



Hessisches Landesamt  
für Umwelt und Geologie

**Umsetzung der WRRL  
Herstellung des guten stofflichen Zustandes  
- Szenario Phosphor**

**Abschlussbericht**

DARMSTADT, Juli 2008



## INHALTSVERZEICHNIS

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Veranlassung und Zielsetzung .....</b>                  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundsätzliches Vorgehen.....</b>                       | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>Ausgangssituation.....</b>                              | <b>5</b>  |
| 3.1      | Datengrundlagen.....                                       | 8         |
| 3.2      | Vergleich von Emissions- und Immissionsdaten.....          | 9         |
| 3.3      | Ergänzung fehlender Immissionsdaten.....                   | 12        |
| 3.3.1    | Vorgehensweise.....  | 12        |
| 3.3.2    | Einflussgrößen .....                                       | 13        |
| 3.3.3    | Ergebnisse und Bewertung .....                             | 15        |
| <b>4</b> | <b>Massnahmenprogramm .....</b>                            | <b>18</b> |
| 4.1      | Methodenbeschreibung.....                                  | 18        |
| 4.2      | Handlungsbedarf .....                                      | 20        |
| 4.3      | Massnahmenvorschläge .....                                 | 26        |
| 4.3.1    | Kommunale Kläranlagen.....                                 | 27        |
| 4.3.1.1  | Grundlagen .....   | 27        |
| 4.3.1.2  | Datenbasis .....   | 29        |
| 4.3.1.3  | Emittierte Phosphorfrachten in Hessen im Ist-Zustand ..... | 29        |
| 4.3.1.4  | Einzelmaßnahmen .....                                      | 32        |
| 4.3.1.5  | Wirksamkeit.....   | 38        |
| 4.3.1.6  | Kosten .....   | 40        |
| 4.3.1.7  | Maximale P-Elimination nach dem Stand der Technik .....    | 45        |
| 4.3.2    | Misch- und Niederschlagswassereinleitungen.....            | 47        |
| 4.3.2.1  | Qualifizierte Entwässerung .....                           | 48        |
| 4.3.2.2  | Abflussvermeidung und -verminderung .....                  | 50        |
| 4.3.2.3  | Weitergehende Mischwasserbehandlung.....                   | 52        |
| 4.3.3    | Diffuse Quellen.....                                       | 54        |
| 4.4      | Massnahmen-Szenario .....                                  | 55        |
| 4.4.1    | Maßnahmenkombinationen.....                                | 55        |
| 4.4.2    | Reduzierte Phosphoreinträge .....                          | 57        |
| 4.4.3    | Bewertung der Gesamtscenarien: Zeitbedarf und Kosten.....  | 63        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                  | <b>67</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatur .....</b>                                     | <b>70</b> |

## ANHÄNGE & KARTEN

- Anhang:** Kosten und Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung des P-Eintrags aus diffusen Quellen (Abschwemmung und Erosion), vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt, unverändert
- Karte 1:** Gesamt-Phosphor (Mittelwert) 2005 / 2006 / 2007, Ergebnisse der Immissionsbetrachtung für 266 hessische Wasserkörper, vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt, unverändert
- Karte 2:** Gesamt-Phosphor-Belastung hessischer Wasserkörper, Zustandsbewertung in Anlehnung an Karte 1, ergänzt um empirische Abschätzung fehlender Immissionswerte
- Karte 3:** Handlungsbedarf hinsichtlich der Reduzierung des P-Eintrags unter Berücksichtigung der Monitoringergebnisse für Ortho-P und Trophie
- Karte 4:** Reduzierung des P-Eintrags durch Einrichtung einer Fällung auf Kläranlagen der GK 2 & 3 ohne gezielte P-Elimination (Maßnahmengruppe 1.1)
- Karte 5:** Reduzierung des P-Eintrags durch betriebliche Optimierung vorhandener Anlagen zur Fällung auf Kläranlagen der GK 4 & 5 (Maßnahmengruppe 2.1)
- Karte 6:** Reduzierung des P-Eintrags durch Einrichtung einer zusätzlichen Reinigungsstufe (Flockungsfiltration) auf Kläranlagen der GK 4 & 5 (Maßnahmengruppe 2.2)
- Karte 7:** Maximal mögliche Reduzierung des P-Eintrags (Maximalszenario) durch flächendeckende Ablaufkonzentrationen von 0,1 mg P<sub>ges</sub>/l
- Karten 8-11:** Kombination von Maßnahmen zur Reduzierung des P-Eintrags aus kommunalen Kläranlagen, Abschwemmung und Erosion (Gesamt-szenarien I bis IV)

## 1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

Mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde im Jahr 2000 der Grundstein für ein mehrstufiges Programm mit dem Ziel der Erreichung des „guten Zustandes“ in allen Gewässern der Mitgliedsstaaten gelegt. Zur Umsetzung der WRRL und Erreichung der dort beschriebenen Ziele ist ein enger Zeitrahmen vorgegeben. Entsprechend dieser Rahmenvorgaben wird u.a. für natürliche, künstliche oder erheblich veränderte Oberflächengewässer innerhalb von 15 Jahren, also bis zum Jahr 2015, ein insgesamt guter ökologischer Zustand / Potenzial und ein guter chemischer Zustand angestrebt.

Die EG-WRRL sieht mit Artikel 11 vor, dass für die Flussgebiete, die unter Berücksichtigung der Analyseergebnisse nach Artikel 5 und der Bewertung durch das Monitoring gemäß Artikel 8 entsprechende Defizite aufweisen, bis Ende 2008 Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme zur Erreichung der Ziele der EG-WRRL aufzustellen sind.

Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme für die hessischen Oberflächengewässer zeigen, dass im Hinblick auf die chemisch-physikalischen Parameter bei nahezu der Hälfte der Wasserkörper das Erreichen der Ziele gemäß WRRL als unklar bzw. unwahrscheinlich anzusehen ist. In den meisten Fällen ist der Parameter Gesamt-Phosphor Ursache für die Gewässerbelastung. Entsprechend ist dieser für die Eutrophierung in Oberflächengewässern limitierende Faktor von besonderer Bedeutung für die weitere Maßnahmenplanung.

