeugten Starkregenereignissen

Parameter	Gesamt-Mittel (n = 29)	Effekt Varianten (Pr>F)	Parameter	Varianten		
				ohne Gülle (n = 10)	G-Prall (n = 9)	G-Inj. (n = 10)
Abfluss am Drän (l/m ²)	4,0	0,176 n.s.	Mittel v (%) Min – Max	5,6 a 77 0,9 – 15,8	3,0 a 70 0,3 – 6,0	3,4 a 76 0,8 – 8,8
Düngung (kg TP/ha)	14,2 (n = 19)	0,680 n.s.	Mittel v (%) Min – Max	-	13,9 a 27 10,0 – 19,7	14,6 a 23 10,0 – 19,7
TP-Fracht (g/ha)	150	0,008 **	Mittel v (%) Min – Max	45,4 bc 62 4 – 82	299,8 a 95 42 – 960	120,0 b 72 34 – 317
DTP-Fracht (g/ha)	69	0,028 *	Mittel v (%) Min – Max	34,6 b 68 2 – 72	115,3 a 88 13 – 282	61,6 ab 60 13 – 126
DTP/TP (%)	57	0,0005 ***	Mittel v (%) Min – Max	75 a 23 49 – 95	40 c 40 7 – 57	54 b 32 33 – 93
Konz. TP (mg/l)	5,4	< 0,0001 ***	Mittel v (%) Min – Max	0,85 bc 47 0,49 – 1,81	12,02 a 61 3,0 – 24,2	3,89 b 33 2,1 – 6,0
Konz. DTP (mg/l)	2,1	< 0,0001 ***	Mittel v (%) Min – Max	0,63 c 47 0,25 – 1,20	3,90 a 43 1,5 – 6,1	2,01 b 34 1,1 – 3,4

Erklärungen zur Tabelle

Effekt Varianten (Pr>F): Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von > 0,05 bedeutet definitionsgemäß, dass keine signifikanten Unterschiede (n.s.) zwischen den Varianten vorliegen. Von signifikanten Unterschieden (*) spricht man, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen > 0,01 und 0,05 liegt. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit im Bereich von > 0,001 bis 0,01 wird als hoch signifikant (**) und eine solche von 0,001 und kleiner als sehr hoch signifikant (***) bezeichnet.

Mittelwerte: Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Mittelwertsunterschiede bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%.

v (%): Der Variationskoeffizient (Standardabweichung*100/Mittelwert) erlaubt einen Vergleich der Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert bei verschiedenen Merkmalen, unbeeinflusst von der Art und Größe des Mittelwertes. So zeigt z. B. bei der Variante „G-Prall“ der Vergleich der Variationskoeffizienten zwischen der TP-Fracht (95%) und der TP-Konzentration (61%), dass bei letzterer die Einzelwerte relativ betrachtet wesentlich weniger um den Mittelwert streuten.

Der maximale P-Austrag (siehe Gülle-Prall_{max.}) erreichte einen Wert von knapp einem Kilogramm Gesamt-Phosphor (TP), was 2,2 Kilogramm P₂O₅ pro Hektar entspricht. Selbst bei fehlender Gülleapplikation betrug das Maximum der aus dem Drain - unter optimal mit Phosphor versorgtem (14 mg P₂O₅/100 g; Gehaltsklasse C) Wirtschaftsgrünland

- ausgetragenen Phosphor-Fracht 82 g TP/ha bzw. knapp 0,19 kg P₂O₅ pro Hektar. Bezogen auf die über die Gülle ausgebrachte P-Menge betrug der scheinbare Verlust des Gülle-TP [(Gülle-TP – Null-TP)/Dünge-TP] am Drain 0,5 % bei Schlitztechnik bzw. 1,8 % beim Pralltellerverfahren.

Bemerkenswert ist, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen bereits ohne Düngung im Mittel 8 % bzw. bei Güllendüngung ca. 20 - 50% der gesamten durchschnittlichen jährlichen P-Fracht aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen (0,56 kg TP/ha) des Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees erreicht wurden. Versuchsergebnisse von *Diepolder et al. (2006)* ergaben bei undrainiertem Grünland im Allgäuer Voralpenland einen jährlichen P-Austrag aus dem Wurzelraum in einer Größenordnung von ca. 300-400 g TP bzw. 0,7-0,9 kg P₂O₅ pro Hektar und Jahr. Bezieht man die Extremwerte von Tabelle 50 in die Betrachtung mit ein, so wird die Bedeutung des Zwischenabflusses aus Drainagen - und der damit verbundenen P-Fracht - gerade nach direkt auf Düngungsmaßnahmen folgenden Starkregenereignissen ersichtlich. Es wird deutlich, dass die Art der Technik der Gülleapplikation eine bedeutende Rolle zu spielen scheint. Auch bei fehlender Düngung wurde aber aus dem Boden Phosphor - überwiegend in löslicher Form - ausgetragen.

4.6.2 Beziehungen zwischen den P-Frachten und der Abflussmenge

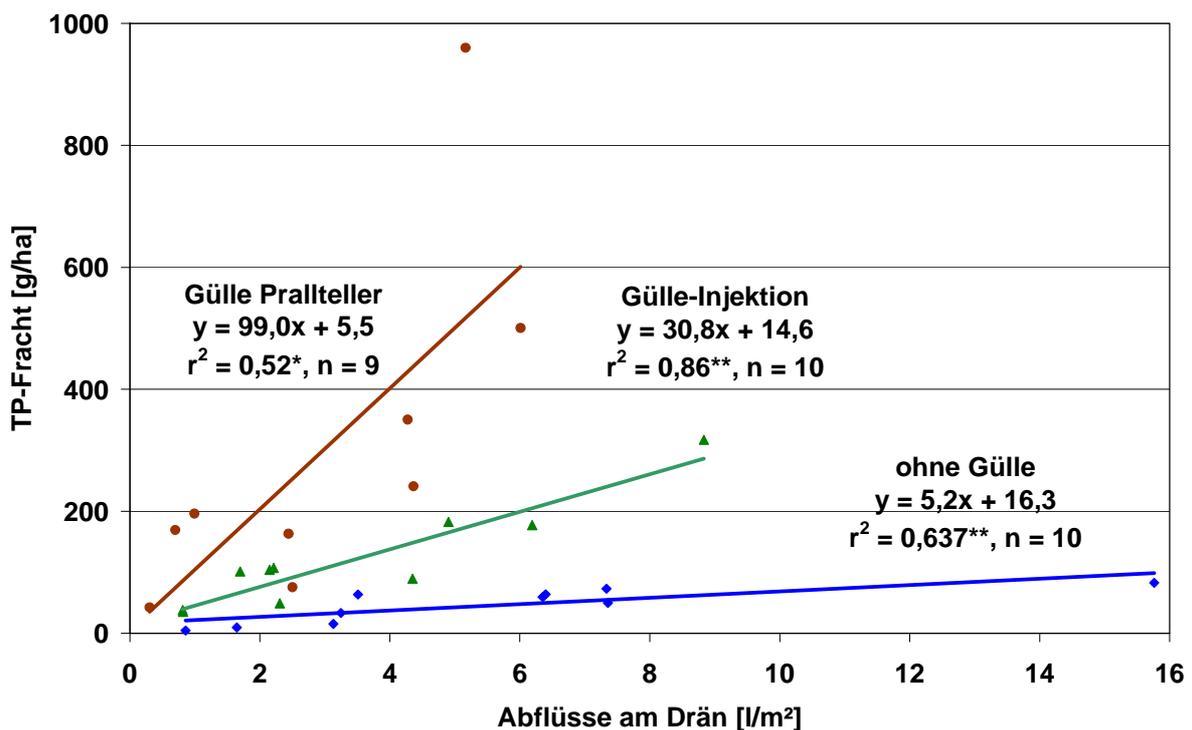


Abb. 39: Beziehungen zwischen Abfluss-Menge und Austrag an Gesamt-Phosphor (TP) bei verschiedenen Düngungsvarianten nach simuliertem Starkregenereignissen

Tab. 51: Beziehung zwischen Abflussmenge am Drän [x (l/m^2) und P-Fracht [y (g/ha TP, DTP)] sowie P-Konzentration [y (mg/l TP, DTP)]

Y	Abflussmenge x der Varianten		
	ohne Gülle (n = 10)	G-Prall (n = 9)	G-Inj. (n = 10)
Fracht TP	$Y = 16,3 + 5,23x$ $r^2 = 0,64$ **	$Y = 5,5 + 99,00 x$ $r^2 = 0,52$ *	$Y=14,6 + 30,77x$ $r^2 = 0,86$ **
Fracht DTP	$Y = 9,0 + 4,61x$ $r^2 = 0,70$ **	$Y = 18,1 + 44,9 x$ $r^2 = 0,84$ ***	$Y=18,8 + 12,47x$ $r^2 = 0,77$ ***
Konz. TP	$r^2 = 0,02$ n.s.	$r^2 = 0,18$ n.s.	$r^2 = 0,20$ n.s.
Konz DTP	$r^2 < 0,01$ n.s.	$r^2 < 0,01$ n.s.	$r^2 = 0,21$ n.s.

Relativ unabhängig von den Varianten schwankten die Abflüsse am Drän wohl aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Porensystems zwischen 0,3 und 16 l/m^2 . Aus Tabelle 51 und Abbildung 39 geht hervor, dass - trotz der starken Streuung - mit steigender Abflussmenge bei allen Varianten eine kontinuierliche und signifikante ($r^2 = 0,52$ bis 0,86) Zunahme der ausgetragenen TP-Frachten und der DTP-Frachten ($r^2 = 0,70$ bis 0,84) zu verzeichnen war. Dabei war der Anstieg der TP-Fracht mit zunehmender Abflussmenge bei breitflächiger Gülleausbringung mit dem Prallteller um den Faktor 19 und bei Gülleinjektion um den Faktor 6 höher als bei der Kontrollvariante (Verlagerung von Boden-TP). Für das gelöste Phosphor (DTP) wurden bei den Güllevarianten ebenfalls signifikante, jedoch deutlich weniger steile Anstiege gemessen (siehe Tabelle 51). Das Verhältnis von „Gülle-Prall“ und „Gülle-Inj.“ zu „Null“ betrug hier ca. 10:1 bzw. 2,7:1. Damit zeichnete sich für beide P-Fractionen eine ähnliche Abstufung zwischen den beiden Gülle-Applikationstechniken zugunsten der Injektion ab.

4.6.3 P-Fractionen

Bei der ungedüngten Kontrollvariante bestand der ausgetragene Phosphor zu 75 % aus der gelösten Fraktion (DTP), während bei der Ausbringung mit dem Prallteller rund 60 % und bei Gülleinjektion rund 50 % der am Drän abgelaufenen P-Fracht aus partikulärem Phosphor bestand (siehe Tabelle 50). Der insgesamt höhere Anteil an partikulärem Phosphor am ausgetragenen Gesamt-P bei den Güllevarianten bzw. der niedrigere Anstieg an DTP im Verhältnis zu TP kann als ein deutlicher Hinweis darauf angesehen werden, dass nur ein geringer Teil des Dünger-P über die Bodenmatrix in die Drainagen gelangt, sondern der Haupt-Eintragspfad direkt über die Makroporen erfolgt. Beispiele für derartige Makroporen sind Regenwurmgänge, abgestorbene Wurzelgänge oder Schrumpfrisse. Gülle-Phosphor, welches breit verteilt auf der Oberfläche liegt (Ausbringung mit Prallteller), scheint nach Starkregenereignissen stärker von der Auswaschung betroffen zu sein als in den Boden injiziertes Phosphor.

4.6.4 P-Konzentrationen

Aus ökologischer Sicht ist neben der P-Fracht auch die Konzentration im Dränwasser entscheidend. Interessanterweise bestand bei keiner Variante eine Beziehung zwischen Konzentration und Abflussmenge ($r^2 = 0,01$ bis $0,21$, siehe Tabelle 51). Dies lässt darauf schließen, dass im Falle hoher anfallender Wassermengen aus den Drainagen nicht zwangsläufig mit niedrigen Nährstoffkonzentrationen („Verdünnungseffekt“) des von der Fläche abfließenden Wassers zu rechnen ist. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus dem Teileinzugsgebiet Irlach (siehe Kapitel 4.4.3).

Zwischen den einzelnen Varianten zeigten sich im Mittel signifikante Unterschiede bei den TP- und DTP-Konzentrationen, wobei auch hier durch die organische Düngung und insbesondere bei der oberflächlichen Ausbringung ein deutlicher Anstieg der P-Konzentrationen gegenüber der Kontrollvariante (Null) zu verzeichnen war. So betragen die P-Konzentrationen im Drainagewasser nach Starkregen bei der Variante ohne vorherige Gülleapplikation im Mittel $0,85$ mg TP/l bzw. $0,63$ mg DTP/l. Diese Werte erhöhten sich bei der flacher Gülleinjektion nur tendenziell auf $3,9$ mg TP/l bzw. $2,0$ mg DTP/l. Sie stiegen jedoch im Falle des konventionellen Pralltellerverfahrens sprunghaft und hoch signifikant absicherbar auf $12,0$ mg TP/l bzw. $3,9$ mg DTP/l an (siehe Tabelle 50). Hingewiesen sei auch auf die großen Streuungen (Minimum bis Maximum) der aufgetretenen P-Konzentrationen bei den Einzelmessungen. Bemerkenswerterweise wies das relative, auf den Mittelwert bezogene Streuungsmaß (Variationskoeffizient) bei der Gülleinjektion den niedrigsten Wert auf.

Bei mehrjährigen Untersuchungen von Saugkerzenanlagen unter Wirtschaftsgrünland im Allgäuer Voralpenland fanden DIEPOLDER ET AL. (2006) unter organisch gedüngten Parzellen durchschnittliche P-Konzentrationen von $0,04$ - $0,06$ mg TP/l im langsam dränenden Bodenwasser. Vergleicht man diese Werte mit den in Tabelle 50 aufgeführten Konzentrationen von ca. 4 - 12 mg TP/l, so liegen die auf drainiertem Grünland gemessenen P-Konzentrationen des Drainagewassers etwa um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher. Folglich stellen Starkregenereignisse, welche unmittelbar auf Güllendüngung folgen, nicht nur wegen der ausgetragenen P-Frachten, sondern auch hinsichtlich der auftretenden P-Konzentrationen im abfließenden Drainagewasser Phosphor-Belastungspitzen für Gewässer dar.

Fazit: Durch die Wahl der Gülleapplikationstechnik (flache Injektion statt oberflächliche Ausbringung mit Prallteller) konnten die TP-Austräge aus Drainagen im Mittel um ca. 60 % reduziert werden. Die dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die flache Gülleinjektion im Bereich von Gewässern mit einem hohen Anteil an drainierten Grünlandflächen eine Möglichkeit bietet, P-Einträge und P-Konzentrationen zu senken.

4.7 Berechnungsversuche zur Wirkung ungedüngter 5m-Randstreifen bei hängigen Grünlandflächen

4.7.1 Mittelwertvergleiche

Das wichtigste Resultat aus diesem Teilprojekt ist in Abbildung 40 dargestellt. Daraus geht deutlich hervor, dass bei Gülleddüngung der (mittlere) P-Austrag von der Fläche bei Variante 2 (ohne Randstreifen) erheblich über dem von Variante 3 (mit 5 m-Randstreifen) lag. Dieser Unterschied war – absolut gesehen - umso höher, je mehr nach Abflussbeginn berechnet wurde.