Mit Blick auf die unterschiedlichen diffusen und punktuellen Eintragspfade sind mit dem ersten Maßnahmenprogramm nun kurzfristige immissionsorientierte Lösungen zur Verminderung der Phosphorgehalte in den Gewässern zu erarbeiten. Diese wurden als Ergebnis eines iterativen Abwägungsprozesses entwickelt, der für die biologischen Qualitätskomponenten auf dem Grundsatz von **ökologischer Wirksamkeit** (Erfolgsaussichten und Zeitfaktor) und **Kosteneffizienz** basiert.

## 2 GRUNDSÄTZLICHES VORGEHEN

Das Projekt wurde in enger Abstimmung mit einer Projektarbeitsgruppe beim Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) durchgeführt. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden in Abstimmung mit den Projektbeteiligten zunächst Anforderungen definiert sowie erforderliche Grundlagendaten erhoben, aufbereitet und plausibilisiert. Aus den so zusammengestellten Informationen konnten erster Handlungsbedarf und Handlungsschwerpunkte mit Blick auf die Phosphorbelastung der Oberflächengewässer abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der für die Untersuchung vorgegebenen Eintragspfade erfolgte eine Bilanzierung der als Immissions- und Emissionswerte vorliegenden und vom Auftraggeber tabellarisch für die hessischen Wasserkörper zur Verfügung gestellten Phosphorfrachten (Plausibilisierung).

Datenlücken und nicht valide Messwerte, die auf Messungenauigkeiten, fehlende Messwerte oder Änderungen im Analyseverfahren während des Monitoring zurückgeführt werden können, wurden in Abstimmung mit der Projektarbeitsgruppe sinnvoll ergänzt, um im Rahmen der Maßnahmenplanung und Bewertung auf landesweit flächendeckende Angaben zur Phosphorbelastung der Wasserkörper zurückgreifen zu können.

Die systematische Auswertung und Darstellung der Datengrundlagen sowie entsprechender Wechselwirkungen im Maßnahmenprogramm erfolgte anhand von Geodatenbanken, die unter Verwendung eines geografischen Informationssystems (GIS) bewertet, ausgewertet und anschaulich dargestellt wurden.

### **Maßnahmenprogramm und Bewertung**

Die Erarbeitung von Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen konzentrierte sich auf eine größtmögliche Verminderung des P-Eintrags zur Erreichung der vorgegebenen Orientierungswerte (Zielszenario). Grundlage der Ableitung des Handlungsbedarfs war der Vergleich von Ist-Wert und Ziel-Werten der P-Frachten, auf dessen Basis dann übergeordnete, allgemeine Maßnahmenvorschläge erarbeitet wurden.

Als Parameter für die Maßnahmenbeschreibung wurde Gesamt-Phosphor (Pges) gewählt. Die Gründe sind:

- Daten zu Einleitungen (insbes. Kläranlagen) liegen nur als Pges vor.
- Die Stoffströme der diffusen Belastung sind als Pges ermittelt.
- Die EU-Kommunalabwasser-Richtlinie und die Abwasser-Verordnung, Anhang 1, verwenden wie die wasserrechtlichen Bescheide Pges zur Emissionsbegrenzung.

- Die Verminderung von Pges schließt mit dem Partikelrückhalt Stoffe ein, die in Feststoffen gebunden oder an Partikel adsorbiert sind und deren Entfernung aus dem Abwasser zur Einhaltung anderer Umweltziele notwendig oder erwünscht ist (Synergiewirkungen).

Maßnahmenvorschläge wurden insbesondere für den Haupteintragspfad „Kläranlagen“ erarbeitet. Mit Blick auf die unterschiedlichen Ausbaugrößen (Größenklassen) und Reinigungsstufen (mit/ohne P-Elimination) der betrachteten Kläranlagen war es erforderlich, verschiedene Einzelmaßnahmen zu definieren, deren Wirkungsweise im Rahmen des Maßnahmenprogramms näher beschrieben wurde.

In unterschiedlichen Gesamtszenarien wurden diese Einzelmaßnahmen mit ergänzenden Vorschlägen zur Reduzierung der Phosphorbelastung aus diffusen Quellen kombiniert. Die zur Bewertung der ökologischen Wirksamkeit und Wirkungsentfaltung erforderlichen spezifischen Größen wurden unter Berücksichtigung von Erfahrungs- und Literaturwerten abgeleitet und mit dem Auftraggeber abgestimmt.

Für die Entwicklung der Maßnahmenplanung war es abschließend erforderlich, emissions- und immissionsorientierte Maßnahmenprioritäten bezogen auf die Verminderung von P-gesamt zu definieren. Diese richten sich insbesondere nach Effektivitäts- und Effizienzgesichtspunkten. Entsprechend wurden unterschiedliche Szenarien und Maßnahmenkombinationen im Zuge einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse bewertet und Prioritäten festgelegt.

### **Arbeitsgrundlagen**

Die Zusammenstellung der Arbeitsgrundlagen und Ausgangsdaten sowie die Erarbeitung des Maßnahmenprogramms zur Reduzierung der Phosphoreinträge in hessische Oberflächengewässer erfolgten in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber, dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie. Ergänzende Informationen zu den in Hessen betriebenen kommunalen Kläranlagen wurden vom Regierungspräsidium Gießen zur Verfügung gestellt. Für die Auftragsbearbeitung wurden neben den im Literaturverzeichnis genannten Quellen im Wesentlichen folgende Unterlagen zu Grunde gelegt:

- OBERFLÄCHENGEWÄSSER
  - (1) Ausgangsdaten für hessische Wasserkörper (Flächen, MQ, Gewässertypen etc.)
  - (2) Standorte & Frachten industrieller Direkteinleiter
  - (3) Flächennutzung nach ATKIS
  - (4) Messwerte Gesamtphosphor (Mittelwert 2005-2007)
  - (5) Einträge Gesamtphosphor nach Pfaden (MEPhos [1])
  - (6) Einstufung Handlungsbedarf Trophie

- **HESSISCHES ANLAGENKATASTER**
  - (7) Standorte kommunaler Kläranlagen
  - (8) Ausbaugröße & Reinigungsstufen
  - (9) Ablaufwerte
- **WEITERES**
  - (10) Potenzial zur Reduzierung der Phosphor-Emissionen kommunaler Kläranlagen in Hessen, Gutachten eawag, Mai 2008

### 3 AUSGANGSSITUATION

Im Rahmen der Bestandsaufnahme nach WRRL wurden für Hessen insgesamt 449 Wasserkörper identifiziert und entsprechend ihrem Einzugsgebiet geographisch abgegrenzt. Diese Wasserkörper mit einer Gesamtlänge von fast 8.300 km wurden für die weitere Bearbeitung u.a. zu Wasserkörpergruppen sowie zu größeren Einheiten (Bearbeitungs- / Koordinierungsräume) zusammengefasst (Abb. 1). Diese sind schließlich unmittelbarer Bestandteil der beiden übergeordneten Flussgebiete

- Rhein mit insgesamt fünf Bearbeitungsgebieten (Oberrhein, Neckar, Main, Mittelrhein, Niederrhein) und
- Weser mit vier Koordinierungsräumen (Weser, Fulda / Diemel, Werra, Leine).