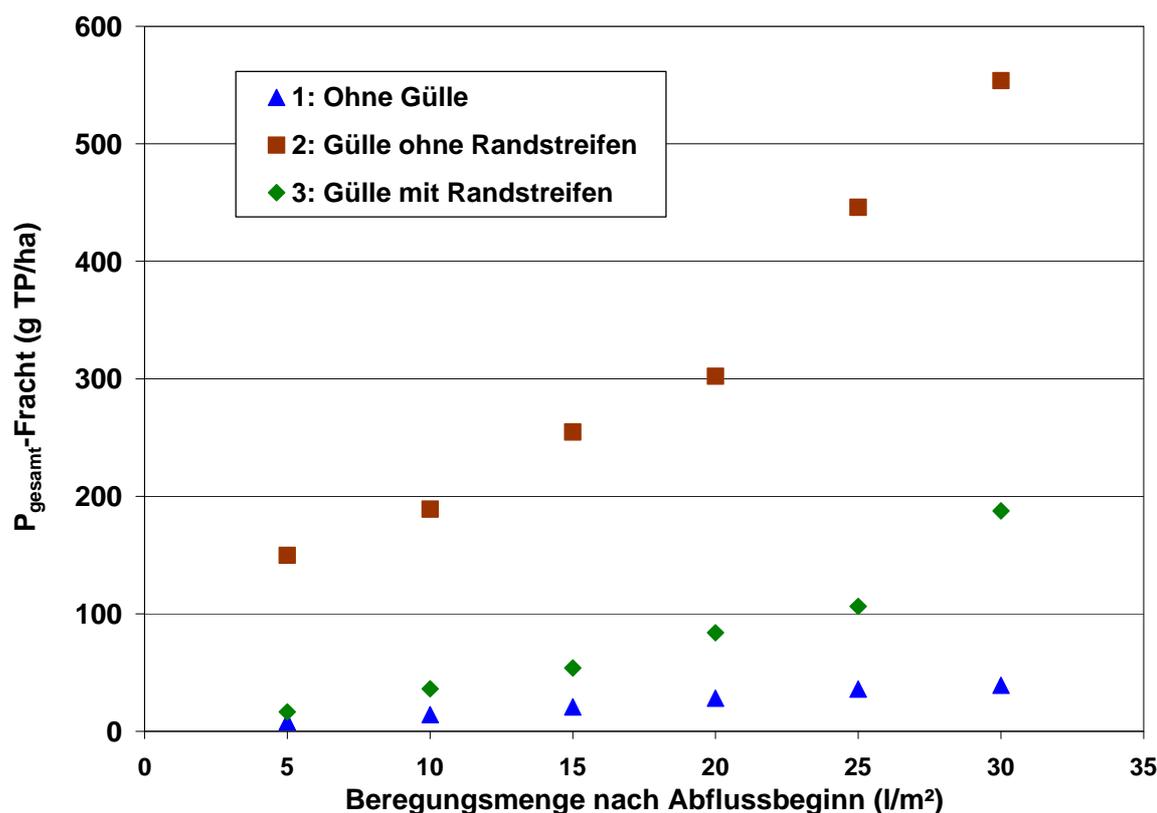


Abb. 40: \varnothing P-Fracht (TP) in Abhängigkeit von Variante und Beregnungsmenge

Aus Tabelle 52 ist ersichtlich, dass diese Unterschiede stets signifikant ($\alpha = 0.05$) waren. Sie zeigt ebenfalls, dass innerhalb der sechs Beregnungsstufen sich die Differenzen der mittleren P-Frachten zwischen den drei Varianten fast ausschließlich auf Unterschiede in der P-Konzentration zurückführen ließen und nicht auf unterschiedliche Wasserabläufe zwischen den Varianten. Dies kann auch als ein Indiz für die Güte der gewählten Versuchsdurchführung gelten. Von der durch die künstliche Beregnung ausgebrachten Wassermenge flossen durchschnittlich in Abhängigkeit von Variante und Regenintensität oberflächlich nur 3 % bis 23 % ab; überwiegend betrug der Oberflächenabfluss unter 10 % der Niederschlagshöhe. Erkennbar ist ferner, dass bei allen Varianten der überwiegende Teil (58-78 %) der mit dem Wasser abgeflossenen P_{Gesamt} -Menge (TP) löslicher Phosphor (DTP) war. Demnach scheinen Starkniederschläge auf hängigem Grünland vorzugsweise

P-Konzentrations- bzw P-Frachtspitzen in angrenzende Gewässer zu bewirken, die schnell für Umsetzungsprozesse verfügbar sind.

Bezogen auf die über die Gülle ausgebrachte durchschnittliche TP-Menge von 12,2 kg/ha ließen sich die mit dem Oberflächenabfluss ausgetragenen scheinbaren mittleren TP-Verluste ohne Randstreifen [(Variante 2 – Variante 1)/Dünge-TP] auf 1,2 % bei der niedrigsten und auf 4,2 % bei der höchsten Berechnungsstufe quantifizieren.

Tab. 52: Mittlere Berechnungsmengen, Wasserabflüsse, P-Konzentrationen und P_{gesamt} -Frachten sowie Anteil der löslichen P-Fracht an der TP-Fracht der drei Varianten bei unterschiedlichen Berechnungsmengen nach Abflussbeginn

Parameter	Varianten	Berechnungsmenge nach Abflussbeginn (l/m ²)					
		5	10	15	20	25	30
Anzahl Messungen (n)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	7 12 10	7 13 10	6 12 9	6 13 10	5 8 8	3 7 8
Ø Berechnungsmenge insgesamt (l/m ²)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	37,1 ^a 28,8 ^a 31,0 ^a	42,1 ^a 35,4 ^a 36,0 ^a	45,0 ^a 38,8 ^a 37,8 ^a	50,0 ^a 45,0 ^a 45,0 ^a	50,0 ^a 41,3 ^b 46,3 ^{ab}	53,0 ^a 45,0 ^b 50,6 ^{ab}
Ø Abflussmenge (l/m ²)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	1,3 ^{ab} 1,9 ^a 0,8 ^b	2,4 ^a 2,9 ^a 1,8 ^a	3,5 ^a 4,3 ^a 3,0 ^a	5,2 ^a 5,9 ^a 4,7 ^a	7,5 ^a 7,8 ^a 6,1 ^a	9,2 ^a 10,1 ^a 9,3 ^a
Verhältnis Abfluss zu Berechnung (%)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	4 ^{ab} 8 ^a 3 ^b	5 ^a 7 ^a 5 ^a	6 ^a 8 ^a 5 ^a	11 ^a 14 ^a 11 ^a	7 ^a 9 ^a 7 ^a	18 ^a 23 ^a 19 ^a
Ø P_{gesamt} -Konzentration (mg TP/l)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	0,7 ^b 6,6 ^a 1,6 ^b	0,6 ^b 5,7 ^a 1,6 ^b	0,6 ^b 5,3 ^a 1,6 ^b	0,5 ^b 4,7 ^a 1,7 ^b	0,5 ^b 5,3 ^a 1,6 ^b	0,4 ^b 5,1 ^a 1,8 ^b
Ø $P_{\text{löslich}}$ -Konzentration (mg DTP/l)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	0,4 ^b 3,7 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,4 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,3 ^a 1,0 ^b	0,4 ^b 3,1 ^a 1,2 ^b	0,3 ^b 3,5 ^a 1,1 ^b	0,3 ^b 3,5 ^a 1,3 ^b
Ø P_{gesamt} -Fracht (g TP/ha)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	8 ^b 150 ^a 16 ^b	14 ^b 189 ^a 33 ^b	21 ^b 255 ^a 54 ^b	28 ^b 302 ^a 84 ^b	36 ^b 446 ^a 106 ^b	39 ^b 554 ^a 188 ^b
Ø $P_{\text{löslich}}$ -Fracht (g DTP/ha)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	6 ^b 85 ^a 10 ^b	10 ^b 114 ^a 21 ^b	15 ^b 160 ^a 35 ^b	22 ^b 200 ^a 59 ^b	26 ^b 299 ^a 72 ^b	31 ^b 380 ^a 142 ^b
Ø DTP-Anteil an TP-Fracht (%)	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	62 ^a 59 ^a 58 ^a	65 ^a 61 ^a 61 ^a	69 ^a 63 ^a 61 ^a	72 ^a 67 ^a 67 ^a	73 ^a 66 ^a 64 ^a	78 ^a 66 ^a 68 ^a

Gemäss der Versuchskonzeption unter Praxisbedingungen mit unterschiedlich räumlich-zeitlichen Boden- und vor allem Bodenfeuchte-Bedingungen während der Vegetationsperiode verwundert es nicht, dass alle Parameter einer mehr oder weniger starken Streuung um die jeweiligen Mittelwerte unterlagen. Dies kommt in Tabelle 53 durch die Darstellung der Variationskoeffizienten (Standardabweichung*100/Mittelwert) zum Ausdruck.

Tab. 53: Variationskoeffizienten (prozentuales Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert) der in Tabelle 52 dargestellten Mittelwerte als Maß der in den Versuchen aufgetretenen Streuungen

Parameter	Varianten	Berechnungsmenge nach Abflussbeginn (l/m ²)					
		5	10	15	20	25	30
Berechnungsmenge _{insgesamt}	1: ohne Gülle	31	27	24	22	7	5
	2: Gülle ohne Rand.	45	38	33	29	16	13
	3: mit Randstreifen	41	35	21	22	15	12
Abflussmenge	1: ohne Gülle	55	56	62	56	38	44
	2: Gülle ohne Rand.	65	51	44	37	41	36
	3: mit Randstreifen	54	53	47	46	44	49
Verhältnis Abfluss zu Berechnung	1: ohne Gülle	73	74	74	64	44	50
	2: Gülle ohne Rand.	82	73	61	53	46	39
	3: mit Randstreifen	106	85	61	52	50	49
P _{gesamt} - Konzentration	1: ohne Gülle	41	37	29	25	24	20
	2: Gülle ohne Rand.	51	51	48	45	35	31
	3: mit Randstreifen	71	62	62	52	59	54
P _{löslich} - Konzentration	1: ohne Gülle	61	54	46	40	23	21
	2: Gülle ohne Rand.	49	50	48	46	39	39
	3: mit Randstreifen	83	73	73	60	70	67
P _{gesamt} -Fracht	1: ohne Gülle	63	64	63	63	46	49
	2: Gülle ohne Rand.	104	95	83	76	66	58
	3: mit Randstreifen	154	124	99	76	85	83
P _{löslich} -Fracht	1: ohne Gülle	95	81	75	75	56	65
	2: Gülle ohne Rand.	108	97	85	76	69	63
	3: mit Randstreifen	164	135	108	80	92	95
DTP-Anteil an TP-Fracht	1: ohne Gülle	42	36	36	32	25	29
	2: Gülle ohne Rand.	25	23	22	22	22	22
	3: mit Randstreifen	26	24	21	24	21	25

Erkennbar ist, dass die relativen Steuungsindices (Variationskoeffizienten) bei den P-Frachten sehr hoch, bei den P-Konzentrationen deutlich niedriger und bei dem DTP/TP-Verhältnis vergleichsweise niedrig lagen. Ebenfalls ist bemerkenswert, dass bei den P-Frachten und P-Konzentrationen in der Regel die Streuungen in der Reihenfolge Variante 3 (Gülle mit Randstreifen) > Variante 2 (Gülle ohne Randstreifen) > Variante 1 (ohne Gülle) abnahmen. Letztendlich verdeutlicht Tabelle 53 auch in Zusammenhang mit Tabelle 52, dass die dort tendenziell vorhandenen und ausgeprägten Mittelwertsunterschiede

zwischen Variante 1 und Variante 3 nicht statistisch abgesichert werden konnten bzw. für generell absicherbare Aussagen der große Versuchsumfang notwendig war.

4.7.2 Korrelationen

Bei den einzelnen Beregnungsstufen und Varianten wurden auch der Einfluss der von der Fläche abgeflossenen Wassermenge auf die mittlere P_{gesamt} -Konzentration, die P_{gesamt} -Fracht und das DTP/TP-Verhältnis analysiert. Die Korrelationskoeffizienten (r) können Tabelle 54 entnommen werden.

Tab. 54: Korrelationskoeffizienten (r) mit Signifikanzniveau der Beziehungen zwischen der Abflussmenge und den Parametern P_{gesamt} -Konzentration, P_{gesamt} -Fracht (TP), sowie Anteil $P_{\text{löslich}}$ (DTP) an der P_{gesamt} -Fracht (DTP/TP) bei unterschiedlicher Beregnungsmenge nach Abflussbeginn

Beziehung Abflussmenge zu ...	Varianten	Beregnungsmenge nach Abflussbeginn (l/m ²)					
		5	10	15	20	25	30
Anzahl Messungen (n)	1: ohne Gülle	7	7	6	6	5	3
	2: Gülle ohne Rand.	12	13	12	13	8	7
	3: mit Randstreifen	10	10	9	10	8	8
P_{gesamt} - Konzentration	1: ohne Gülle	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	2: Gülle ohne Rand.	0,61 *	0,63 *	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	3: mit Randstreifen	0,83 **	0,67 *	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
P_{gesamt} -Fracht	1: ohne Gülle	n.s.	0,81 ***	0,88 *	0,90 *	0,80 *	n.s.
	2: Gülle ohne Rand.	0,93 ***	0,91 ***	0,86 ***	0,83 ***	0,92 **	0,92 *
	3: mit Randstreifen	0,93 ***	0,86 **	0,78 *	0,74 *	0,78 *	0,87 **
DTP-Anteil an TP-Fracht	1: ohne Gülle 2: Gülle ohne Rand. 3: mit Randstreifen	nicht signifikant (n.s.)					

Überwiegend ergab sich keine signifikante Beziehung zwischen der Abflussmenge und der P-Konzentration des aufgefangenen Wassers – mit Ausnahme der begüllten Varianten bei niedrigen Beregnungsintensitäten. Generell war ein „Verdünnungseffekt“ nicht ableitbar. Ebenfalls beeinflusste bei keiner Intensitätsstufe (Beregnungsmenge nach Abflussbeginn) und bei keiner Variante der gemessene oberflächliche Wasserabfluss das Verhältnis zwischen löslichem und partikulärem Phosphor.

Bei den begüllten Varianten 2 und 3 bestanden jedoch signifikant positive Beziehungen zwischen der Höhe des Oberflächenabflusses und der P_{gesamt} -Fracht; etwas eingeschränkt (aufgrund der niedrigeren Zahl an Wiederholungen) traf dies auch auf die ungedüngte Variante 1 zu. Auch dies belegt, dass in dieser Versuchsserie ein „Verdünnungseffekt“ nicht bestand.

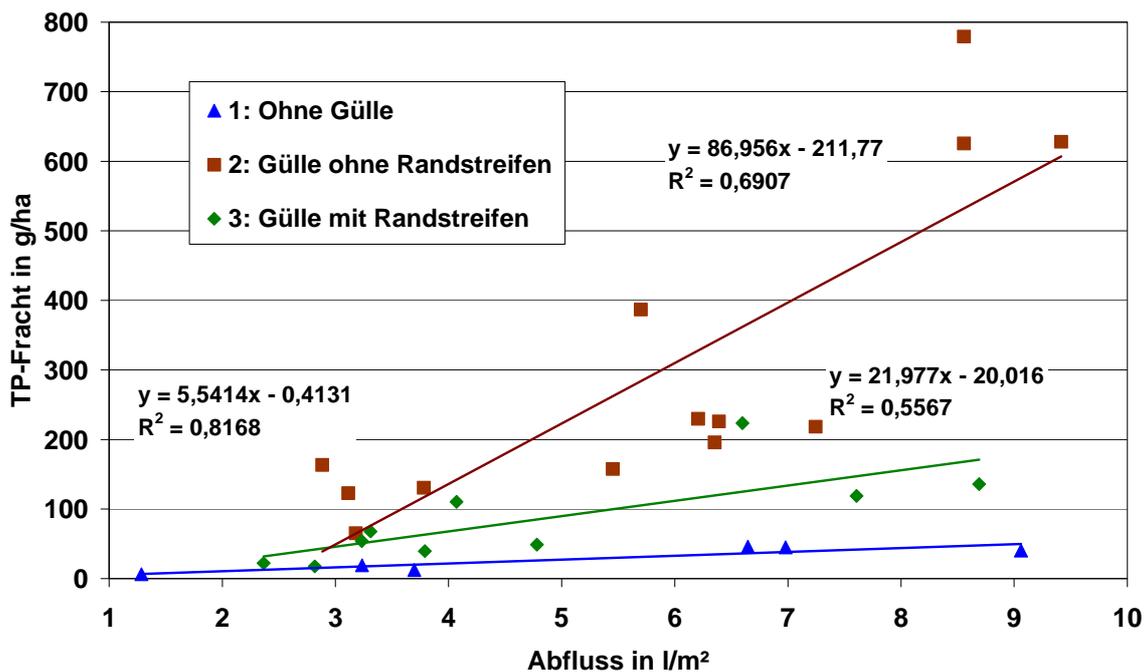
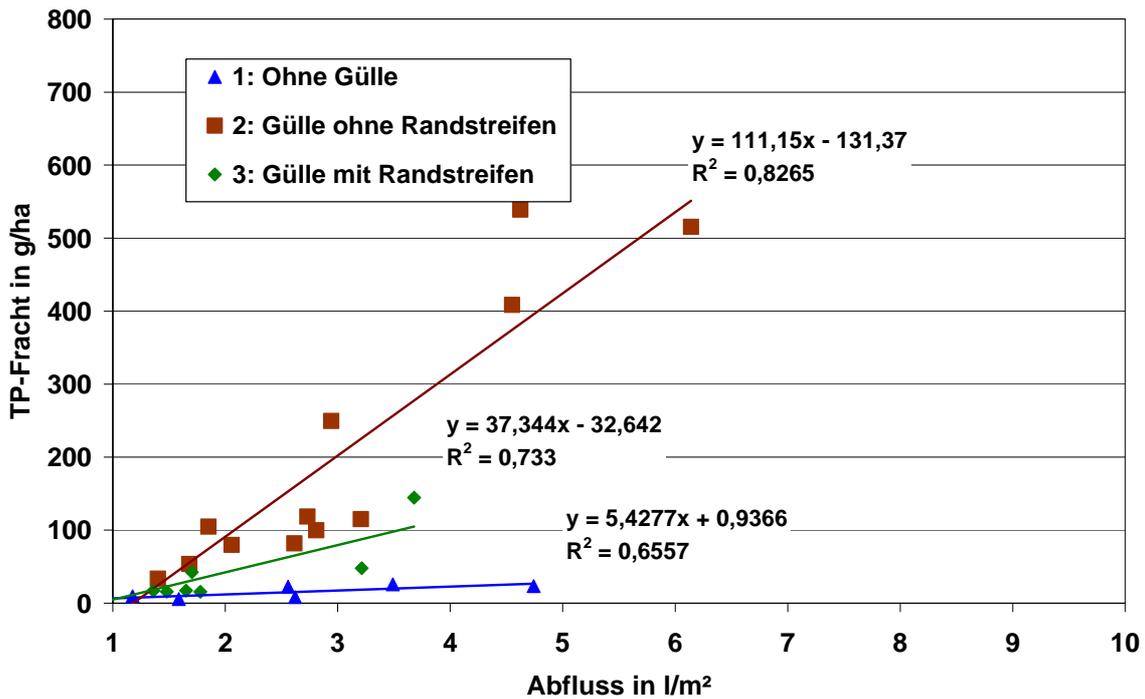


Abb. 41: Beziehung zwischen Abflussmenge und P-Fracht (TP) bei den drei Varianten bei Berechnungsmengen von 10 l/m^2 (oben) und 20 l/m^2 (unten) nach Abflussbeginn

In Abbildung 41 sind die Beziehungen zwischen der Höhe des Wasserabflusses und der TP-Fracht bei Berechnungsmengen von 10 bzw. 20 l/m^2 nach Abflussbeginn graphisch dargestellt. Erkennbar ist die hohe Streuung innerhalb der Varianten, die auch bei den Va-

riationskoeffizienten (Tabelle 53) zum Ausdruck kommt. Vor allem aber wird deutlich, dass der Anstieg der TP-Fracht mit zunehmendem Wasserabfluss bei der begüllten Variante ohne Randstreifen (2) am höchsten war und sich deutlich von der Randstreifenvariante (3) und dem ungedüngten Kontrollglied (1) abhob. Im Prinzip traf dieser Sachverhalt auch auf die übrigen vier Beregnungsintensitäten zu, deren Regressionen nicht explizit dargestellt sind.