Abb. 1: Bearbeitungsgebiete und Koordinierungsräume zur Umsetzung der WRRL in Hessen (Quelle: HLOG)

Für einen großen Teil der Wasserkörper gilt die Erreichung der Ziele gemäß WRRL (guter Zustand) als unwahrscheinlich oder unklar. Eine wesentliche Ursache für den schlechten Zustand vieler Wasserkörper liegt in anthropogenen Belastungen, z.B. Nährstoffeinträge (u.a. Phosphor) aus Kläranlagen oder von landwirtschaftlich genutzten Flächen.



Von der Gesamtfläche des Bundeslandes Hessen (ca. 21.000 km<sup>2</sup>) werden fast 30% landwirtschaftlich genutzt (vgl. Abb. 2). Entsprechend ist anzunehmen, dass von diesen Flächen eine erhöhte Gefahr hinsichtlich des Nährstoffeintrags über Erosion und/oder Abschwemmung ausgeht. Andere natürliche Flächen, wie Grünland (17%) und Wald (43%) sind demgegenüber grundsätzlich von untergeordneter Bedeutung, können aber je nach Struktur ebenfalls zum Nährstoffeintrag beitragen.

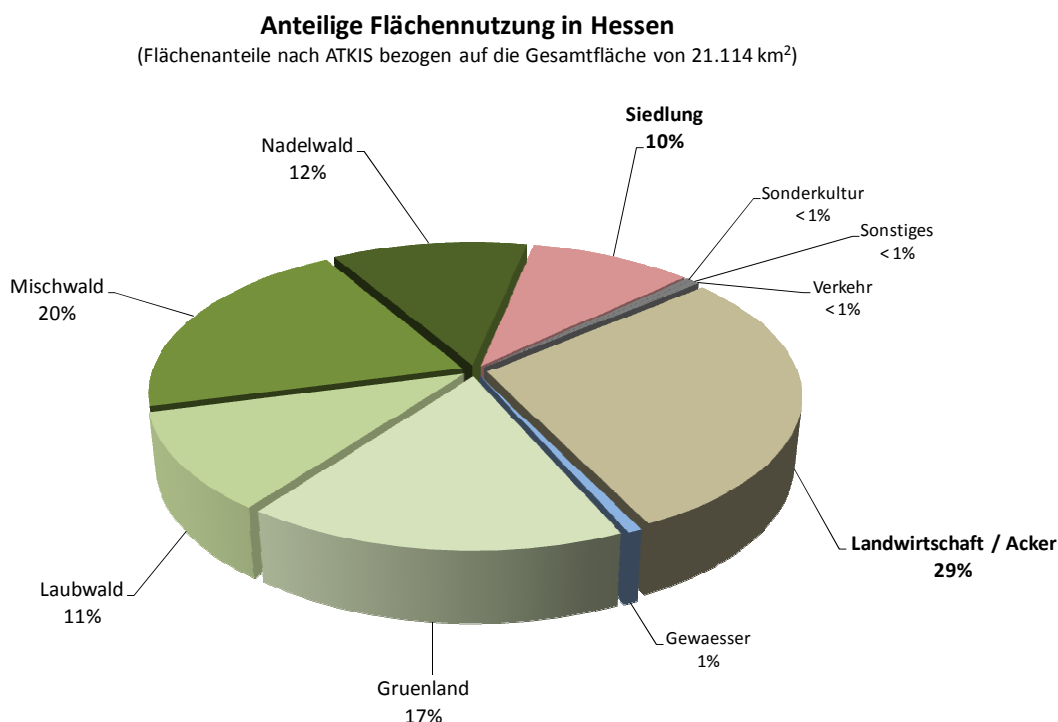


Abb. 2: Aufteilung der Flächennutzung in Hessen (nach ATKIS)

Wesentliche Phosphorfrachten werden über die Abläufe der landesweit 723 Standorte kommunaler Kläranlagen emittiert (vgl. Abb. 3). Nach den Ergebnissen der Eigenüberwachung gelangt über diese Anlagen eine jährliche Abwassermenge von rund 845 Mio. m<sup>3</sup> und eine Phosphorfracht von rund 817 t/a in die Oberflächengewässer.

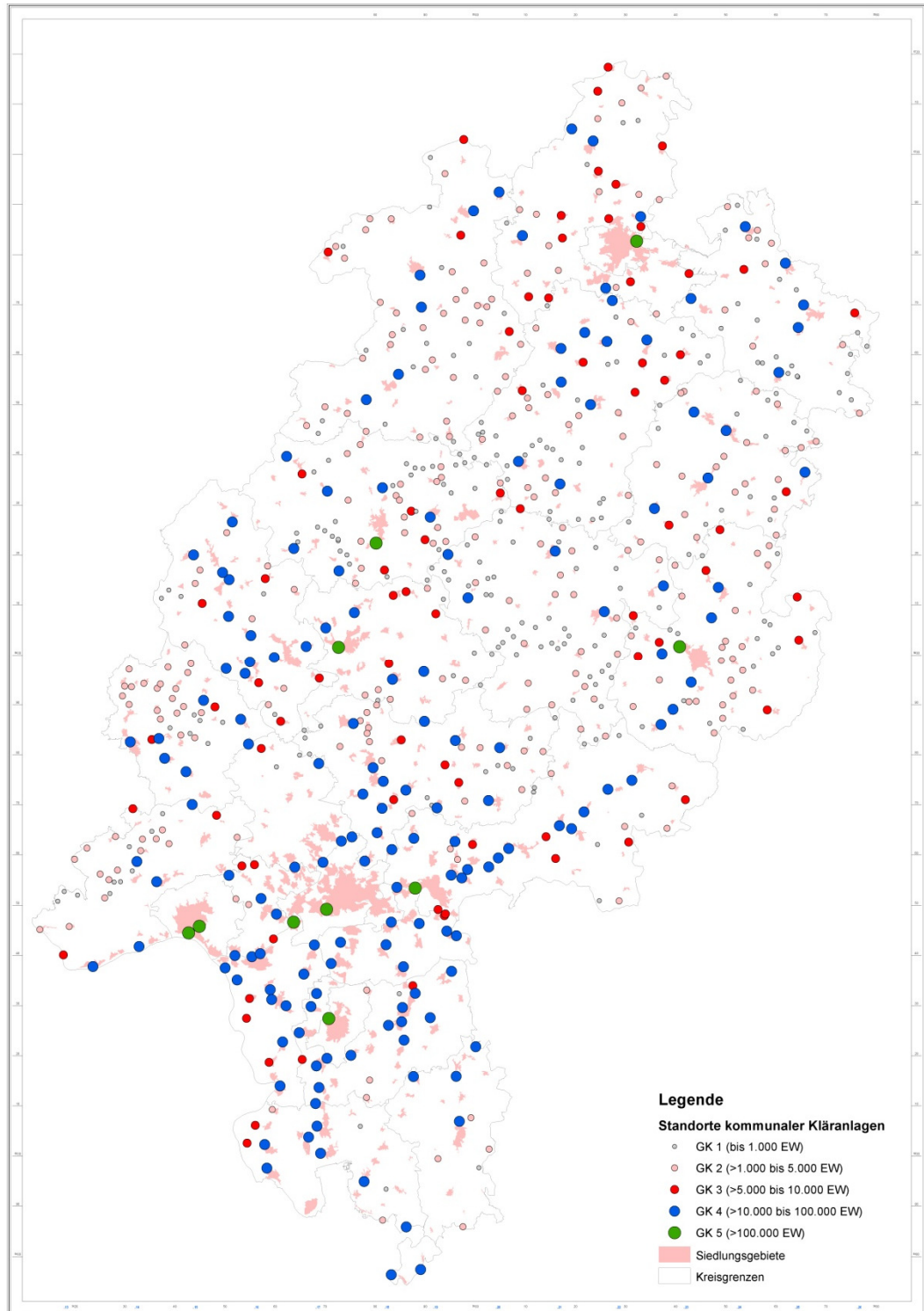


Abb. 3: Standorte kommunaler Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 5 in Hessen (Gesamtzahl Kläranlagen 723)

### 3.1 DATENGRUNDLAGEN

Für die Bewertung der Nährstoffeinträge sowie die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erarbeitete Maßnahmenplanung wurden zwei unterschiedliche Datengrundlagen hinzugezogen.

Auf der Basis von Konzentrationsmessungen standen für 266 der insgesamt 449 hessischen Wasserkörper Ergebnisse aus der **Immissionsbetrachtung** zur Verfügung. In den Jahren 2005 bis 2007 wurde dazu landesweit an etwa 240 ausgewählten Messstellen die Phosphorkonzentration (Gesamtposphor) gemessen. Aus den Ergebnissen der Messung und unter Verwendung des langjährigen mittleren Abflusses wurden Momentanfrachten bestimmt und diese zu Tages- und Jahresfrachten hochgerechnet. Die Immissionswerte beschreiben somit die aus einem Einzugsgebiet (Wasserkörper) abfließende Fracht. Eine herkunftsorientierte Zuordnung zu einzelnen Quellen ist anhand der Messwerte jedoch nicht möglich.

Darüber hinaus lagen für Gesamthessen die Ergebnisse einer **Emissionsbetrachtung** vor, die mit Hilfe eines Rechenmodells MEPhos [2] und unter Berücksichtigung von spezifischen Randbedingungen in den Einzugsgebieten der einzelnen Wasserkörper ermittelt wurden [2]. Ausgehend von Informationen zu Landnutzung, Niederschlagsgeschehen, Geländeneigung etc. wurden Annahmen zur Phosphorbelastung getroffen. Im Gegensatz zur Immissionsbetrachtung ermöglichten die Emissionswerte eine Unterscheidung der Nährstoffeinträge nach ihrer Herkunft. Für jeden Wasserkörper wurden acht Haupteintragspfade unterschieden:

#### **Punktquellen:**

- Kommunale Kläranlagen
- Industrielle Direkteinleitungen
- Misch- und
- Niederschlagswassereinleitungen

#### **Diffuse Quellen:**

- Erosion
- Abschwemmung
- Dränagen
- Grundwasser

Die Möglichkeit, die Herkunft der Phosphoreinträge zu analysieren und dominierende Eintragspfade zu bestimmen war eine wesentliche Voraussetzung zur Ableitung von Maßnahmen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie. Räumliche und pfadspezifische Belastungsschwerpunkte konnten anhand der zur Verfügung stehenden Werte aus Immissions- und Emissionsbetrachtung erkannt werden, um somit gezielt entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphoreinträge anzusetzen.

### 3.2 VERGLEICH VON EMISSIONS- UND IMMISSIONSDATEN

Die im Rahmen der Immissionsbetrachtung in den letzten Jahren in zahlreichen hessischen Wasserkörpern durchgeführten Konzentrationsmessungen zur Bestimmung der Phosphorbelastung wurden genutzt, um die nach MEPhos modelltechnisch ermittelten Emissionswerte grundsätzlich zu plausibilisieren. Bereits ein erster Vergleich von Immissions- und Emissionsdaten zeigte, dass beide Datenkollektive ggf. um ein Vielfaches auseinander liegen können.

Für 266 Wasserkörper, aus denen Messwerte zur Phosphorkonzentration vorliegen, sind die Ergebnisse aus dem direkten Vergleich gemessener und abgeschätzter Frachten in Abb. 4 zusammengefasst. Demnach liegen die aus Messungen ermittelten Phosphorfrachten (Immissionen) in den meisten Wasserkörpern (195 Stück) über den in der Summe angenommenen Emissionswerten, im Diagramm als negative Abweichung dargestellt. Für 85 Wasserkörper liegen die Abweichungen von Emissionen zu Immissionen in einem Toleranzbereich von  $\pm 20\%$ . 169 Messwerte, d.h. mehr als 60% der betrachteten Wasserkörper, weisen zudem Abweichungen von weniger als  $\pm 40\%$  auf.