Somit ist auch bei dieser weiteren Form der Auswertung - in Ergänzung zu den Mittelwertsvergleichen (siehe Tabelle 52) - der positive Effekt eines ungedüngten Randstreifens ersichtlich.

Fazit Beregnungsversuche zum Oberflächenabfluss:

Bei hängigen Grünlandflächen können ungedüngte Randstreifen in Gewässernähe dazu beitragen, die P-Konzentration im abfließenden Wasser und damit den P-Austrag signifikant zu mindern. Dieser positive Effekt kommt - absolut gesehen - umso mehr zum Tragen, je höher ein Starkregenereignis ausfällt. Für statistisch absicherbare Aussagen erfordern Beregnungsversuche im Freiland einen hohen Versuchsaufwand.

4.8 Entwicklung des Flächenumfangs wichtiger Maßnahmen des Kulturlandschaftsprogramms (KULAP) zum Gewässerschutz

Im folgenden wird dargestellt, wie sich die Anzahl der in Bayern liegenden Flächen, die durch das KULAP bezüglich einer gewässerschützenden Maßnahme gefördert wurden, im Projektzeitraum in den beiden Gesamteinzugsgebieten entwickelt hat. Ferner werden die Förderbedingungen der einzelnen KULAP-Maßnahmen kurz erläutert.

4.8.1 Gesamteinzugsgebiet Eixendorfer Stausee

Mulchsaatverfahren bei Mais im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees

Abbildung 42 zeigt die Entwicklung des Mulchsaatverfahrens bei Mais. Zu erkennen ist bei einem relativ konstanten Umfang der Gesamtmaisfläche (der Anstieg im Jahr 2004 war auf die durch die Trockenheit in 2003 verursachte Futterknappheit zurückzuführen) ein kontinuierlich steigender Anteil der Flächen mit Mulchsaat. Aufgrund der im Jahr 2002 ausgesetzten Neuantragsstellung im KULAP wurde eine Sonderförderung im Gebiet geschaffen (in Abbildung 42 blau dargestellt), die den positiven Effekt der Mulchsaat als wichtige Maßnahme des vorbeugenden Gewässerschutzes für diese Region aufrechterhalten sollte. Beginnend mit der Neuantragstellung in 2003 waren auch Flächen mit der neuen KULAP-Maßnahme M 32 „Winterbegrünung“ zu verzeichnen, die einigen Betrieben bei anderen Auflagen eine flexiblere Fruchtfolgegestaltung bzw. einen höheren Anreiz als die Mulchsaat bot. Insgesamt stieg der Anteil an Maisflächen mit den erosionsmindernden Maßnahmen Mulchsaat und Winterbegrünung von ca. 4 % (88 ha; Mittel 1998/1999) auf ca. 23 % (563 ha; Mittel 2003/2004) an. Dies ist als ein klarer Erfolg der Beratung vor Ort zu werten.

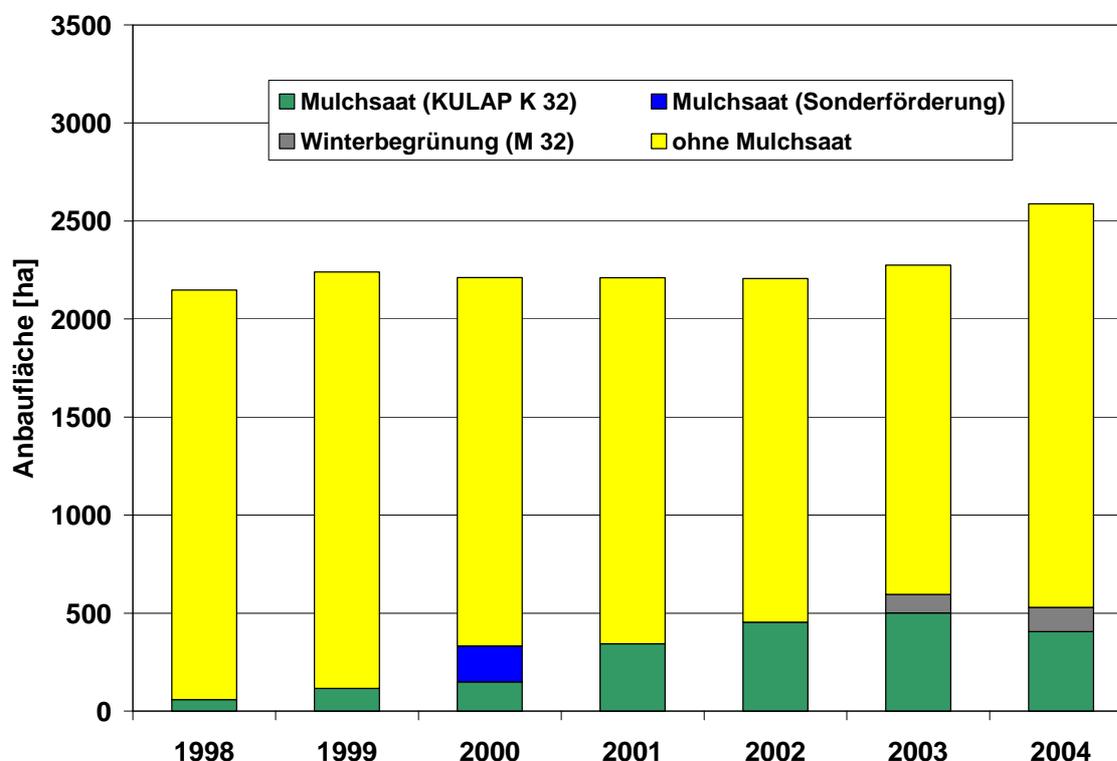


Abb. 42: Entwicklung des Mulchsaatverfahrens bei Mais im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees

Ein weiterer starker Zuwachs der mit Mulchsaat bestellten Maisfläche dürfte nicht zu erwarten sein, da nicht alle Silomaisflächen auf erosionsgefährdeten Äckern angelegt werden und weiterhin natürliche Beschränkungen bei der Fruchtfolgegestaltung (z. B. späte Vorfruchternte) oder widrige Witterungsverhältnisse dem eine Grenze setzen.

Spezielle KULAP-Maßnahmen für gewässersensible Bereiche

Der Unterpunkt Punkt 4.1 des KULAP (Teil A, Antragszeitraum bis 2006) beinhaltet die Förderung regionalspezifischer gewässerschonenden Landbewirtschaftung im Einzugsgebiet von Oberflächengewässern. Hierbei kann die extensive Bewirtschaftung von gewässer- und ufernahen unmittelbar bedeutsamen (Flächenabgrenzung und Gebietskartierung vorgeschrieben) Grünland- und Ackerflächen im Einzugsbereich (Umgriff) von Seen und deren Zuflüssen gefördert werden. Damit ist vorrangig das Ziel verbunden, die aus der Landwirtschaft stammenden Stoffeinträge in Oberflächengewässer zu verringern und damit einen aktiven Beitrag zu deren Sanierung zu leisten. Zu den förderfähigen Maßnahmen zählen die extensive Grünlandnutzung und die extensive Ackernutzung.

Die **extensive Grünlandnutzung** ist an den Verzicht auf den Einsatz jeglicher Düngung und flächendeckenden chemischen Pflanzenschutz gekoppelt, erlaubt ist nur die Einzelpflanzenbehandlung. Sie sieht ferner die Einhaltung eines beweidungsfreien, jedoch gepflegten Uferrandstreifens von mindestens 15 m, sowie generell eine landwirtschaftliche Verwertung des Aufwuchses und einen Mindestbestand an Rauhfutterfresser im Betrieb vor. Die Höhe der Förderung richtet sich zum einen nach den regionalen Gegebenheiten bzw. Erfordernissen des Fördergebietes (z. B. Ertragsbedingungen) und andererseits nach den Schnittzeitaufgaben, die von „ohne“ (K 90) über „ab 1. Juni“ (K 92), „ab 15. Juni“ (K 93) bis hin zu „Schnittzeitpunkt ab dem 01. Juli“ (K 94) reichen. Im Einzugsgebiet kamen die beiden letzten Maßnahmen (K 93 und K 94) zum Tragen. Abbildung 43 zeigt, dass deren Umfang jedoch insgesamt von ca. 34 Hektar (2000) auf rund 6 Hektar (2004) abnahm.

Die Förderung **extensiver Ackernutzung** (K 95) sieht eine Bewirtschaftungsweise ohne jegliche Düngung und ohne jegliche Pflanzenschutzmittel vor, darüber hinaus ist ein mindestens 5 m breiter Grünlandstreifen zwischen Acker und Gewässer freizuhalten. Die Maßnahme wurde im Einzugsgebiet jedoch nicht genutzt.

Als nicht regionale (d. h. speziell – wie bei Punkt 4.1 - auf definierte Einzugsgebietskulissen begrenzte) Maßnahmen werden im KULAP unter Punkt 4.3 (K 48) die **Umwandlung von Acker in Grünland** und unter Punkt 4.4 (K 49) die **umweltschonende Ackernutzung** in gewässersensiblen Bereichen gefördert. Letztere beinhaltet die Anlage eines mindestens 15 breiten Grünstreifens in unmittelbarer Gewässernähe und den Verzicht auf den Anbau von erosionsgefährdeten Reihenkulturen (Mais, Rüben, Kartoffeln) auf dem restlichen Feldstück. Im Einzugsgebiet wurde die Möglichkeit der Umwandlung von Acker in Grünland (K 48) so gut wie nicht genutzt. Dagegen stieg der Umfang der Flächen mit umweltschonender Ackernutzung ab dem Jahr 2002 von zwei Hektar bis zum Jahr 2004 auf rund 13 Hektar an.

Eine weitere Maßnahme geförderter extensiver Grünlandbewirtschaftung im KULAP ist die **einzelflächenbezogene Extensivierung von Grünlandflächen entlang von Gewässern und sonstigen sensiblen Bereichen** (Programmpunkt 3.3, K 57). Eine Förderung ist hierbei an den Verzicht auf jegliche Düngung und chemische Pflanzenschutzmittel gekoppelt. Eine Schnittzeitaufgabe ist jedoch nicht vorgesehen. Wie Abbildung 43 zeigt, war K 57 diejenige Maßnahme, welche im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees von den insge-

samt fünf beschriebenen Maßnahmen den mit Abstand höchsten Flächenumfang und die höchste Steigerung erreichte. Lag ihr Umfang im Jahr 2000 noch bei nur knapp drei Hektar, so erreichte er zwei Jahre bereits 51 Hektar und lag am Ende des Beobachtungszeitraums (2004) bei 179 Hektar.

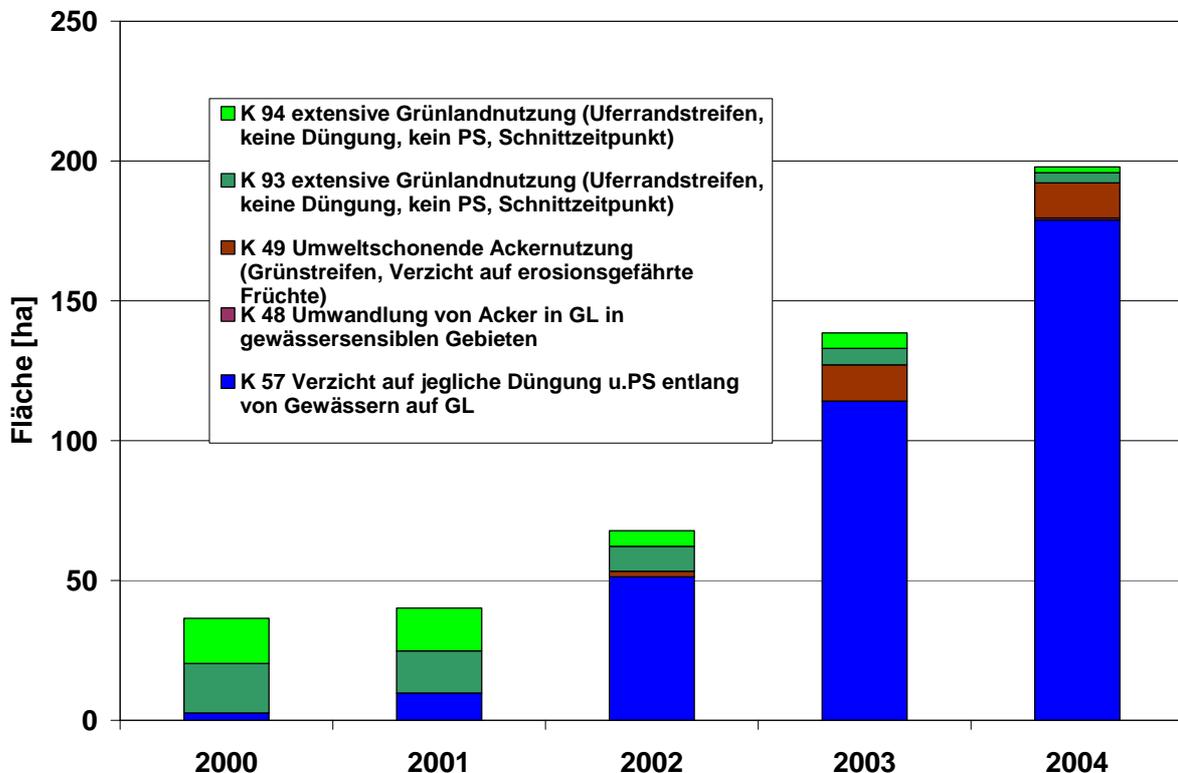


Abb. 43: Entwicklung der KULAP-Maßnahmen für gewässersensible Bereiche im Gesamt-Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees

In ihrer Summe nahm der Umfang aller fünf genannten KULAP-Maßnahmen für gewässersensible Bereiche innerhalb von vier Jahren von 36,5 Hektar auf 198 Hektar zu. Er erreichte damit einen Anteil von etwa einem Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Einzugsgebiets (19.270 ha). Obwohl diese Zahl gering erscheint, ist die Ausdehnung um mehr als das Fünffache als ein Beratungserfolg zu werten, zumal von der Gesamtgebietsfläche nur ein geringer Teil direkt an Oberflächengewässern lag.

4.8.2 Gesamteinzugsgebiet Drachensee

Die in Tabelle 55 dargestellte Entwicklung von ausgewählten Maßnahmen des bayerischen Kulturlandschaftsprogramms für Ackerbau- und Grünlandflächen im Einzugsbereich des Drachensees (Gemeinden Eschlkam, Neukirchen, Furth im Wald) weisen insgesamt auf einen beachtlichen Erfolg der dortigen Beratungsaktivitäten hin. Deren Ansatzpunkte bestanden in einer weiteren Optimierung der landwirtschaftlichen Praxis (Zwischenfruchtanbau/Mulchsaat, Feldstückseinteilung/Fruchtfolge, Düngemanagement) und in der Förderung von Extensivierungsmaßnahmen. Dabei konnte insbesondere die ganzjährige Bodenbedeckung auf Ackerflächen durch Mulchsaat oder Winterbegrünung bis 2005 sowie die bodennahe Gülleausbringung bis 2004 kontinuierlich gesteigert werden.

Bei den übrigen Maßnahmen – mit Ausnahme des Ökologischen Landbaus - fällt ein sprunghafter und teilweise sehr hoher Anstieg zu Beginn der Antragsperiode und dann eine weitgehende Stagnation auf. Die nicht vorhandene Erhöhung Betriebsflächen, die nach den Kriterien des Ökologischen Landbaus bewirtschaftet werden, deutet darauf hin, dass dieses Potenzial bereits in den Gemeinden ausgeschöpft sein dürfte.

Tab. 55: Entwicklung des Flächenumfangs ausgewählter KULAP-Maßnahmen im bayerischen Drachenseeeinzugsgebiet (alle Angaben in ha)

KULAP-Maßnahmen	Jahr				max. Änderung zu 2002
	2002	2003	2004	2005	
Mulchsaat/Winterbegrünung (K 32/M 32)	126	273	385	430	+ 304
Extensive Grünlandbewirtschaftung ohne schnelllösliche Mineraldünger (K 34)	1370	2349	2457	2523	+ 1153
Verzicht auf jegliche Grünlanddüngung entlang von Gewässern (K 57)	19	51	58	59	+ 40
Bodennahe Gülleausbringung (M 60/61)	0	128	795	563	+ 795
Ökologischer Landbau (K 14)	119	110	125	117	+ 6

4.9 Entwicklung der Hoftorsalden

Bei Betriebsbesuchen wurden Erkundigungen über die Hoftorsalden eingezogen. Zu bemerken ist hierbei, dass nicht für alle Betriebe diese Art der Saldierung vorlag bzw. die Landwirte nicht immer bereit waren, den Aufwand einer zusätzlichen Saldierung auf Hof-tor-Basis gegenüber dem weitverbreiteten Feld-Stall-Saldo zu leisten. Daher wurden in diesen Fällen die Hoftor-Salden für die ersten beiden Jahre zumindest rückwirkend er-rechnet, wobei hier Ungenauigkeiten in Kauf genommen wurden (Angabe von Schätz-und/oder Erfahrungswerten, teilweise keine Möglichkeit zur Überprüfung von Details mit-tels Belege).