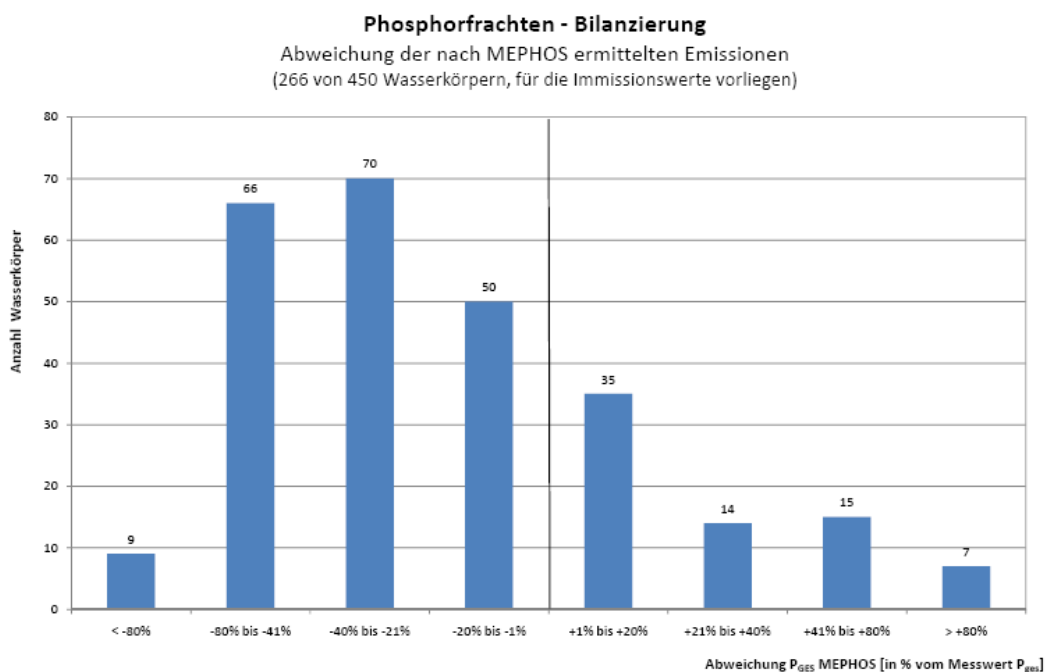


Abb. 4: Vergleich gemessener und nach MEPhos ermittelter Phosphorfrachten und Darstellung der Abweichung in acht Klassen von 0% bis über  $\pm 80\%$

Die festgestellten Abweichungen können grundsätzlich sowohl auf Fehler bei der Messung als auch auf falsche Annahmen bei der Abschätzung nach MEPhos zurückzuführen sein. Eine eindeutige Bewertung der Datengrundlage ist diesbezüglich nicht möglich.

Große Unsicherheiten resultieren jedoch aus den unterschiedlichen Randbedingungen zum Zeitpunkt der Beprobung. Entscheidend ist insbesondere, bei welchem Abfluss im Gewässer die Konzentrationsmessung vorgenommen wurde. So lassen sich z.B. Jahresfrachten kaum wie zumeist angenommen, über den mittleren Abfluss des Gewässers ermitteln, da ein Teil des am Schwebstoff angelagerten Phosphors zunächst sedimentiert und erst bei starkem Abfluss remobilisiert wird. Eine (Hochwasser-)ereignisorientierte Probenahme wäre hilfreich, findet in der Regel jedoch nicht statt (vgl. [3]).

Ein direkter Vergleich von Emissions- und Immissionsdaten für einzelne Wasserkörper zeigt, dass die nach MEPHOS ermittelten Emissionen in Einzelfällen um mehr als 100 % von den gemessenen Immissionswerten abweichen (vgl. Abb. 5). Eine abschließende Begründung für diese Abweichungen konnte auch nach eingehender Detailbetrachtung für die betreffenden Wasserkörper nicht gefunden werden. Denkbar ist aber, dass der vergleichsweise hohe Abwasseranteil in diesen überwiegend abflussschwachen Gewässern eine mögliche Ursache hierfür darstellt.

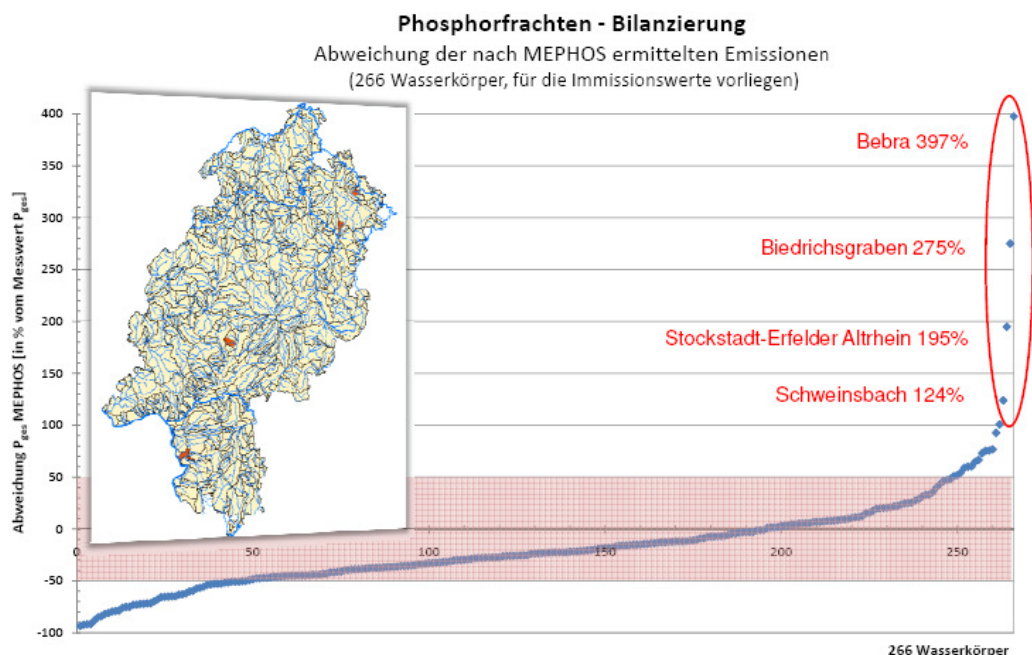


Abb. 5: Abweichungen von Emissions- und Immissionswerten und geografische Lokalisierung von WK mit großen Abweichungen

Geografisch betrachtet gibt es kaum eindeutige Schwerpunktgebiete, in denen entweder Emissionen oder Immissionen überwiegen. Obschon eine gewisse Korrelation mit den aus der Flächennutzung nach ATKIS abgeleiteten anteiligen Ackerflächen der Wasserkörper naheliegend erscheint (vgl. Abb. 6), konnte für diesen Zusammenhang keine belastbare Begründung gefunden werden.

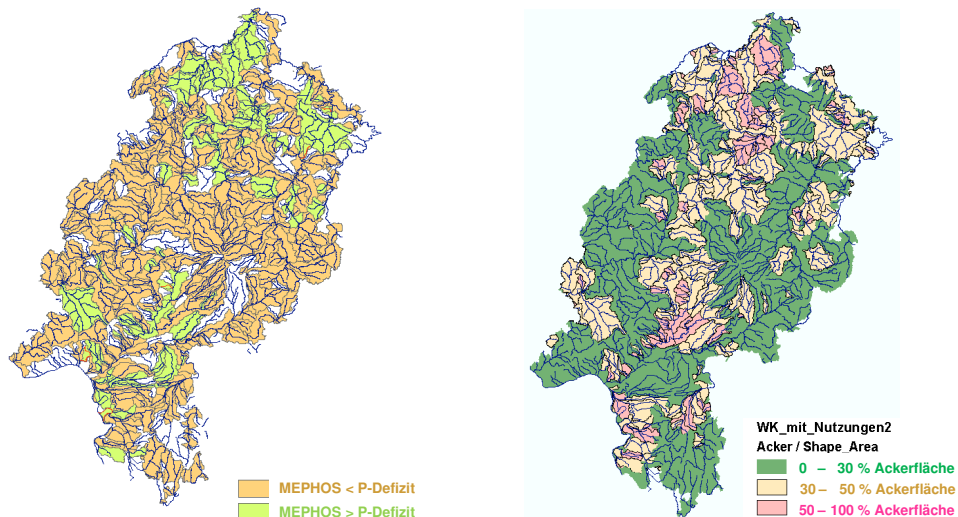


Abb. 6: Festgestellte Abweichungen von Emissions- und Immissionswerten (geografisch) und Vergleich mit der landwirtschaftlich genutzten Fläche

Die für Hessen vorliegenden Immissionsdaten wurden überwiegend im Rahmen des bisher durchgeführten, landesweiten Monitoring, d.h. in den Jahren 2005 bis 2007 erhoben. Insbesondere die Abflüsse des Jahres 2005 liegen nach Einschätzung des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie nachweislich unterhalb des langjährigen mittleren Abflusses ( $MQ_{lang}$ ), der neben den gemessenen Konzentrationen als weitere Eingangsgröße für die Frachtberechnung verwendet wird [8]. Für die weitere Auswertung wird in Abstimmung mit dem Auftraggeber von einer Abweichung der Abflüsse im Jahr 2005 gegenüber den Folgejahren 2006 und 2007 um -11% ausgegangen [4].

### 3.3 ERGÄNZUNG FEHLENDER IMMISSIONSDATEN

#### 3.3.1 Vorgehensweise

Im Rahmen des landesweit durchgeführten Monitoringprogramms wurden bisher zahlreiche Immissionsmessungen zur Bestimmung der Phosphorbelastung in den Fließgewässern durchgeführt. Zahlreiche der Messstellen wurden seit dem Jahr 2005 mehrfach beprobt, so dass für die betrachteten Wasserkörper teilweise bereits mehrjährige Messreihen für die Bewertung der Phosphorbelastung verfügbar sind. Die durchgeführten Messungen konzentrierten sich bisher auf diejenigen Wasserkörper, für die insbesondere auf Grund von Abwassereinleitungen eine wesentliche Phosphorbelastung erwartet wurde. Demzufolge liegen für 167 von 433 Wasserkörpern keine Ergebnisse aus der Immissionsmessung vor. Diese nicht beprobten Wasserkörper wurden in der vom HLUG erstellten Defizitkarte „Gesamtphosphor (Mittelwert)“ zunächst ausgespart und ohne Angabe der Phosphorbelastung als weiße Flächen dargestellt.

Mit Blick auf die Erarbeitung eines Szenarios zur Reduzierung der Phosphorbelastung wurde in Abstimmung mit den Projektbeteiligten vereinbart, die noch bestehenden Datenlücken zu schließen. Die fehlenden Immissionsdaten sollten unter Berücksichtigung bekannter Eigenschaften der Wasserkörper in geeigneter Weise abgeschätzt werden [5]. Zur Vervollständigung der bestehenden Daten wurde daraufhin wie folgt vorgegangen:

- Eine **erste Variante** zur Ergänzung der vorhandenen Daten basiert auf der Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der Phosphorbelastung der Wasserkörper und der über Kläranlagen eingeleiteten Abwassermenge einerseits sowie dem Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche andererseits. Die beiden zugrunde gelegten Funktionen wurden als lineare Regressionsgleichungen ermittelt. Unter der Annahme, dass der Phosphorgehalt überwiegend durch den Einfluss der ins Gewässer eingeleiteten Jahresabwassermenge bestimmt ist, werden beide Funktionen im Verhältnis 1:2 zu einer Gleichung zusammengeführt. Das Ergebnis ist eine lineare Funktion, durch welche die Phosphorbelastung eines Wasserkörpers zu 1/3 durch die landwirtschaftliche Nutzung und zu 2/3 durch die Jahresabwassermenge der ins Gewässer einleitenden Kläranlagen beschrieben wird.
- Alternativ wurde eine **zweite Variante** aufgestellt, die weniger auf funktionalen Zusammenhängen basiert, sondern verstärkt die tatsächlichen Eigenschaften der Wasserkörper und unterschiedliche Einflussgrößen für die Phosphorbelastung berücksichtigt. Neben Siedlungs- und Nutzungseinflüssen (Kläranlagen und Landwirtschaft) wurden als weitere Faktoren die geogene Belastung sowie die Einstufung der Wasserkörper in Erosionsgefährdungsklassen berücksichtigt. Die geogene Belastung wurde abhängig von der Einstufung in Fließge-

wässertypen bestimmt und ging als solche zu 20% in die Abschätzung der Gesamtposphorbelastung ein. Landwirtschaftliche Nutzung und Erosionsgefährdung beeinflussen den Phosphorgehalt nach den getroffenen Annahmen in der Summe zu 30%. Der Einfluss aus Abwassereinleitungen bezogen auf den mittleren Abfluss des Gewässers (MQ) wurde mit 50% angenommen.