Aufgrund des Engagements des Einzugsgebietsberaters, Herrn Höcherl und dessen guten Kontakte zu den Landwirten konnte dennoch eine repräsentative Zahl an Nährstoffsalden (n = 18 bis 35 im Beobachtungszeitraum) erstellt werden. Dies war insbesondere deshalb möglich, da zum Einen die Erstellung der Hoftorsalden für die beteiligten Landwirte im Einzugsgebiet kostenlos war, und zum Anderen mit der Saldierung gleichzeitig eine Be-triebsberatung durch den Einzugsgebietsberater angeboten wurde. Generell war positiv festzustellen, dass das Angebot der Erstellung und Auswertung einer Nährstoffsaldierung ein sehr guter Einstieg in die produktionstechnische Betriebsberatung war. Die sinkende Zahl der teilnehmenden Betriebe ab 2002 zeigt allerdings auch, dass trotz großem Enga-gement des Beraters eine gewisse „Beratungsmüdigkeit“ zu verzeichnen war – eine Be-triebsberatung jedes Jahr wurde manchem Landwirt wohl zu viel.

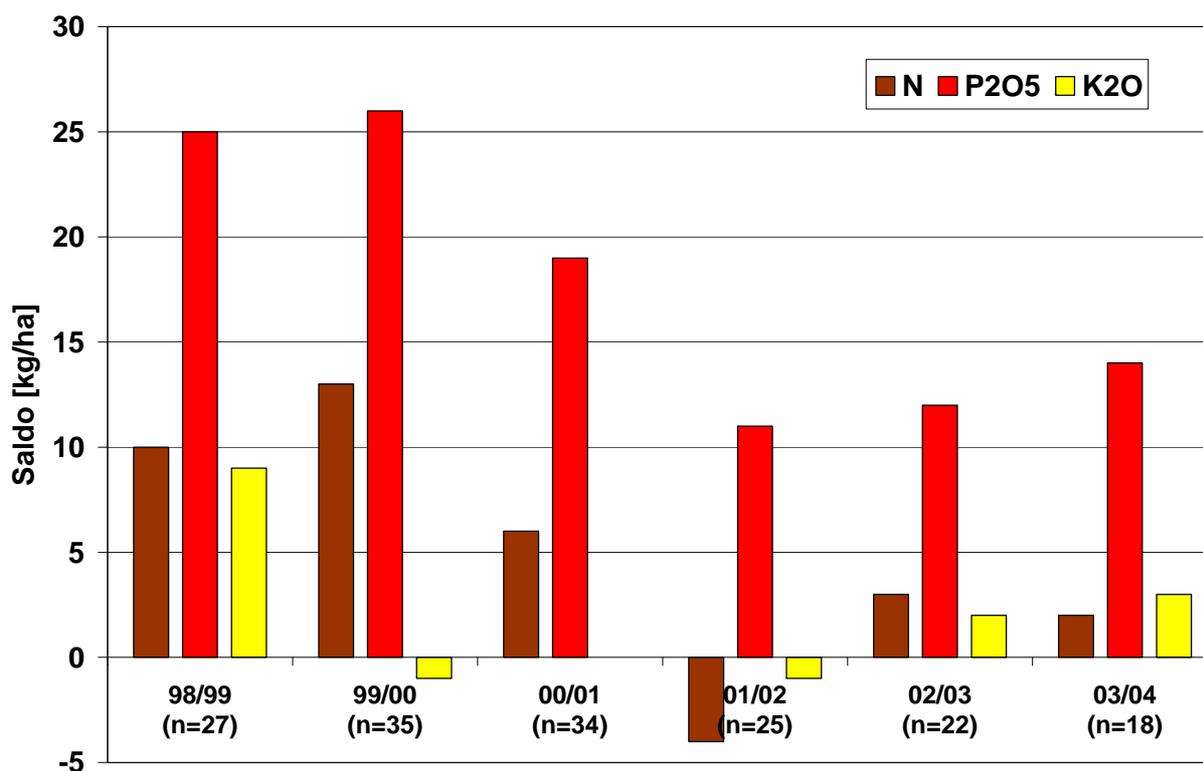


Abb. 44: Entwicklung der durchschnittlichen Nährstoffsalden auf Hof-tor-Basis in den TEZG des Eixendorfer Sees (Mittel der Betriebe in den TEZG)

Abbildung 44 gibt die Entwicklung der Stickstoff-, Phosphat- und Kalisalden im Zeitraum 1998 bis 2004 wieder. Als Erhebungsbasis dienten Betriebe im Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees, die speziell in den Teileinzugsgebieten Saxlmühle, Irlach und Zillendorf lagen. Die Säulen stellen Mittelwerte der einzelnen Jahre dar. Erkennbar ist deutlich, dass sich die Stickstoff- und Phosphatsalden im Trend insgesamt verringert haben. Gerade die in den ersten Jahren positiven P-Saldi mit einer mittleren Höhe von ca. 25 kg P₂O₅/ha wiesen auf deutliche Einsparungspotenziale bzw. ein noch nicht optimiertes Nährstoffmanagement hin. Deren Reduktion auf etwa die Hälfte lässt auf ein Umdenken der Landwirte im Einzugsgebiet schließen und ist – wie bereits schon bemerkt – als ein Erfolg der Beratung zu verbuchen. Der leichte Wiederanstieg in den letzten zwei Jahren könnte neben jahresbedingten Schwankungen auch dadurch erklärt werden, dass hier insgesamt weniger Betriebe in die Mittelwertbildung eingingen (anderer Stichprobenumfang) und evtl. gerade Betriebe mit ohnehin schon geringen Salden nicht mehr für eine Beratung und Erfassung zur Verfügung standen.

4.9.1 Beratungsaktivitäten bezüglich einer „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“ in den beiden Gesamteinzugsgebieten

Neben der wissenschaftlichen Validierung der P-Austragspfade bestand ein weiterer Schwerpunkt des Projekts darin, differenzierte Maßnahmestrategien zur Reduzierung der P-Belastung zu entwickeln und – unter Einbindung der aus den Forschungsergebnissen gewonnen Erkenntnissen – diese in der Beratung regional, nach Möglichkeit auch überregional umzusetzen. Aus den Tabellen 56 und 57 wird das große Engagement der in den beiden Einzugsgebieten zuständigen Ämter für Landwirtschaft und Forsten bei der Umsetzung des Ziels einer „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“ ersichtlich. In den Tabellen ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Aktivitäten aufgeführt, welche teilweise in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft erfolgten.

Tab. 56: Seminare und Tätigkeiten zur „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ im Einzugsgebiet des Eixendorfer Stausees in den Jahren 2000-2005 sowie überregionale Transformation der gewonnenen Erkenntnisse

Ämter für Landwirtschaft und Forsten Cham und Schwandorf/Nabburg
Infobrief über Möglichkeiten der „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“ an alle Landwirte im Einzugsgebiet
Durchführung und Auswertung von Erhebungen über bisherige Güllegewohnheiten und vorhandene Lagerkapazitäten bei flüssigen organischen Düngern; Auswertungen von Nährstoffbilanzierungen in Betrieben in Zusammenarbeit mit einem für das Projekt angestellten Landwirtschaftsmeister
Mehrere Versammlungen zu Möglichkeiten des Bayerischen Kulturlandschaftsprogramms mit Schwerpunkt Gewässerschutz
Jährlich 1-2 Informationsveranstaltungen zum Thema „Gewässer- und bodenschonende Landbewirtschaftung mit Beratungshinweisen und unter Einbeziehung der wissenschaftlichen Projektergebnisse der LfL
Anlage von mehrere Demonstrationsanlagen zum Zwischenfruchtanbau, zur Mulchsaat und Unterfußdüngung mit 1-2 jährlichen Führungen durch das Amt
Durchführung eines zentralen Grünland-, Gülle und Futterbauseminars in Cham mit Beteiligung der LfL
Durchführung von sechs Schultagen und eines BiLa-Kurses der Landwirtschaftsschule Cham zur Thematik Erosion in Mais und Grünlanddüngung
Grünlanddemoanlage mit unterschiedlichen Arten der Gülleaufbereitung und Grünlandführungen zum Thema „Grünlanddüngung mit Gülle“
Mitwirkung bei der Konzeption eines Grünlandexaktversuches der LfL am Wullnhof
Gezielte Öffentlichkeitsarbeit zum Thema „Gewässerschutz in der Landwirtschaft“ (kleine Landesgartenschau in Cham, Landwirtschaftsstände bei der Regionalausstellung in Waldmünchen bei den Chamer Umwelttagen)

Tab. 57: Seminare und Tätigkeiten zur „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ im Einzugsgebiet des Drachensees in den Jahren 2002-2005 sowie überregionale Transformation der gewonnenen Erkenntnisse

Amt für Landwirtschaft und Forsten Cham
Informationsversammlung mit dem Verein landwirtschaftlicher Fachschulabsolventen (VLF) Cham
Versammlungen zu Maßnahmen des Bayerischen Kulturlandschaftsprogramms, Schwerpunkt Boden- und Gewässerschutz
Versammlungen zur „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“
Versammlung zur Humusverwertung aus dem Drachensee
Neun Versuchführungen mit Praxisbeispielen zur Mulchsaat, Unterfußdüngung, zum Zwischenfruchtanbau und zum Pflanzenschutz
Diverse Semesterarbeiten der Landwirtschaftsschule Cham zur Thematik Mulchsaat und Maisdüngung
Mitbetreuung der Projektberater
Tagungen mit Landwirtschaftsbehörden aus Tschechien in Zusammenarbeit mit dem Sachgebiet 2.1 A des Amtes für Landwirtschaft und Forsten Regensburg und der LfL; u.a. zur Bayerisch-Tschechischen Zusammenarbeit zum Schutz des Drachensees (Fluss Chamb)
Amt für Landwirtschaft und Forsten Regensburg
Schulung von Einzugsgebietsberatern
Erstellung eines Aktionsplans zur Verringerung der Nährstoffeinträge in den Drachensee/Landkreis Cham in Zusammenarbeit mit der LfL
Stellungnahmen zum Bau des Drachensees (Abtrag von Oberboden vor der Überstauung landwirtschaftlicher Flächen; Nährstoffeinträge in den Drachensee und notwendige Maßnahmen zu deren Verringerung

In enger Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt wurden die beteiligten Behörden und die Landwirte im Einzugsgebiet über den Fortschritt der gewonnenen Teilergebnisse informiert. Vertieft wurde auch die Zusammenarbeit mit den tschechischen Projektpartnern für das Einzugsgebiet des Drachensees – u. a. ging daraus ein Aktionsplan zur Verminderung zu dessen Nährstoffbelastung hervor. Es bleibt festzuhalten, dass wesentliche Projektziele aufgrund der engagierten Arbeit der Landwirtschaftsämter vor Ort initiiert, erarbeitet und umgesetzt werden konnten.

Seitens der bayerischen Landesanstalt konnten – neben der bereits teilweise zitierten intensiven und konstruktiven Zusammenarbeit mit allen Behörden vor Ort – die in der oberpfälzischen Region gewonnenen Erkenntnisse auch über diesen Raum hinaus transferiert werden (siehe Tabelle 58). Dies umfasst sowohl die Darstellung von Ergebnissen in wissenschaftlichen und praxisorientierten Fachkreisen als auch die methodische und ergebnisorientierte Übertragung auf ein anderes, länderübergreifendes Interreg-Projekt zur Verbesserung der Gewässerqualität im bayerisch-österreichischen Grenzgebiet.

Tab. 58: Aktivitäten der LfL bei der Umsetzung und Transformation von projektbezogenen Maßnahmen zur „Gewässerschonenden Landbewirtschaftung“

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Unterstützung der Ämter für Landwirtschaft und Forsten bei der Aufklärungs- und Beratungstätigkeit in den Einzugsgebieten; Mitwirkung bei regionalen und überregionalen Veranstaltungen
Mitwirkung bei überregionalen Treffen mit Tschechien; u.a. zur Bayerisch-Tschechischen Zusammenarbeit der grenzüberschreitenden Reduzierung der Phosphatreduzierung in den Fluss Chamb oberhalb des Drachensees
Mitwirkung bei Treffen der Landwirtschafts- und Wasserwirtschaftsverwaltungen und anderen Behörden (z. B. Landratsamt) in der Region
Darstellung aktueller Forschungsergebnisse in der Region
Studie zu Bodenuntersuchungen im Staubereich des zukünftigen Drachensees in Hinblick auf den evtl. notwendigen Abtrag von Oberboden
Darstellung und Diskussion der Forschungsergebnissen bei Beratern der Landwirtschaftsverwaltung im Rahmen eines Seminars der Bayerischen Führungsakademie (FüAk) im Jahr 2005
Darstellung der Forschungsergebnisse zum P-Austrag aus Drainagen über Grünland nach Starkregenereignissen bei der Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften im September 2005 in Wien
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse zum P-Austrag aus Drainagen über Grünland nach Starkregenereignissen für eine breite Beratungspraxis bei der Zeitschrift „Schule und Beratung“ des Bayer. Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten, 2005
<p>Laufende Mitwirkung der LfL beim INTERREG-III-A-Projekt „Nachhaltige Landbewirtschaftung in der EuRegionalen Seenlandschaft (Waginger-Tachinger See, Irrsee, Mondsee); Zusammenarbeit von Bayern, Salzburg und Oberösterreich</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mitwirkung in Leitungs-, Datengewinnungs- und Maßnahmengruppen - Vorstellung der Erkenntnisse aus dem Projekt „Saubere Seen“: <ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse zum P-Austrag bei Einzugsgebieten Ergebnisse zum P-Austrag aus drainiertem Grünland bei Starkregen - Auswertung von Hoftor-Bilanzen, Bodenuntersuchungen und der Teilnahme an KULAP-Programmen in der Region Waginger-Tachiger See; Darstellung vor Beratern, Landwirten, Bauernverband, Bürgermeistern - Mitwirkung bei der Öffentlichkeitsarbeit (Vorträge, Pressebeiträge) - Mitwirkung bei der Konzeption neuer Versuchsvorhaben
Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in enger Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umwelt (LfU). Beurteilung der potenziellen Verbesserung der Belastungssituation (N und P) der Gewässer von über 50 Maßnahmen hinsichtlich Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit

5 Diskussion

5.1 Einfluss der Landnutzung auf den P-Eintrag in Oberflächengewässer sowie mögliche Optimierungsansätze

Wesentliche Ergebnisse der Forschungsarbeiten über die Höhe der P-Belastung, die in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.6 detailliert beschrieben wurden, sind für die folgende Diskussion nochmals in den Tabellen 59 und 60 zusammengefasst.

Die Tabellen zeigen, dass durch die gezielte Auswahl von Teileinzugsgebieten eine große Variation der Flächennutzung (LN, Wald, Siedlung/Verkehr, siehe Tabelle 59) insbesondere der landwirtschaftlichen Flächennutzung (Acker, Grünland, siehe Tabelle 60) als Datenbasis für eine weitere Interpretation erreicht werden konnte.

Weiterhin bestätigen die Extremwerte bei den Messungen der Wasserabflüsse und der P-Konzentrationen (Tabelle 59), dass nur mehrjährige, kontinuierliche Datenreihen eine verlässliche Aussage über Nährstoffeinträge in Gewässer ermöglichen. Eine kurzfristige Betrachtungsweise birgt die Gefahr empfindlicher Fehleinschätzungen. So machten beispielsweise monatliche Extrema der Wasserabflüsse bis zu ca. 45 % des jährlichen Durchschnittswerts (Irlach) aus bzw. es übertrafen die monatlichen Maxima der TP-Konzentrationen das jährliche Mittel um das Vier- (Irlach) bis Sechsfache (Saxlmühle).