Die Ergebnisse beider Varianten wurden unter Berücksichtigung der vom HLOG vorgegebenen fünf Belastungsklassen zusammengefasst, grafisch dargestellt und bewertet. Zur qualitativen Bewertung der ergänzten Immissionswerte wurden diese mit der Verteilung der tatsächlich gemessenen Werte verglichen. Für einzelne Wasserkörper wurden zudem Plausibilitätsprüfungen durchgeführt.

Im Rahmen weiterer Betrachtungen ist zu beachten, dass die ergänzten Immissionsdaten ausschließlich als Abschätzung verstanden werden sollten. In der Darstellung werden die betreffenden Werte deshalb stets als solche kenntlich gemacht.

Mehrere der Wasserkörper, für die keine Immissionsdaten vorliegen, zählen zu Flussgebieten wie z.B. Rhein, Main und Neckar. Die Einzugsgebiete dieser Gewässer liegen nur zu einem kleinen Teil in Hessen, so dass eine Schätzung der Phosphorbelastung nach der beschriebenen Vorgehensweise, d.h. anhand der Eigenschaften des hessischen Einzugsgebietes, kaum möglich ist. Anzunehmen ist, dass der überwiegende Teil der Nährstoffeinträge aus den Einzugsgebieten außerhalb Hessens stammt. In Abstimmung mit den Projektbeteiligten wurde somit auf eine Ergänzung dieser Daten vollständig verzichtet. In der Ergebnisübersicht wurden für die betreffenden Wasserkörper keine Angaben zur Phosphorbelastung dargestellt.

### 3.3.2 Einflussgrößen

Zur Abschätzung fehlender Phosphorbelastungen werden entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise unterschiedliche Einflussgrößen bewertet und miteinander kombiniert. In der ersten Variante wird die Phosphorbelastung der Wasserkörper ausschließlich unter Berücksichtigung der folgenden Einflüsse abgeschätzt:

- (1) **Landwirtschaftliche Nutzung:** Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass diffuse Phosphoreinträge in die Gewässer überwiegend auf Emissionen aus der Landwirtschaft zurückzuführen sind. Um diesen Einflussfaktor bei der Abschätzung zu berücksichtigen, wurde durch Auswertung von Flächennutzungsdaten (vgl. ATKIS) zunächst für jeden Wasserkörper die landwirtschaftlich genutzte Fläche bestimmt. Bezogen auf die Gesamtfläche des Wasser-



körpers geht der prozentuale Anteil dieser Nutzflächen unmittelbar in die Berechnung der Phosphorbelastung nach den beschriebenen Varianten ein.

- (2) **Abwassereinleitungen aus Kläranlagen:** Als zweite und zudem maßgebliche anthropogene Belastungsgröße werden Siedlungseinflüsse berücksichtigt. Als wesentliches Indiz für Siedlungseinflüsse wird die über kommunale und industrielle Kläranlagen ins Gewässer eingeleitete Jahresabwassermenge hinzugezogen. Die für die betreffenden Anlagen aus der Eigenüberwachung bekannten Einleitmengen (vgl. HAA [6]) werden zur Normierung jeweils auf den mittleren Abfluss des Wasserkörpers bezogen, so dass auch die Leistungsfähigkeit eines Gewässers in der Abschätzung angemessen berücksichtigt wird.

Die als Variante 2 bezeichnete Vorgehensweise berücksichtigt darüber hinaus weitere Einflussgrößen, die für die Abschätzung der Phosphorbelastung zusätzlich berücksichtigt werden. Dies sind im Einzelnen:

- (3) **Bodenabtrag / Erosion:** Die aus der landwirtschaftlichen Nutzung zu erwartenden Phosphorbelastungen sind erfahrungsgemäß zu einem erheblichen Teil auf den Abtrag von Bodenmaterial zurückzuführen. Entsprechend wird bei der Abschätzung nach Variante 2 davon ausgegangen, dass diffuse Phosphoreinträge verstärkt solche Gewässer belasten, für deren Einzugsgebiet gleichzeitig eine erhöhte Erosionsgefährdung besteht. Die für Hessen festgelegten drei Erosionsgefährdungsklassen – „keine bis beginnend“, „schwach“, „mäßig“ – werden deshalb als verstärkender Faktor gemeinsam mit dem Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen in die Abschätzung der Phosphorbelastungen der Wasserkörper einbezogen.
- (4) **Geogene Belastung:** Neben den beschriebenen anthropogenen Einflüssen aus Siedlungsdichte und Landnutzung ist davon auszugehen, dass bei der Abschätzung fehlender Immissionsdaten für verschiedene Fließgewässer auch geogene Phosphorbelastungen zu berücksichtigen sind. Diese lassen sich auf Grund der unterschiedlichen Eigenschaften der Fließgewässertypen hinzugezogen, welche für alle hessischen Wasserkörper vorliegt. Unter Verwendung dieser Typisierung wird u.a. angenommen, dass z.B. für die eher schnell fließenden Mittelgebirgsbäche (z.B. Typ 5 & 5.1) im Vergleich zu den langsam fließenden, sauerstoffärmeren Niederungsfließgewässern (z.B. Typ 19) grundsätzlich geringere geogene Phosphorbelastungen anzusetzen sind.

Für die Phosphorbelastung der Wasserkörper sind diese Einflussgrößen von unterschiedlicher Bedeutung. Entsprechend werden diese gemäß der zuvor be-

schriebenen Varianten 1 und 2 mit verschiedenen Faktoren gewichtet und als solche zu einem Gesamtwert kombiniert.