Tab. 59: Übersicht zur Flächennutzung, zum Wasserabfluss, zur TP- Konzentration, zur TP-Fracht und deren P-Fractionen aus dem jeweiligen Einzugsgebiet und zur Kalkulation des aus der LN stammenden Anteils

Parameter	TEZG Saxlmühle	TEZG Irlach	TEZG Zillendorf	TEZG Breitenried	GEZG Eixend. See	GEZG Drachensee
Flächennutzung (%)						
- Siedlung/Verkehr	0/6	0/3	4/5	2/3	7	5
- Wald	17	36	29	43	46	40
- LN	76	61	61	52	47	54
Ø Wasserabfluss pro Jahr (l/m²)	261	305	250	229	316	261
- Maximum bei Monatmittel	51	141	56	58	64	63
Ø TP-Konzentration (mg TP/l)	0,21	0,11	0,22	0,09	0,17	0,18
- Maximum bei Monatmittel	1,17	0,48	0,39	0,20	0,39	0,47
Ø TP-Fracht aus gesamter Fläche (kg TP/ha u. Jahr)	0,55	0,33	0,55	0,19	0,52	0,47
Verhältnis von partikulärem und löslichem Phosphor (%)	70:30	36:64	61:39	54:46	70:30	62:38
Kalkulierter Anteil aus LN an der Gesamt-TP-Fracht (%)	89	87	61	54	50	47

Tab. 60: Übersicht zur landwirtschaftlichen Nutzung, zur kalkulierten TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie Abschätzung des Anteils von TP-Frachten aus einzelnen Austragspfaden in den jeweiligen Einzugsgebieten

Parameter	TEZG Saxmühle	TEZG Irlach	TEZG Zillendorf	TEZG Breitenried	GEZG Eixend. See	GEZG Drachensee
Flächennutzung der LN (%)						
- Grünland	24	50	58	70	49	59
- Acker	76	50	42	30	51	41
- davon mittel – stark erosionsgefährdet	70	52	61	0	n.b	n.b.
Ø Viehbesatz (GV/ha LN)	1,8	1,8	1,6	1,1	1,7	1,0
Ø TP-Fracht aus LN (kg TP/ha u Jahr)	0,64	0,47	0,55	0,20	0,56	0,40
Anteil unterschiedlicher Austragspfade an der TP-Fracht aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche						
Oberflächenabfluss Grünland (%)	2	8	5	14	3	5
Erosion von Ackerflächen (%)	65	47	48	18	60	57
Sickerwasser, Zwischenabfluss und Drainagen	33	45	47	67	37	38

5.1.1 Gesamteinzugsgebiete

Die beiden Gesamteinzugsgebiete weisen im Durchschnitt eine weitgehend ähnliche Nutzung der jeweiligen Gebietsflächen auf (siehe Flächennutzung Tabelle 59), unterscheiden sich aber in Bezug auf den Acker- und Grünlandanteil der LN (siehe Flächennutzung Tabelle 60) und den Viehbesatz. Zusätzlich ist zu vermerken, dass die landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet des Drachensees insgesamt als extensiver anzusehen ist, zumal 43 % der Gebietsfläche auf tschechischer Seite liegen.

Die durchschnittlichen TP-Konzentrationen für die beiden Gesamteinzugsgebiete lagen bei den Seezuläufen bei 0,17 bzw. 0,18 mg TP/l (siehe Tabelle 59). Diese Zahlen weisen darauf hin, dass die TP-Konzentrationen weit über der notwendigen Grenze (ca. 0,03 mg TP/l) lagen, die für einen mesotrophen Zustand der Stauseen, d. h. für eine nur mäßige Algenbildung (SEYBOLD, 2001) anzustreben ist. Wenngleich nicht direkt von den gemessenen P-Einträgen in den Seezuläufen auf die Höhe der P-Konzentration im stehenden Gewässer geschlossen werden kann (Einbau in die Biomasse, Sedimentation, Umschichtungsprozesse), dürfte eine befriedigende Badewasserqualität nach den gegenwärtigen Bedingungen für beide Stauseen nicht erreicht werden. Vielmehr untermauern die Messergebnisse die am Eixendorfer See vorkommenden Algenblüten und machen solche auch für den neu aufgestauten Drachensee in Zukunft wahrscheinlich.

Aus den gemessenen TP-Konzentrationen und der ablaufenden Wassermenge ließ sich ein hektarbezogener jährlicher TP-Austrag von rund 0,5 kg TP/ha aus den beiden Einzugsge-

bieten errechnen. Überwiegend bestand dabei die TP-Fracht aus partikulärem Phosphor. Rund die Hälfte der gesamten Phosphorfracht stammte aus diffusen Einträgen. Beim Drachensee lag aufgrund der in Bezug auf die Höhe der TP-Belastung günstigeren Voraussetzungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung (mehr Grünlandanteil) und Intensität (geringerer GV-Besatz) der hektarbezogene TP-Eintrag pro Jahr (0,40 kg TP/ha) aus der LN unter dem des Eixendorfer Sees (0,56 kg TP). Daher wird anhand Tabelle 60 ersichtlich, dass hier auch andere Eintragspfade an der Gesamtfracht eine wesentliche Rolle spielten. Dies trifft vor allem für den TP-Eintrag aus Siedlungsabwässern zu, welcher zur gesamten in den Drachensee eingetragenen TP-Fracht zu 45 % (siehe Kapitel 4.4.6) beitrug, also etwa die gleiche Größenordnung wie die TP-Belastung aus der LN aufwies. Dieser Eintragspfad war beim Eixendorfer See mit 39 % etwas geringer (siehe Kapitel 4.4.1).

Die Ergebnisse zeigen, dass in beiden Einzugsgebieten künftig sowohl durch eine Optimierung der Abwassersituation als auch durch eine Reduzierung der P-Einträge aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen Möglichkeiten bestehen, die Wasserqualität zu verbessern.

Ein Ansatzpunkt aus landwirtschaftlicher Sicht ist vor allem die Minderung des P-Eintrags durch Erosion. Deren Anteil alleine am diffusen TP-Austrag aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen erreichten eine kalkulierte Größenordnung von etwa 60 % (siehe Tabelle 60). Dies bedeutet, dass sich der Fokus künftig darauf richten muss, gerade auf geneigten Ackerflächen in der Nähe von Oberflächengewässern das Erosionspotenzial noch weiter zu senken. Neben der Vermeidung von direkten Nährstoffeinträgen sind besonders wirkungsvolle Maßnahmen: Die Schaffung von Puffer- und Retentionsräumen sowie eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung durch die Optimierung der Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau, Mulch- und Direktsaat. Weiterhin ein standort- und pflanzenbedarfsgerechtes Düngemanagement, welches überhöhte P-Salden und Bodenvorräte vermeidet. Der intensiven Beratungsarbeit vor Ort (siehe Kapitel 4.9.1) ist es zu verdanken, dass hier durch eine erhöhte Akzeptanz von Maßnahmen des bayerischen Kulturlandschaftsprogramms (KuLaP) wichtige notwendige Schritte zur weiteren Optimierung der Gewässerqualität in der Praxis erkannt und eingeleitet wurden.

Während der Oberflächenabfluss von Grünlandflächen für die P-Einträge in beide Seen mit einer geschätzten Größenordnung von ca. max. 5 % kaum ins Gewicht fiel, traf dies für den vertikalen P-Austrag nicht zu. Die P-Austräge in das Grundwasser und solche aus Zwischenabfluss (Interflow) und Drainagen für die jeweils gesamte Acker- und Grünlandfläche wurden in beiden Einzugsgebieten auf knapp 40 % der Austräge aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen geschätzt (siehe Tabelle 60).

Ebenso zeigen die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts (siehe Kapitel 4.6), dass gerade Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen nicht nur im Ackerbau sondern auch auf Wirtschaftsgrünland über Drainagen zu hohen P-Austrägen führen können.

Im Gegensatz zur Erosion müssen hier jedoch produktionstechnischen Möglichkeiten zu einer deutlichen Verminderung der P-Austräge als vergleichsweise gering eingeschätzt werden. Zwar ist vorstellbar, dass mit einer Verringerung des leicht löslichen Phosphats (CAL-P) im Boden auch eine Verringerung des vertikalen P-Austrags einhergeht. In welchem Maße dies zutrifft, muss jedoch erst in weiteren Forschungsvorhaben quantifiziert werden. Außerdem ist eine Abreicherung von hohen P-Gehalten im Boden nur über einen langen Zeitraum möglich. Im Grünland könnte durch eine Optimierung der Gülletechnik gerade auf drainierten Flächen eine gewisse Verringerung des P-Austrags zu erreichen sein (siehe Kapitel 5.2). Es bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten, zu klären, ob dies auf nicht drainierten Flächen der Fall ist und wie hoch dieser Effekt zu bewerten ist.

Ohne die neueren Erkenntnisse aus Drainageversuchen und Lysimeteranlagen hätte der vertikale Austrag nicht hinlänglich genau abgeschätzt werden können. Die Bedeutung der Erosion für den P-Austrag wäre überschätzt worden.

5.1.2 Teileinzugsgebiete

Zwischen den vier Teileinzugsgebieten in der Eixendorfer Region schwankten die TP-Konzentrationen und TP-Frachten aus den Gesamtflächen (siehe Tabelle 59) in weiten Grenzen. Dabei wurde für Teileinzugsgebiete mit hohem Wald- und Grünlandanteil (Irlach, Breitenried) eine um rund die Hälfte niedrigere durchschnittliche TP-Fracht (0,19 bzw. 0,33 kg TP/ha und Jahr) gemessen als in den beiden anderen Teileinzugsgebieten (0,55 kg TP/ha und Jahr in Saxlmühle und Zillendorf).

Im Teileinzugsgebiet Saxlmühle stammten die insgesamt hohen durchschnittlichen TP-Frachten von 0,55 kg TP/ha und Jahr zu fast 90 % aus der Landwirtschaft. Sie nahmen damit – gemessen an dem Verhältnis der LN an der Gesamtfläche (76 %) – einen überproportional hohen Anteil ein. Die Erklärung dafür dürfte darin zu sehen sein, dass sich die landwirtschaftliche Nutzung in diesem Teileinzugsgebiet durch viehstarke Betriebe und einen hohen Anteil an vorwiegend mittel bis stark erosionsgefährdeten Ackerflächen auszeichnet. Dadurch wurden aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen (LN) pro Jahr 0,64 kg TP/ha (entsprechend 1,47 kg P₂O₅/ha) ausgetragen. Der ermittelte Phosphoraustrag aus der LN war damit tendenziell der höchste von allen Teileinzugsgebieten. Ebenfalls stellte ein kalkulierter Anteil der Erosion von fast zwei Drittel an der gesamten TP-Fracht aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen das Maximum der vier Teileinzugsgebiete dar.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich somit für vergleichbare Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Ackerbau in erosionsgefährdeten Lagen übertragen und belegen, dass in der Förderung von erosionsmindernden Maßnahmen wesentliche Ansatzpunkte für die Minderung von diffusen P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen zu sehen sind. Dies gerade deshalb, weil in vielen Fällen hohe P-Frachten mit hohen Abflussraten im Winterhalbjahr einhergingen, also in einer Jahreszeit, wo auf Ackerflächen häufig nur eine fehlende bis geringe Bodenbedeckung vorhanden ist.

Wie stark sich – neben einem hohen Waldanteil – eine ganzjährige Bodenbedeckung auf die Senkung der P-Frachten in Gewässer auswirken kann, zeigen die Teileinzugsgebiete Irlach und Breitenried. Hier wurden in beiden Fällen aus der Gesamtfläche mit durchschnittlich 0,33 bzw. 0,19 kg TP/ha und Jahr vergleichsweise niedrige P-Frachten ermittelt (siehe Tabelle 59). Auch die mittleren TP-Konzentrationen von 0,11 bzw. 0,09 mg TP/l erreichten in Irlach und Breitenried nur ca. die Hälfte der Größenordnung wie in den Teileinzugsgebieten Saxlmühle und Zillendorf (0,21 bzw. 0,22 mg TP/l).

Zu vermerken ist allerdings, dass auch in Irlach und Breitenried deutliche Unterschiede in Bezug auf die diffusen TP-Frachten aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche bestanden. Dabei ließ sich nach Tabelle 60 für das TEZG Irlach ein wesentlich höherer mittlerer TP-Austrag (0,47 kg TP/ha und Jahr) aus der LN ableiten als für das TEZG Breitenried (0,20 mg TP/ha und Jahr). Verständlich wird dies, wenn man berücksichtigt, dass beim TEZG Irlach der Ackeranteil an der LN – bei nicht unerheblicher Erosionsgefährdung – sowie der durchschnittliche Viehbesatz wesentlich höher lagen als beim TEZG Breitenried.

Mit einem P-Austrag aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) von durchschnittlich 0,20 kg TP/ha und Jahr (entsprechend 0,46 kg P₂O₅) wies das TEZG Breitenried den ge-

ringsten P-Austrag aller sechs (Teil-) Einzugsgebiete auf. Ursache dafür sind die extensive Form der Landwirtschaft, bestehend aus einem hohen Grünlandanteil (70 % der LN), welcher mit geringer Viehdichte (1,1 GV/ha) bewirtschaftet wird und Ackerflächen (30 % der LN), die zudem keine bedeutende Erosionsgefährdung aufwiesen. Die in Breitenried gewonnenen Erkenntnisse sind ein Beispiel dafür, bis zu welcher Grenze sich diffuse P-Belastungen aus der Landwirtschaft senken lassen. Aber auch hier besteht ein in der Relation (siehe Tabelle 60) bemerkenswert hoher vertikaler P-Austragspfad durch Sickerwasser, Zwischenabfluss und/oder evtl. Drainagen. Dieser dürfte sich in der Praxis kaum senken lassen, sofern nicht generell auf eine Düngung verzichtet wird oder spezielle Techniken bei der Gülleausbringung (siehe nachfolgendes Kapitel 5.2) verstärkt in gewässersensiblen Bereichen zum Einsatz kommen. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Fazit: Somit lässt sich unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die P-Konzentration im Zulauf nicht identisch mit der P-Konzentration im See sein muss, vorsichtig folgender Schluss ziehen: Nur extrem extensive, grünland- und waldreiche Landnutzungssysteme in Kombination mit einer optimalen Abwassersituation im Siedlungsbereich können eine für touristische Zwecke befriedigende Gewässerqualität des Eixendorfer Stausses und des neu aufgestauten Drachensees gewährleisten.

Gegenwärtig ist dies aber unter den gegebenen regionalen Verhältnissen nicht der Fall, wie die Ergebnisse zeigen. Vielmehr wurden selbst beim TEZG Breitenried bei weitgehender Ausschöpfung landwirtschaftlicher Extensivierungsmöglichkeit, einem hohem Grünland- und Waldanteil mit 0,08 mg TP/l wesentlich höhere P-Konzentrationen gemessen, als dies für mesotrophe Verhältnisse in stehenden Gewässern (ca. 0,03 mg TP/l) erforderlich wäre.

Hier zeigen sich Grenzen des möglichen Gewässerschutzes. Es zeigt sich aber auch die nicht vollständig aufzuhebende Diskrepanz zwischen einer seit langem bestehenden landwirtschaftlich betonten Flächennutzung unter gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen einerseits sowie den aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ebenfalls nachvollziehbaren gestiegenen Anforderungen (Freizeit, Tourismus) an die Gewässerqualität neu geschaffener (flacher) Seen, die ursprünglich primär dem Hochwasserschutz dienen sollten. Wohl aber weisen die Ergebnisse des Forschungsprojekts darauf hin, dass durchaus noch reale Optimierungsmöglichkeiten sowohl im kommunalen Abwassersektor als auch in der landwirtschaftlichen Produktionstechnik bestehen, die es auszuschöpfen gilt.

5.2 Beurteilung der Ergebnisse der Berechnungsversuche über drainiertem Grünland

5.2.1 Bedeutung des Zwischenabflusses als P-Eintragspfad

Während die Erosion als Eintragspfad für die P-Belastung in Oberflächengewässer bereits gemeinhin bekannt ist, hat die Bedeutung anderer P-Eintragspfade in Gewässer erst in jüngerer Zeit wissenschaftliche Beachtung erlangt. Kapitel 5.1 zeigt zusammenfassend, dass der kalkulierte Anteil an unterirdischen Wasserabflüssen (Grundwasser, Zwischenabfluss incl. Drainagen) im Gesamteinzugsgebiet bzw. den Teileinzugsgebieten in einer Größenordnung von etwa 35-65 % lag. Daraus ergeben sich Ansätze für Forschung und Beratung.

Im folgenden werden speziell der P-Austrag bei Grünland durch Zwischenabfluss über Makroporen („preferential flow“) nach unmittelbar auf Düngungsmaßnahmen folgenden Starkregenereignissen unter Dauergrünland sowie auf technische Möglichkeiten zu dessen Reduzierung diskutiert. Dabei kann in Übereinstimmung mit WITHERS et al., (2003) der P-Austrag aus Drainagen auch als Teil des Zwischenabflusses angesehen werden, wobei nach Ergebnissen der o.g. Autoren Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen mehr als 50 % des gesamten jährlichen P-Austrages bewirken können. Die nachfolgende Diskussion zeigt, dass diese Größenordnung durch die in Kapitel 4.6 dargestellten Ergebnisse bestätigt wurde. Bei deren Interpretation ist zu berücksichtigen, dass es sich aus übertragbarer Sicht um eine „worst case“-Situation, nämlich um einen starken (Gewitter-)Regen auf einer drainierten Grünlandfläche handelt und die Gülle kurz vorher ausgebracht wurde.

5.2.2 P-Austrag über Drainagen nach Starkregenereignissen (ohne Düngung)

Bevor auf die P-Austräge speziell nach Gülledüngung eingegangen wird, soll beurteilt werden, welche Schlüsse sich aus den Ergebnissen von simulierten Starkregenereignissen über Drainagen bei Parzellen, die vor dem Eintritt der Niederschläge nicht gedüngt wurden, ziehen lassen (siehe hierzu auch Variante „Ohne Gülle“ in den Tabellen 50 und 51 bzw. in Abb. 39).

Die Menge des ausgetragenen Gesamt-Phosphors (TP) und auch der löslichen Fraktion (DTP) hingen von der Abflusshöhe ($B = 0,64$ bzw. $0,70$) ab. Da diese trotz Vorbereitung und identischer Berechnungsmenge (30 l/m^2) in weiten Bereichen (ca. $1-16 \text{ l/m}^2$) in den einzelnen Wiederholungen schwankte, kann davon ausgegangen werden, dass vor allem kleinräumige, zeitlich schwankende Bodeneigenschaften (Feintextur, Porensystem, unterschiedliche Mikrostruktur der Oberflächen) der einzelnen Parzellen sich auf die Abflussmenge und damit auf die ausgetragene TP-Fracht ausgewirkt haben müssen. Es bleibt jedoch prinzipiell zu folgern, dass bei Drainagen mit der Zunahme der Abflussmenge ein Anstieg der aus der Bodenmatrix ausgetragenen Frachten an Gesamtphosphat bzw. löslichem Phosphat einhergeht.

Auch bei fehlender Düngung wurde alleine durch die gegebene Nährstoffversorgung des Bodens (Phosphatgehalt) bei Grünland P-Austräge aus den Drainagen festgestellt, was im Einklang mit Resultaten von DIEPOLDER ET AL. (2006) steht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel TP-Austräge von ca. 45 g pro Hektar und Berechnung aus der Drainage gemessen wurden. Das Maximum lag bei 82 g TP/ha (siehe Tabelle 50). Dies bedeutete, dass im Mittel bereits ein Starkregenereignis auf Grünland zu einem TP-Austrag führte, das in Relation zum mittleren jährlichen TP-Austrag der Eixendorfer Region (ca. $0,5-0,6 \text{ kg TP/ha}$) einen Anteil von durchschnittlich etwa 10 % erreichte.

Bemerkenswert ist ebenfalls, dass die Fracht an Gesamt-Phosphor (TP) zum überwiegenden Teil (75 %) aus der löslichen Fraktion (DTP) bestand. Daraus kann abgeleitet werden, dass auch die Höhe des löslichen bzw. des mit der Bodenuntersuchung (CAL-P) als pflanzenverfügbar bezeichneten Phosphorgehalts im Boden im Zusammenhang mit den physikalischen Bodeneigenschaften und der Höhe der Niederschläge eine Rolle auf das P-Austragsgeschehen über (Grünland-)Flächen drainierten spielen dürfte. Zu vermuten ist, dass dies ebenfalls für nicht drainierte, jedoch flachgründige Flächen zutrifft. In diesem Falle würde sich damit ein weiterer Ansatzpunkt zur Beratung in Einzugsgebieten sensibler Oberflächengewässer bezüglich der zu verschlagenden optimalen P-Versorgung bzw. P-Düngung ergeben. Es ist zu vermuten, dass gerade mineralische P-Dünger mit hohen Anteilen an wasserlöslichem Phosphat zu einem höheren Austragsrisiko an löslichem und damit „schnell bioverfügbarem“ Phosphor beitragen dürften. Es bleibt aber weiteren komplexen Untersuchungsreihen vorbehalten, die Bedeutung der Höhe der P-Versorgung und weiteren Düngerformen auf das Austragsverhalten des Phosphors quantitativ zu erfassen.

5.2.3 P-Austrag über Drainagen nach direkt auf konventionelle Gülledüngung (Prallteller) folgenden Starkregenereignissen

Von besonderer Bedeutung sind die Ergebnisse der Beregnungsversuche auf drainierten Wirtschaftsgrünland bei denjenigen Parzellen, wo praxisübliche Güllemengen ($25 \text{ m}^3/\text{ha}$) mit konventioneller Pralltellertechnik nach der Schnittnutzung ausgebracht wurden.

Im Mittel der neun durchgeführten Wiederholungen wurden durch die Gülledüngung rund 14 kg/ha Phosphor (TP), entsprechend einer Menge von $33 \text{ kg/ha P}_2\text{O}_5$ flächig appliziert, wovon im Drainagewasser im Mittel $0,300 \text{ kg TP/ha}$ ($0,687 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$) wiedergefunden wurden. Das Maximum bei einer Wiederholung lag bei $0,960 \text{ kg TP/ha}$ ($2,198 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$). Der überwiegende Anteil (60 %) der P-Fracht bestand aus partikulärem Phosphor. Auch bei den Pralltellervarianten nahm die Menge des am Drain ausgetragenen Phosphors mit der Höhe des Abflusses signifikant ($B = 0,52$) zu. Ein noch engerer Zusammenhang ($B = 0,84$) bestand zwischen Abflussmenge und der Höhe der löslichen P-Fracht (DTP). Bei den Pralltellervarianten wurde mit zunehmender Abflussmenge aus der Fläche ein rund 19 mal so hoher Anstieg der TP-Fracht bzw. ein ca. 10 mal so hoher Anstieg der DTP-Fracht gemessen als bei den Varianten ohne Gülle. Das heißt, beim Pralltellerverfahren war mit der Zunahme der aus der Fläche in der Drainage ausgetragene Wassermenge ein wesentlich stärkerer P-Austrag als bei fehlender Düngung verbunden.

Bezieht man die mittlere ausgetragene TP-Menge auf den mit der Gülle ausgebrachte Phosphor und berücksichtigt ferner die Höhe des P-Austrags ohne Düngung, so erhält man den scheinbaren Düngerverlust. Aus den Beregnungsversuchen konnte kalkuliert werden, dass dieser im Falle eines Starkregenereignisses im Mittel ca. 2 % der gedüngten P-Menge entsprach und im Maximalfall eine Höhe von rund 5 % erreichte.

Bemerkenswert ist, dass ein einzelnes Starkregenereignis nach flächiger Gülleausbringung mit Pralltellertechnik im Mittel zu einem P-Austrag führte, der etwa 50-60 % der jährlichen durchschnittlichen TP-Fracht (ca. $0,5\text{-}0,6 \text{ kg TP/ha}$ und Jahr) aus dem Eixendorfer Einzugsgebiet betrug und bei Extremwerten sogar deutlich über dieser lag.

Wie oben dargestellt, können P-Austräge durch Starkregenereignisse nach Düngungsmaßnahmen nicht nur im Ackerbau, sondern auch auf Wirtschaftsgrünland über Drainagen gerade im Einzugsbereich von sensiblen Oberflächengewässern ökologisch bedenklich sein. Allerdings stößt die daraus resultierende Konsequenz, Güllegaben vor zu erwartenden starken Niederschlägen zu unterlassen, in der Praxis auf Probleme wegen der nicht immer

möglichen Prognose. Außerdem besteht zweifelsohne ein gewisser Zielkonflikt zwischen der Abwägung von P-Verlusten in Oberflächengewässer und Ammoniak-Verlusten in die Luft.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist auch zu beachten, dass in Einzugsgebieten nur ein gewisser Anteil an Flächen drainiert ist und dass Starkregenereignisse in derartiger Höhe maximal nur wenige Male im Jahr erfolgen. Auch werden nicht alle Flächen zur gleichen Zeit vor einem Starkregen begüht.

5.2.4 P-Austrag über Drainagen nach auf Gülleddüngung folgenden Starkregenereignissen in Abhängigkeit von der Ausbringtechnik

Diejenigen Parzellen, bei denen die Gülle vor dem simulierten Starkregen flach in den Boden eingeschleift wurde, zeigten im Vergleich zur konventionellen Pralltellertechnik bei (im Mittel) gleichen P-Düngergaben und gleicher Abflussrate am Drän (ca. 11 % in Bezug auf die Niederschlagsmenge) einen rund 60 % geringeren Austrag an Gesamtphosphor bzw. einen ca. 47 % niedrigeren Austrag an löslichem Phosphor. Bei einer durchschnittlichen Gesamt-Fracht von 0,120 kg TP/ha bzw. 0,062 kg DTP/ha war der Anteil der löslichen P-Fraktion mit 54 % etwas höher als der partikuläre Anteil (siehe Tabelle 50).

Die mittlere P-Konzentration von 3,9 mg TP/l bzw. 2,0 mg DTP/l lag signifikant und deutlich unter den Ergebnissen der Pralltellertechnik, wo mittlere Konzentrationen von 12,0 mg TP/l bzw. 3,9 mg DTP gemessen wurden.

Sowohl bei den P-Frachten als auch bei den P-Konzentrationen lagen die relativen Streuungen um den Mittelwert (Variationskoeffizient) deutlich geringer als bei der Pralltellertechnik. Auch bei der Gülleinjektion hing die Höhe der TP-Fracht bzw. der DTP-Fracht von der Menge des abgeflossenen Wassers ab. Für den TP-Austrag war die Beziehung ($B = 0,86$) noch wesentlich enger als bei der Pralltellertechnik ($B = 0,52$). Im Vergleich zu dieser betrug bei der Gülleinjektion die Höhe des Anstiegs der P-Frachten in Bezug zur abgeflossenen Wassermenge (Steigungsmaß) nur 31 % (TP) bzw. 28 % (DTP) (siehe Tabelle 51). Das bedeutet, dass bei der Gülleinjektion sich im Vergleich zur Pralltellertechnik zunehmende Wasserabflüsse durch die Bodenmatrix in den Drain deutlich geringer auf die P-Fracht auswirkten. Im Mittel der Einzelversuche (siehe Tabelle 50) resultierte daraus ein 60 % geringeres Austragsrisiko an TP bzw. knapp 50 % geringeres Austragsrisiko an DTP. Gerade letzterem dürfte u. a. nach NEYER (1999) und BAUER et al. (2000) [zitiert bei KREMB et al., 2002] in Bezug auf Einträge an Phosphor in Seen und deren Bioverfügbarkeit eine größere Bedeutung zukommen als dem partikulärem Phosphor. Es zeigt sich aufgrund der teilweise starken Streuung der Einzelversuche in Abbildung 39 aber auch, dass ein Vorteil der Gülleinjektion zwar im Mittel, aber nicht immer gegeben war.

Warum die Gülleinjektion bei Starkregenereignissen gegenüber der Pralltellertechnik besser abschnitt, konnte nicht untersucht werden. Folgende Lösungsansätze scheinen aber plausibel: Bei einer flächigen Applikation wurde ein weitaus größerer Prozentsatz der Oberfläche benetzt als beim Schlitzverfahren, wo die Gülle in schmalen Streifen ausgebracht wurde. Damit trifft auch ein Starkregenereignis mehr Makroporensysteme mit „oben aufliegender“ Gülle. Hinzu könnte – zugunsten des Schlitzverfahren - der Effekt kommen, dass durch den Schlitzschuh zusätzlich das durchgängige Makroporensystem unter dem Gülleband „verschmiert“ wurde und damit weniger partikuläres Phosphor nach unten ausgetragen wurde (Filtereffekt). Außerdem ist die überfahrene Fläche je Parzelle beim Schlitzverfahren (Gülletrac im Hundegang) größer als bei Pralltellertechnik. Das

bedeutet, dass beim Schlitzverfahren prozentual mehr Fläche verdichtet wurde und somit unter Umständen mehr Makroporen oberflächlich verschlossen wurden.

5.2.5 Wissenswertes und Erfahrungen zur Gülleinjektion

Vor- und Nachteile der Gülleinjektion

Das Verfahren der Gülleinjektion auf Grünland ist in der Praxis nicht unumstritten. Als Nachteile werden aus ökonomischer und arbeitswirtschaftlicher Sicht die gegenüber der Prallteller- und Schleppschlauchtechnik wesentlich höheren Gerätekosten, der höhere Kraftbedarf, die geringere Flächenleistung sowie die Begrenzung der pro Hektar ausbringbaren Güllemenge (in der Regel maximal ca. 15-20 m³/ha) genannt.

Aus pflanzenbaulicher Sicht kommt hinzu, dass gerade bei häufiger Anwendung auf der gleichen Fläche bei einer Injektionstiefe von 4-5 cm die Wurzelmasse durchschnitten und die Grasnarbe aufgelockert wird. Der Einsatz bei nasser Witterung (Gewicht, Narbenschäden) und sehr trockenem Boden (Schlitze bleiben offen) ist problematisch. Diese Faktoren erhöhen die Wahrscheinlichkeit von nachhaltigen Narbenschäden und lassen die Verunkrautungsgefahr im Grünland ansteigen. Umfassende Untersuchungen im süddeutschen Raum, die gerade den pflanzenbaulichen Aspekt berücksichtigen, fehlen jedoch. Gleichwohl wird die tiefe Gülleinjektion von Grünlandexperten in der Regel abgelehnt. Im Falle einer flachen Injektion (1-3 cm) und eines den Witterungs-/Bodenverhältnissen angepassten Einsatzes müssen die genannten pflanzenbaulichen Nachteile jedoch nicht zum Tragen kommen, gerade dann, wenn das Gerät von einer erfahrenen Person bedient wird.

Unbestritten liegen die Vorteile des „Gülleschlitzens“ (flache Injektion) darin, dass die Gefahr der Futtermittelverschmutzung aufgrund der gegenüber Prallteller- und Schleppschlauchtechnik höheren Flexibilität beim Ausbringetermin nach der Ernte (Grasnarbe soll schon etwas nachgewachsen sein und wird durch die Schlitzschare geteilt) wesentlich verringert wird. Minderung von Ammoniakverlusten und fehlende Geruchsbelästigung bei der Ausbringung gelten als weitere Vorteile. Letzterer Aspekt ist gerade in der Nähe von Siedlungsgebieten und in Freizeit- bzw. Tourismusregionen ein nicht zu unterschätzender Pluspunkt. Ein weiterer Vorteil des Geräts liegt für Maschinengemeinschaften, darin, dass mit einer Technik Acker- und Grünlandflächen begüllt werden können.

Praxiserfahrungen aus der Region zur (flachen) Gülleinjektion

Interessant ist die Tatsache, dass das in der Region eingesetzte Schlitzgerät von Beratern, der Maschinengemeinschaft, dem Maschinenring und Landwirten überwiegend als positiv beurteilt wurde. Die aufgeführten möglichen pflanzenbaulichen Nachteile der Technik wurden nicht bestätigt, wobei nochmals darauf hingewiesen wird, dass in der Region die Gülle flach eingebracht wurde und dem Fahrstil des Fahrers und einem der Witterung angepassten Einsatz hohe Bedeutung zugemessen wurde.

Aufgrund der ausgelaufenen Förderung und der damit verbundenen hohen Kosten wird das Gerät derzeit jedoch nicht mehr in der Region eingesetzt. Es wurde allerdings beim Zeitpunkt der Anschaffung im Rahmen des KULAP-Programms „Bodennahe Gülleausbringung“ (damalige Förderung von 4,- DM/m³) der als Alternative zur Auswahl stehenden Schleppschlauchtechnik vorgezogen, wobei – wie bereits erwähnt – die Gründe in der Flexibilität des Ausbringetermins sowie der kaum vorhandenen Futtermittelverschmutzung gesehen wurden.

Nach Auskunft der ortsansässigen Berater würde im Falle gegebener ökonomischer Voraussetzungen auch heute aus fachlicher Sicht das Schlitzgerät wieder in der Region einge-

setzt werden. Eine weitere Verbreitung der Gülleinjektion dürfte somit eng an die Bereitstellung von Fördergeldern bzw. an die Möglichkeit eines flächenstarken, überbetrieblichen Einsatzes gebunden sein. Es bleibt in weiteren Forschungsvorhaben zu prüfen, inwieweit sich im Grünland ökonomische und pflanzenbaulich-ökologische Aspekte auch mit dem Verfahren der (billigeren und flächenstärkeren) Schleppschuhtechnik erfüllen lassen.

Fazit zu den Berechnungsversuche bei drainiertem Grünland und Ausblick:

Festzuhalten bleibt in Übereinstimmung mit WITHERS et al. (2003), dass bei Drainagen einzelne Starkregenereignissen zu über 50 % des durchschnittlichen jährlichen P-Austrags aus landwirtschaftlichen Flächen führen können. Von der ausgebrachten P-Düngermenge wurden bis zu 5 % in den Drainagen wiedergefunden.

Das Austragsrisiko einer drainierten Grünlandfläche kann durch Schlitztechnik (flache Gülleinjektion) gegenüber der oberflächigen Ausbringung (Prallteller) deutlich gemindert werden. Die Gülleinjektion könnte deshalb in Einzugsgebieten von ökologisch sensiblen Gewässern mit einem hohem Anteil drainierter Grünlandflächen eine wirkungsvolle Möglichkeit bieten, die P-Einträge zu senken. Die Anwendung der Schlitztechnik kann jedoch immer nur ein kleiner Mosaikstein in einem Bündel von Maßnahmen zur Reduzierung des P-Austrags aus landwirtschaftlichen Nutzflächen sein.

Bei der Gülleinjektion sind sowohl betriebswirtschaftliche Aspekte (teurere Technik, höherer Verschleiß, geringere Schlagkraft) und bei Grünland – speziell bei tiefer Injektion - evtl. auch pflanzenbauliche Gesichtspunkte (mögliche Narbenverletzungen, evtl. Zunahme von Verunkrautungen) zu erwägen. Diese Aspekte gilt es künftig in weiteren Projekten gezielt zu untersuchen. Unabhängig davon scheint jedoch eine Förderung dieser Technik und/oder der Schleppschuhtechnik gerade in Regionen mit ökologisch sensiblen Gewässern zielführend und kann einen Beitrag zur länderübergreifenden Gesamtaufgabe „Saubere Seen – Saubere Gewässer“ leisten.

Inwieweit die Verminderung von P-Verlusten auch für andere nicht-flächige Applikationstechniken (Schleppschlauch und Schleppschuh) zutrifft, konnte bislang aus Gründen des Versuchsumfanges nicht geklärt werden. Ebenfalls konnte trotz großer Bemühungen noch nicht geklärt werden, welchen Einfluss die Höhe der Bodenversorgung auf den vertikalen Nährstoffaustrag bei Acker und Grünland hat. Hier besteht deshalb weiterer Forschungsbedarf.

5.3 Beurteilung der Ergebnisse der Beregnungsversuche zur Wirkung von ungedüngten Randstreifen bei hängigem Grünland in Gewässernähe

Die Ergebnisse dieses Teilprojektes zeigen, dass Starkregenereignisse nach Gülledüngung in hängigem Gelände zu einem erheblichen Anstieg der P-Konzentration des vom Grünland abfließenden Wassers führen. Im Versuch betrug die Konzentrationszunahme im Mittel ungefähr das Zehnfache gegenüber der ungedüngten Kontrollvariante. Damit ging bei Gülledüngung (ohne Randstreifen) in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität ein mittlerer P-Austrag von 0,15 bis 0,55 kg Gesamt-P (TP), entsprechend 0,34 bis 1,27 kg P₂O₅ einher. Rechnerisch wurden cirka 1-4 % des kurz vorher gedüngten Gülle-Phosphors ausgetragen. Dass einzelne Extremereignisse (Gülle plus Starkregen) als ausgesprochene P-Belastungsspitzen zu werten sind, zeigt auch der Vergleich mit den mittleren jährlichen P-Frachten aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Untersuchungsgebiet. Diese lagen bei Teileinzugsgebieten mit vorwiegender Grünlandnutzung bei 0,2-0,55 kg TP/ha und Jahr und damit in derselben Größenordnung wie die o.g. mittleren P-Austräge eines einzelnen Starkregenereignisses.

Im Folgenden werden Methodik und Ergebnisse der Beregnungsversuche auf hängigem Grünland diskutiert. Dabei wird speziell auf die Bedeutung von ungedüngten Randstreifen für den Gewässerschutz eingegangen. Ebenfalls wird hinsichtlich ihres Beitrags zum Gewässerschutz ein (vorsichtiger) Vergleich zur Schlitztechnik auf drainierten Flächen versucht.

5.3.1 Aspekte zur gewählten Methodik

In Rahmen des Eixendorfer Teilprojektes wurden mit künstlicher Beregnung gezielt Starkniederschläge mit variiertem Intensität erzeugt. Durch diese unter Punkt 3.4 näher beschriebene Methodik war es innerhalb einer Vegetationsperiode möglich, bei den drei Prüfvarianten (ungedüngt, Gülledüngung ohne und mit Randstreifen) eine in der Regel ausreichende Zahl an Wiederholungen für statistisch absicherbare Aussagen (insb. Mittelwertsvergleiche) zu gewinnen. Dies gelang trotz der festgestellten großen Variation der Einzelergebnisse innerhalb der Varianten.

Auch bei weiteren Forschungsvorhaben der LfL wurden/werden P-Austräge durch Oberflächenabfluss vom Grünland gemessen. So versuchten POMMER ET AL. (2001), den Einfluss unterschiedlichen Düngerarten und ihren Beitrag zur Gewässerbelastung zu quantifizieren. Die Wirkung von Randstreifen unter den Standortverhältnissen des Allgäuer Moränenhügellandes ist Gegenstand einer noch laufenden Versuchsserie (DIEPOLDER, RASCHBACHER UND SCHRÖPEL, unveröffentlicht). Diese lässt aber nach acht Versuchsjahren ohne künstliche Beregnung noch keine ausreichend gesicherten Aussagen zu, wenn gleich sich auch hier der positive Effekt eines ungedüngten 5m-Randstreifens vor dem Vorfluter zu bestätigen scheint.

Beide Erfahrungen mit Abschwemmungsversuchen unter ausschließlich standortgegebenen Niederschlagsverhältnissen zeigen, dass vergleichsweise lange Versuchszeiträume mit einer ausreichenden Zahl an Abschwemmungsereignissen erforderlich sind, um hinreichend genaue Mittelwertsvergleiche zwischen Bewirtschaftungsvarianten zu erhalten.

Vereinfacht zusammengefasst geht aus beiden Versuchsserien hervor, dass bei hängigem Grünland im Mittel rund 90 % der Wassermenge eines Starkniederschlagsereignisses von 30 l/m² und darüber im Boden versickern und nur ca. 10 % oberflächlich abfließen. SCHRÖPEL (2002) gibt aus seinen Erfahrungen an, dass bei aufnahmefähigem Boden etwa

30-40 mm Niederschlag fallen müssen, um ein Abschwemmereignis zu erzeugen, bei gefrorenem Boden genügen schon 7 mm. Demnach deckten die im Eixendorfer Projekt gewählten Gesamt-Beregnungsmengen von ca. 30-50 mm bzw. Beregnungsmengen von 5-30 mm nach Abflussbeginn eine weite Spannweite von abflussrelevanten Niederschlagsereignissen ab - vor allem aber ließen sie eine Datengewinnung in relativ kurzer Zeit zu.

5.3.2 Wirkung des Randstreifens bei simulierten Starkregenereignissen

Die Anlage eines 5 m breiten ungedüngten Randstreifens zwischen der begüllten Fläche und der Auffangvorrichtung bewirkte bei allen Beregnungsstufen eine signifikante Minderung der Konzentrationen an Gesamtphosphor (TP) bzw. löslichem Phosphor (DTP) des abgeflossenen Wassers. Dadurch konnte eine erhebliche Reduzierung der ausgetragenen P-Frachten erreicht werden. Verglichen mit der Variante ohne Randstreifen lag dieser für den Gewässerschutz positive Randstreifen effekt in Bezug auf die TP-Konzentration in einer Höhe von 70-75 % bei niedriger bzw. bei 65-65 % bei hoher Beregnungsintensität. In Bezug auf die TP-Fracht bewegte er sich sogar in einem Rahmen von ca. 80-90 % bzw. 65-75 %. Relativ betrachtet nahm also die Wirkung des Randstreifens in der Tendenz bei höherer Beregnungsmenge nach Abflussbeginn etwas ab.

Absolut gesehen wurde jedoch durch den ungedüngten Randstreifen umso mehr Phosphor (sowohl Gesamt-P als auch löslicher Phosphor) auf dem Grünland zurückgehalten, je intensiver beregnet wurde. Dieser Rückhalt lag bei Beregnungsmengen von 5-10 l/m² nach Abflussbeginn in einer Größenordnung von ca. 135-155 g TP/ha. Dagegen stieg bei Beregnungsmengen von 25-30 l/m² der Rückhalt auf 340-365 g TP/ha an.

Rein statistisch gesehen bestanden weder bei den P-Frachten noch bei den P-Konzentrationen Unterschiede zwischen der Variante mit Randstreifen und der ungedüngten Kontrolle. Dennoch geht zumindest tendenziell aus den Ergebnissen deutlich hervor, dass der Randstreifen den gedüngten Phosphor nach einem Starkniederschlag nicht vollständig zurückhalten konnte. Konzentrationen und Frachten lagen rund um das zwei- bis fünffache über der ungedüngten Kontrollvariante.

Interessant ist, dass der ausgetragene Phosphor bei allen Beregnungsintensitäten vorwiegend (meist zu ca. 60-70 %) aus löslichem Phosphor bestand, mit leicht zunehmender Tendenz bei höheren Niederschlagsmengen. Unterschiede zwischen den drei Varianten bestanden jedoch kaum; nur der Anteil an DTP bei der ungedüngten Kontrolle war tendenziell geringfügig etwas höher, ließ sich jedoch in keinem Fall absichern. Dieses Resultat eines P-Austrag in überwiegender Form von leicht löslichem (und damit sehr reaktivem) Phosphor ist auch aus folgenden Gründen bemerkenswert: Zum Einen besteht der in der Michviehgülle enthaltene Phosphor vorwiegend (ca. 65-75 %) aus partikulärem Phosphor (siehe auch Gülleuntersuchungen der beiden Versuchsserien in Material und Methoden). Zum Anderen zeigen die Beregnungsversuche über drainiertem Grünland, dass bei der Gülledüngung mit dem Prallteller durchschnittlich 60 % des durch Starkregen vertikal ausgetragenen Phosphors in partikulärer Form vorlag, bei der flachen Gülleinjektion waren es immerhin etwas über 45 %. Daraus ergibt sich folgende mögliche Interpretation: Starkregenereignisse führen bei drainiertem, kurz vorher mit Gülle gedüngtem Wirtschaftsgrünland zu einem „Durchdrücken“ partikulärer Teile im Makroporensystem. Beim Oberflächenabfluss kommt es hingegen verstärkt zu einem „Auskämmeffekt“ durch die Grasstoppln, so dass im Abfluss vorwiegend leicht löslicher Phosphor zu finden ist.

Ergänzend sei noch hinzugefügt, dass die simulierten Starkregenereignisse auf hängigen Grünlandflächen bereits ohne vorherige Gülledüngung zu oberflächlichen P-Austrägen

fürten. Im Versuch wurden mit zunehmender Beregnungsmenge Frachten von 8-39 g/ha Gesamt-P (TP) gemessen. Die TP-Konzentration des abgeflossenen Wassers lag überwiegend bei rund 500-600 µg TP/l. Würde – rein hypothetisch betrachtet - ein Gewässer ausschließlich aus diesem Oberflächenabfluss (ohne vorherige Düngung!) gespeist, so läge damit seine P-Konzentration um das 25 - 30fache höher als der Grenzwert von 20 µg TP/l, den VOLLENWEIDER (1982) für eine tragbare Belastung des Gewässerzuflusses angibt.

Fazit:

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei hängigem Grünland ungedüngte 5 m breite Randstreifen eine signifikante Reduzierung des P-Eintragspfades „Oberflächenabfluss vom Grünland“ bewirken können und damit einen wertvollen Beitrag zum Gewässerschutz leisten können. Dies gerade in Gebieten, die durch hängige Flächen und eine hohe Gewässerdichte geprägt sind.

5.3.3 Wirkung des Randstreifens im Vergleich zur flachen Gülleinjektion bei Starkregenereignissen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei auf Gülleapplikation folgenden Starkregenereignissen sowohl ungedüngte Randstreifen bei Hanglagen als auch die flache Gülleinjektion („Schlitzen“) bei drainierten Flächen die Höhe der P-Austräge wesentlich mindern können. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im Jahresverlauf in der Regel nur wenige Starkregen fallen und die Wahrscheinlichkeit gering ist, dass kurz zuvor auch gedüngt wurde, sind beide Maßnahmen als wertvolle „Mosaiksteine“ in Hinblick auf den vorbeugenden Oberflächengewässerschutz zu werten. Ihre Bedeutung dürfte aufgrund des fortschreitenden Klimawandels dabei noch zunehmen. Schon aus diesen Gründen sowie auch im Zuge der Umsetzung der Ziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) erscheint eine Förderung dieser Maßnahmen sinnvoll.

Für eine effektive und effiziente Umsetzung in die breite landwirtschaftliche Praxis, insbesondere bei sensiblen Gebieten mit P-belasteten Oberflächengewässern spielen sicherlich neben der Förderkulisse sowohl die Standortgegebenheiten (Anteil drainierter und/oder hängiger Grünlandflächen, die an Vorfluter oder Seen angrenzen) als auch die lokalen technischen Voraussetzungen (z.B. Schlagkraft; Auslastungsgrad einer teureren Technik wie beim Schlitzgerät; Einfluss auf die nachhaltige Qualität der Grasnarbe bei häufiger Nutzung) eine Rolle. Unter letzterem Aspekt erscheint der Randstreifen insofern als die leichter umsetzbarere Maßnahme, da die Anschaffung einer neuen Technik nicht erforderlich ist. Seine Bedeutung für die Reduzierung der aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche insgesamt ausgetragenen P-Fracht in den Untersuchungsgebieten des Forschungsprojekts sollte jedoch nicht überbewertet werden. Der P-Austrag durch Oberflächenabfluss vom Grünland nimmt in den untersuchten Einzugsgebieten mit 2-14 % nur einen geringen Anteil an allen P-Austragspfaden ein.

Abschließend wird trotz methodischer Einschränkungen noch versucht, in Hinblick auf die Effektivität (Reduzierung der P-Belastungsspitzen) einen Vergleich beider untersuchter Verfahren vorzunehmen. Da die Beregnungsversuche über drainiertem Grünland generell mit einheitlicher und „durchgehender“ Beregnungsmenge/ –intensität erfolgten, bei den Beregnungsversuchen zu hängigem Grünland jedoch eine sukzessive Steigerung der Beregnungsmenge nach Abflussbeginn zu Grunde lag, sind streng genommen insgesamt die Ergebnisse beider Verfahren nicht direkt miteinander vergleichbar. Dies auch, weil beide

Versuchsserien auf unterschiedlichen Standorten stattfanden. Dennoch soll nachfolgend ein (vorsichtiger) Vergleich gezogen werden.

So wurde unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei beiden Verfahren im Mittel ähnliche P-Mengen über Gülle (ca. 12-14,4 kg TP/ha) ausgebracht wurden und die mittleren Abflüsse der gedüngten Drainageparzellen bei einer Beregnungsmenge von 30 l/m² bei Güllendüngung 3,0 bzw. 3,4 l/m² lagen (siehe Tabelle 50), aus den Ergebnissen des Abschwemmungsversuchs (siehe Tabelle 52) diejenige Beregnungsstufe zu einem Vergleich herangezogen, die in Bezug auf die Abflussmenge eine ähnliche Höhe aufwies. Dies traf am ehesten für die Beregnungsstufe „15 l/m² nach Abflussbeginn“ zu, welcher mittlere Gesamtberegnungsmengen von 38 bzw. 39 l/m² zugrunde lagen.

Der vereinfachte Vergleich lautet also: Welches Verfahren bringt - bei ähnlichen P-Gaben über Gülle - in Bezug auf die Reduzierung der P-Belastung nach Starkregenereignissen im Grünland mehr - „flache Gülleinjektion bei drainierten Grünlandflächen“ oder „ungedüngte Randstreifen bei hängigen Grünlandflächen“? Dies unter der Annahme, dass in etwa dieselbe Wassermenge vertikal bzw. oberflächlich abfließt.

Tab. 61: Vergleich zwischen der Wirkung von flacher Gülleinjektion und ungedüngten Randstreifen in Bezug auf Minderung der P-Frachten und der P-Konzentrationen gegenüber flächiger Gülleapplikation

Parameter	Drainage		Oberflächenabfluss	
	breitverteilte Gülle	flache Gülleinjektion	breitvert. Gülle ohne Randstreifen	mit unged. Randstreifen
Beregnungsmenge (l/m ²)	30		39	38
Abflussmenge (l/m ²)	3,0	3,4	4,3	3,0
TP-Fracht (g/ha)	300	120	255	54
DTP-Fracht (g/ha)	115	62	160	35
DTP/TP (%)	40	54	63	61
TP-Konzentration (mg/l)	12,0	3,9	5,3	1,6
DTP-Konzentration (mg/l)	3,9	2,0	3,3	1,0

Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Tabelle 61 zusammengefasst. Die Werte zeigen, dass die TP-Fracht bei flacher Schlitztechnik um 60 %, beim Randstreifen jedoch um 79 % reduziert wurde. Die Reduktionsraten bei der DTP-Fracht betragen 46 % bzw. 78 %.

Weiterhin wurden im aufgefangenen Wasser der Variante „Randstreifen“ deutlich niedrigere TP- und DTP-Konzentrationen als bei der „flachen Gülleinjektion“ gemessen. Daraus kann vorsichtig geschlossen werden, dass ungedüngte Randstreifen nicht nur in Hinblick auf die Akzeptanz sondern auch auf die Reduzierung des P-Belastungsspitzen (Fracht und Konzentration) das effektivere Verfahren sein dürften.

5.4 Ableitung von übertragbaren Maßnahmen zur Reduzierung von P-Einträgen in Oberflächengewässer

Die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sieht bis zum Jahre 2009 die Erstellung von (regionalen) Bewirtschaftungsplänen und bis zum Jahr 2012 die Umsetzung von Maßnahmenprogrammen vor. Eine wesentliche erste Grundlage für die Erstellung von Bewirtschaftungsplänen und den sich daraus ergebenden spezifischen Maßnahmenprogrammen dürften allgemeine Maßnahmenkataloge sein, in der alle dem Gewässerschutz dienenden bekannten Verfahren benannt und beurteilt werden, die zu einer Minderung von Erosion, Stickstoff-, Phosphor- und Pflanzenschutzmittel-Belastung in die Gewässer beitragen können. Dies umfasst sowohl den landwirtschaftlichen (Minderung diffuser Einträge) als auch den nicht-landwirtschaftlichen Sektor (Minderung punktueller Einträge). Für konkrete Zielgebiete, bei denen eine Verbesserung des ökologischen Zustands der Gewässer angestrebt wird, können in einem zweiten Schritt diese allgemeinen Maßnahmenkataloge dann unter Berücksichtigung der jeweiligen regionalen Begebenheiten, Umsetzbarkeit und Effizienz speziell angepasst und umgesetzt werden. Derzeit bemühen sich Fachgruppen im Bundesgebiet um die Erstellung von länderspezifischen bzw. bundesweiten Maßnahmenkatalogen.

Bereits Ende 2005 wurde in Zusammenarbeit der LfL mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) ein Maßnahmenkatalog „Gewässerschonende Landbewirtschaftung“ erarbeitet (u.a. in www.LfL.bayern.de/IAB). Dieser enthält als Werkzeuge zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie eine Sammlung von 58 Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers und der Oberflächengewässer vor Nährstoff-, Boden- und Pflanzenschutzmitteleinträgen. Dabei werden die einzelnen Maßnahmen aus den Bereichen Bewirtschaftung, Düngung, Fütterung, Technik und Beratung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ihrer Kontrollierbarkeit beurteilt. Bezüglich des Gewässerschutzes wird ferner unterschieden zwischen der primären Wirkung auf das Grundwasser (Potenzielle Verbesserung der N-Belastung) und der primären Wirkung auf Oberflächengewässer (Potenzielle Verbesserung der Phosphor- und Bodeneinträge). Das Ziel, diesen umfassenden Maßnahmenkatalog in der Beratung vorzustellen und für spezielle Einzugsgebiete anzupassen, wird derzeit von der Landwirtschaft- und Wasserwirtschaftsverwaltung in verschiedenen Modellprojekten erprobt („Dialogorientiertes Maßnahmenkonzept Vils-Rott“, „Maßnahmenprogramm Grundwasserkörper IVA 1“, „Nachhaltige Landwirtschaft in der euRegionalen Seenlandschaft“).

Tabelle 62 stellt eine Zusammenfassung und Bewertung derjenigen 42 Maßnahmen aus dem Katalog dar, bei denen die Reduzierung der P-Austräge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen im Vordergrund steht. Ergänzend wird auch auf die Reduzierung der N-Belastung eingegangen. Wie die Legende zu Tabelle 62 zeigt wird sowohl die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen als auch die Kontrollierbarkeit ihrer Anwendung mit einer vierstufigen Werteskala qualitativ beschrieben. Maßnahmen, bei denen die potenzielle Verbesserung der P-Belastungssituation als groß (++) oder sehr groß (+++) angesehen wird, sind fett hervorgehoben.

Tab. 62: Katalog zur Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des P-Austrags (ggf. auch des N-Austrags) bei landwirtschaftlich genutzten Flächen; besonders wirkungsvolle Maßnahmen in Bezug auf den P-Austrag sind **fett** herausgehoben

Nr	Art der Maßnahme	Primäre Wirkung auf Oberflächengewässer: P-Austräge und Bodenausträge	zusätzliche Wirkung auf N-Austrag ins Grundw.	Kontrollierbarkeit	Anmerkung
Bewirtschaftungsmaßnahmen					
1	Bewirtschaftung nach den Kriterien des Ökologischen Landbaus	++	++	+++	
2	Umwandlung von Acker in Grünland	++(+)*	+++	+++	* bei Hanglage
3	Stillegung mit gezielter Begrünung	++	++	+++	
4	Stillegung mit Selbstbegrünung	+	+	+++	
5	Verzicht auf Grünlandumbruch	++(+)*	+++		* bei Hanglage
6	Umbruchlose Grünlanderneuerung	++	++	++	
7	Wiesennachsaat auf lückigen Grünlandbeständen	++	++	+	
8	Umbruch von Feldfutter nur im Frühjahr	+	+	++	
9	Winterbegrünung: Zwischenfruchtanbau (ohne Leguminosen); Einarbeitung im Frühjahr	++(+)*	++(+)*		sehr hohe Wirkung nur: Bei P Hanglagen, bei N winterharte Zwischenfrüchte
10	Zwischenfruchtanbau (ohne Leguminosen), Einarbeitung im Herbst	+	+	++	
11	Zwischenfruchtanbau (mit Leguminosen), Einarbeitung im Herbst	+	0	++	
12	Mulchsaat bei Reihenkulturen, d.h. Bestellung nach nichtwendender Bodenbearbeitung in ein Saatbett mit Pflanzenresten, die erosionsmindernde Wirkung haben.	++(+)*	++	+++	* sehr hohe Wirkung nur in erosionsgefährdeten Lagen oder Überschwemmungsgebieten
13	Direktsaat, d.h. Bestellung mit spezieller Direktsaatmaschine ohne Saatbettbereitung in die Reste der Vorkultur bzw. einen abgestorbenen Pflanzenbestand.	++(+)*	+	+++	
14	Ausgeglichene Nährstoffbilanz	++	++	0	
15	Untersaat, wenn Mais nach Mais	++	+	++	

Tabelle 62: Fortsetzung

Nr	Art der Maßnahme	Primäre Wirkung auf Oberflächengewässer: P-Austräge und Bodenausträge	zusätzliche Wirkung auf N-Austrag ins Grundw.	Kontrollierbarkeit	Anmerkung
16	Stilllegung von Ackerflächen mit einer Bodenzahl unter 20	+	+	+++	
17	Lange Hänge verkürzen (Ranken, Gräben, Dämme, Furchen)	+++	0	+++	
18	Mindestens 15 , breiter Grünstreifen im Hangbereich als Erosionsschutz	+	0	+++	
19	Gewässerrandstreifen	+	0	+++	
20	Anlage von begrünten Abflusswegen in Geländemulden	+++	0	+++	
21	Ausreichender Abstand von Gewässern bei Weidehaltung	++	++	+++	
22	Bewirtschaftung quer zum Hang	+	0	+++	
23	Onland pflügen	+	0	++	
24	Wechsel von Sommerung und Winterung quer zur Hanglänge	++	0	++	
25	Zertifizierungssysteme	++	++	+++	
Düngung					
26	Verzicht auf jegliche Düngung	++	++	++	
27	Verzicht auf mineralische Düngung	+	++	++	
28	Begrenzung der Gülleaufbringung	++	++	0	
29	Gülleabgabe	++	++	0	
30	Keine Wirtschafts- und andere P-Dünger bei erhöhten P-Gehalten im Boden (Gehaltssklassen D und E)	+(+)	0	++	* hohe Wirkung nur bei erosionsgefährdeten Lagen
31	Keine P-haltige Dünger auf moorige oder anmoorige Flächen	++	0	+	
32	Unterfußdüngung	0	+	+	
33	Ausreichender Abstand von Gewässern	++(+)	+	+	* sehr hohe Wirkung nur in erosionsgefährdeten Lagen

Tabelle 62: Fortsetzung

Nr	Art der Maßnahme	Primäre Wirkung auf Oberflächengewässer: P-Austräge und Bodenausträge	zusätzliche Wirkung auf N-Austrag ins Grundw.	Kontrollierbarkeit	Anmerkung
Fütterung					
34	N-, P-reduzierte Fütterung bei Schweinen und Geflügel	+	+	++	
35	Phasenfütterung bei Schweinen und Geflügel	+	+	++	
Technik					
36	Ausreichend Güllelagerraum	++	++	+++	
37	Rückbau von Entwässerungseinrichtungen / Drainagen	++	+	+++	
38	Reduzierung des Bodendrucks (z. B. Reifendruckregelanlage, Breitreifen)	+	0	+++	
39	Einsatz spezieller Ausbringtechnik für Gülle bei notwendiger Kopfdüngung oder zu Grünland (Gülleinjektion, Schleppschuh, Schleppschlauch)	++	0	+++	
40	Teilflächenspezifische Bewirtschaftung	+	+	++	
Beratung					
41	Einzelbetriebliche Beratung	+++	+++	+++	
42	Maßnahmenbezogene Förderung (z. B. freiwillige Vereinbarungen, Kooperationen)	+++	+++	+++	

Legende:

Beurteilung der potenziellen Verbesserung der Belastungssituation	Beurteilung der Kontrollierbarkeit
+++ = sehr groß	+++ = sehr gut
++ = groß	++ = gut
0 = gering	0 = gering
0 = keine nennenswerte Wirkung	0 = Kontrollen sehr aufwändig

Im folgenden sind - die in der Beratung im Rahmen dieses Projektes angewandten - besonders effizienten produktionstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung der P-Austräge aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen dargestellt:

- Anstreben einer möglichst ganzjährigen Bodenbedeckung durch Fruchtfolgegestaltung, Zwischenfruchtanbau, Winterbegrünung, Mulchsaat, Direktsaat, Untersaaten in maisbetonten Fruchtfolgen; gezielte Begrünung bei Stilllegung von Ackerflächen,
- das Verkürzen langer, erosiver Hänge durch Ranken, Gräben, Dämme, Furchen sowie dem Wechsel von Sommerung/Winterung quer zur Hanglänge, Errichtung von begrüneten Abflusswegen, Schaffung von Puffer- und Retentionsräumen,
- die Umwandlung von Acker in Grünland (falls Verwertung des Grünlands möglich),
- im Grünland der Verzicht auf Umbruch bzw. die umbruchlose Grünlanderneuerung und die Wiesennachsaat bei lückigen Grünlandbeständen,
- ein ausreichender Gewässerabstand bei Düngung und Weidehaltung,
- die Begrenzung oder der Verzicht P-haltiger Dünger bei erhöhten P-Gehalten im Boden (Gehaltsklassen D und E) oder bei Anmoor-/Moorböden,
- das Anstreben einer ausgeglichenen P-Bilanz (Futter-, Gülle- und Mineraldüngermanagement), Errechnen und Beurteilen von P-Salden,
- angepasstes Güllemanagement (Gülleverteipläne, Begrenzung der Gülleaufbringung in sensiblen Bereichen, Schaffung von ausreichend Lagerraum, ggf. Gülleabgabe, Einsatz spezieller Technik zur Gülleausbringung),
- Bewirtschaftungsmaßnahmen nach den Kriterien des Ökologischen Landbaus (Fruchtfolgegestaltung, Verzicht/Einschränkung bei mineralischer Düngung).

Es sei gerade bei der Umsetzung von Maßnahmen, insbesondere solchen, die über die Maßgaben des landwirtschaftlichen Fachrechts (u. a. Düngeverordnung) hinausgehen und bei denen die Möglichkeiten und Grenzen ökologischer und ökonomischer Ansprüche von teilweise unterschiedlicher Gruppen möglichst weitgehend in Einklang gebracht werden sollen, auf die Bedeutung staatlicher Fördermaßnahmen hingewiesen.

Hingewiesen sei auch in diesem Zusammenhang nochmals – gerade in einer Phase sehr knapper personeller Ressourcen – auf die tragende Rolle einer umfassenden Beratung, die sowohl regionalspezifischen wie einzelbetrieblichen Erwägungen in Einzugsgebieten mit sensiblen Gewässerstrukturen Rechnung trägt. Nach Erkenntnissen aus diesem und weiteren Projekt der LfL im Gewässerschutzbereich (HEGE UND RASCHBACHER, 2004) stellt die einzelbetriebliche Beratung gerade unter Einbeziehung maßnahmenbezogener Förderungsmöglichkeiten einen Eckpfeiler im Gewässerschutz dar.

6 Literaturverzeichnis

- Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, (2001): Stellungnahme der LBP an die Regierung der Oberpfalz bezüglich der Studie zur Nährstoffbelastung des geplanten Drachensees bei Furth im Wald.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2003): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland; 7. überarbeitete Auflage, Hrsg. LfL, 81 Seiten, 2003; als Internetversion (www.LfL.bayern.de/IAB/).
- Bunza, G., Deisenhofer, H.E., Karl, J., Porzelt, M. und Riedl, J. (1985): 1. Der künstliche Starkniederschlag der transportablen Beregnungsanlage nach Karl und Toldrian. Beiträge zu Oberflächenabfluß und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen, 71. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1-35 pp.
- Diepolder, M., Raschbacher, S., Ebertseder, Th. (2005): P-Austrag aus Drainagen unter Wirtschaftsgrünland – Versuchsergebnisse bei Düngerapplikation unmittelbar vor einem Starkregenereignis; Schule und Beratung, Heft 12/05, Seite III-6 bis III-11, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten.
- Diepolder, M., Peretzki, F., Heigl, L., Jakob, B. (2006): Nitrat- und Phosphorbelastung des Sickerwassers bei Acker- und Grünlandnutzung – Ergebnisse von zwei Saugkerzenanlagen in Bayern; Schule und Beratung, Heft 4/06, Seite III-3 bis III-10, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten.
- Friedl, H. (2002): Bestimmung von aktuellen Fruchtfolgen aus INVEKOS-Daten der Landwirtschaftsverwaltung mit Hilfe eines GIS – Diplomarbeit angefertigt am Institut für Geographie der Universität Regensburg bei PD Dr. habil. C. Jürgens.
- Hege, U. und Raschbacher, S. (2004): Modellgebiete für eine grundwasserschonende Landbewirtschaftung - Bericht nach 10-jähriger Laufzeit 1993-2002; Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Hsg.), Heft 10/2004; ISSN 1611-4159; auch unter www.LfL.bayern.de/IAB.
- Jürgens, C. (2006): Verringerung der Nährstoffeinträge durch Bodenerosion in die Chamb; Vortrag der Ruhr-Universität Bochum bei der Tagung „Grenzüberschreitender Gewässerschutz für den Drachensee“ am 08. März in Furth im Wald.
- Lerch, A. (2006): Der Drachensee in Furth im Wald; Vortrag des Wasserwirtschaftsamts Regensburg bei der Tagung „Grenzüberschreitender Gewässerschutz für den Drachensee“ am 08. März in Furth im Wald.
- Kreimb, St., Honisch, M., Raschbacher, S. (2002): Ursachen von Phosphatbelastungen der Landwirtschaft in Seen mit Acker- und Grünlandnutzung im Einzugsgebiet und Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung des Eintrags am Eixendorfer Stausee; Abschlussbericht – Berichtszeitraum 1999 bis 2001 der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanznebau (LBP) an das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Auftraggeber), 126 Seiten.
- Pommer, G., Schröpel, R. und Jordan, F. (2001): Austrag von Phosphor durch Oberflächenabfluss auf Grünland. Wasser & Boden, 53/4: 34-38.
- Schröpel, R. (2002): Oberflächlicher Phosphatabtrag; Berichte und Versuchsergebnisse Spitalhof Kempten, 2. Ausgabe 2002, Seite 14-18, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Tierhaltung und Grünlandwirtschaft Spitalhof Kempten.

- Seybold, H.-J., Hejny, S. (2001): Studie zur Nährstoffbelastung und Trophiegüte des Drachensees bei Furth im Wald, Landkreis Cham, Stand 2001, 20 Seiten.
- Seybold, H.-J. (2006): Grenzüberschreitender Gewässerschutz für den Drachensee; Pressemitteilung der Regierung der Oberpfalz, Sachgebiet Wasserwirtschaft bei der Tagung „Grenzüberschreitender Gewässerschutz für den Drachensee“ am 08. März in Furth im Wald.
- Steinberg, Chr. und Schrenk-Bergt, Chr., 2000: Gutachten über eine mögliche Gewässergüteverbesserung am Eixendorfer See, Landkreis Schwandorf, Oberpfalz; Leibnitz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin.
- Vollenweider, R.; Kerekes, J. (1982): Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. OECD Paris.
- Withers, P.J.A., Ulen, B., Stamm, Ch., Bechmann, M. (2003): Incidental phosphorus losses – are they significant and can they be predicted? J. Plant Nutr. Soil Sci., 166, 459-468.

7 Danksagung

Die Projektbearbeiter möchten sich bei allen Beteiligten für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Erster Dank gebührt unseren Projektteammitgliedern Herrn Berger, der für das Messnetz, die Probenahme, -analyse und Datenbereitstellung verantwortlich war, Frau Schwiebacher und Frau Böckly für die Unterstützung bei der Analytik sowie Herrn Höcherl für seinen Einsatz bei den aufwändigen Berechnungsversuchen, die Datenerhebung, die aufwendigen Betriebsanalysen und die eingeleiteten Betriebsberatungen im Einzugsgebiet.

Besonders bedanken möchten wir uns bei Herrn Dr. Stefan Kremb, Herrn Dr. Michael Honisch, Herrn Ulrich Hege und Herrn Prof. Dr. Thomas Ebertseder, welche vor allem die erste Projektphase (1998-2002) sowie teilweise erste Teile dieses Anschlussprojekts „Saubere Seen“ begleitet haben. Sie haben durch ihre Vorarbeit maßgeblich zum Gelingen der Fertigstellung dieses Berichts beigetragen.

Das Wasserwirtschaftsamt Regensburg hat durch die Überlassung eines gut ausgestatteten Laborarbeitsplatzes erst die umfangreichen Wasseranalysen möglich gemacht. Es hat des weiteren die notwendigen Gerätschaften sowie die erforderlichen Kraftfahrzeuge zur Probengewinnung und zum -transport zur Verfügung gestellt. Den beteiligten Mitarbeitern der Wasserwirtschaftsämter Regensburg und Amberg sei für ihre Unterstützung und Zusammenarbeit gedankt.

Den betroffenen Landwirtschaftsämtern Cham sowie Schwandorf/Nabburg sei für die Unterstützung bei der Datenerhebung und der Beratungstätigkeit herzlich gedankt, insbesondere unter der Berücksichtigung der Personalknappheit in den Behörden. Den Amtsleitern Herrn Schmid und Herrn Schneider gebührt unser Dank für die Bereitschaft zur umfassenden Hilfestellung durch die Beratungskräfte Herrn Alt, Herrn Griesbeck sowie Herrn Mayer und Herrn Seegerer. Einen wichtigen Beitrag zum Gelingen des Projektes hat auch Herr Maly, Landwirtschaftsamt Regensburg, aufgrund seiner umfassenden Kenntnisse aus dem überregionalen Sachgebiet Boden, Landschaftspflege und Agrarökologie geleistet.

Die Regierung mit den Abteilungen Landwirtschaft und Wasserwirtschaft hat im Laufe des Projekts Koordinierungsaufgaben in größerem Umfang erfolgreich abgewickelt, insbesondere Herr Dr. Kiener und Herr Dr. Seibold waren stärker involviert.

Dank gebührt auch dem Landesamt für Wasserwirtschaft bzw. dem WWA Kempten (Herr Bauer, Herr Porzelt, Herr Kirsten) für die großzügige Überlassung der Probenehmer sowie die Hilfestellung und Einweisung bei der Installation, dem Betrieb sowie der Fehlerbehebung.

Das Projektteam möchte sich auch bei allen beteiligten Kolleginnen und Kollegen der Landesanstalt für Landwirtschaft für die fachliche Unterstützung und die Bereitschaft zur offenen Diskussion während der gesamten Projektlaufzeit bedanken. Außerdem möchten wir uns bei Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen für die Untersuchungen der Gülleproben bedanken.

Ein Projekt in dieser Größenordnung ist ohne Drittmittelfinanzierung nicht durchführbar. Abschließender und ganz besonderer Dank gehört damit unserem Staatministerium für Landwirtschaft und Forsten sowie der EU, die 50 % der Kosten des Interreg-III-A-Projekts trug.