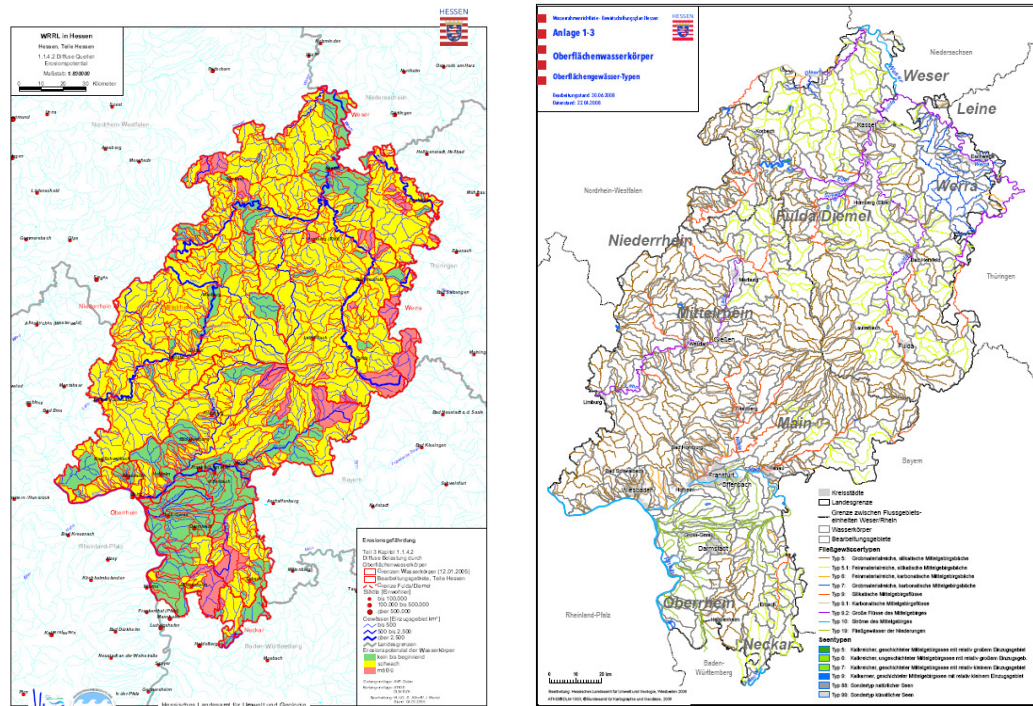


Abb. 7: Einflussgrößen zur Abschätzung der Phosphorbelastung bei nicht vorhandenen Immissionswerten, links: Erosionsgefährdung, rechts: biozönotische Fließgewässertypen (Quelle: HLUg)

### 3.3.3 Ergebnisse und Bewertung

Ziel des zuvor beschriebenen Vorgehens war es, die Phosphorbelastungen der Wasserkörper zu ermitteln, für die keine gemessenen Immissionsdaten aus dem Monitoring zur Verfügung stehen. Zur qualitativen Bewertung der nach beiden Varianten rechnerisch ermittelten Werte wurden diese zunächst auf alle Wasserkörper angewendet und anhand ihrer statistischen Verteilung mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in Abb. 8 dargestellt. Demnach ergeben sich für die Verteilung der nach Variante 1 abgeschätzten Belastungswerte deutliche Abweichungen im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten. Die Verteilung der nach Variante 2 ermittelten P-Belastungen entspricht im Vergleich dazu eher den gemessenen Werten.

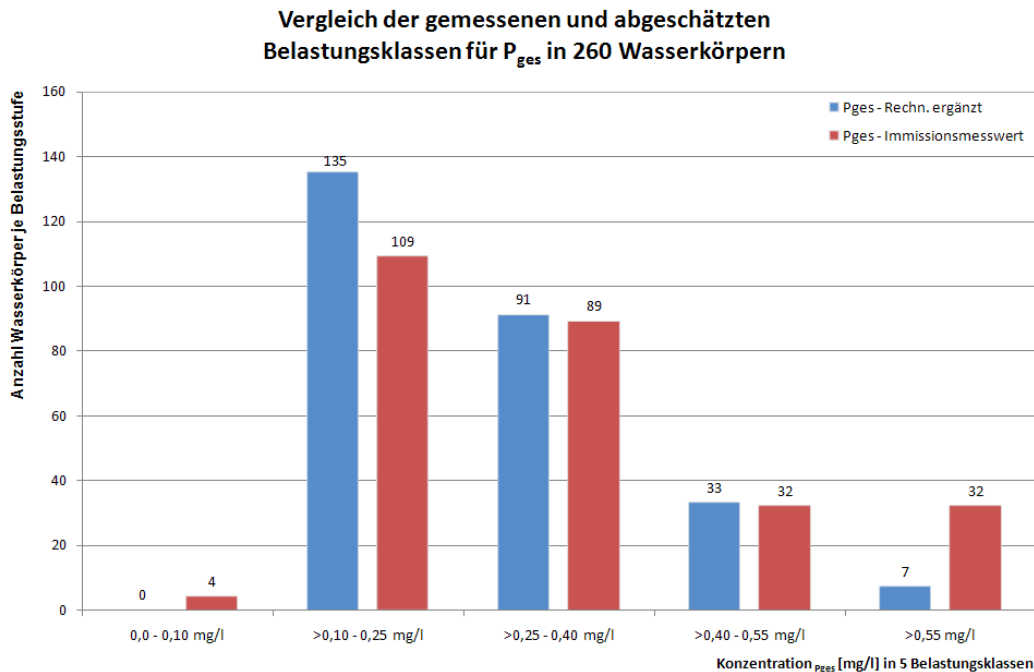


Abb. 8: Vergleich gemessener und abgeschätzter Immissionen nach Belastungsklassen

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die nach Variante 2 ermittelten Phosphorbelastungen überwiegend durch den Einfluss der aus Kläranlageneinleitungen emittierten Frachten beeinflusst werden. Wasserkörper mit nur geringem Abwasseranteil werden eher den Belastungsklassen 2 und 3 (0,1 bis 0,4 mg/l) zugeordnet. Insgesamt führt dies zu einer geringeren Einstufung der nach dem theoretischen Ansatz ermittelten Belastungen. In Abb. 8 zeigt sich dies durch eine vermehrte Einstufung der Wasserkörper in die niedrigeren Belastungsklassen. Tendenziell ist jedoch davon auszugehen, dass auch in den nicht gemessenen Wasserkörpern überwiegend geringe Phosphorbelastungen zu erwarten sind. Im Rahmen des Monitoring wurden Immissionsmessungen insbesondere in den voraussichtlich stark belasteten Wasserkörpern vorgenommen. Wasserkörper mit geringem Abwasseranteil wurden bei der Auswahl von Messstellen zunächst ausgespart. Entsprechend sind für diese Wasserkörper überwiegend geringere Belastungsklassen anzunehmen, die durch den Ergänzungsansatz nach Variante 2 grundsätzlich zutreffender abgebildet werden.

Infolge dessen konzentrieren sich die weiteren Darstellungen und insbesondere die Aussagen zur Wirksamkeit der Maßnahmenplanung in Abstimmung mit den Projektbeteiligten [7] auf die nach Variante 2 ergänzten Werte zur Phosphorbelastung der Wasserkörper. Das Ergebnis der Datenergänzung zeigt die erweiterte Defizitkarte in Abb. 9.

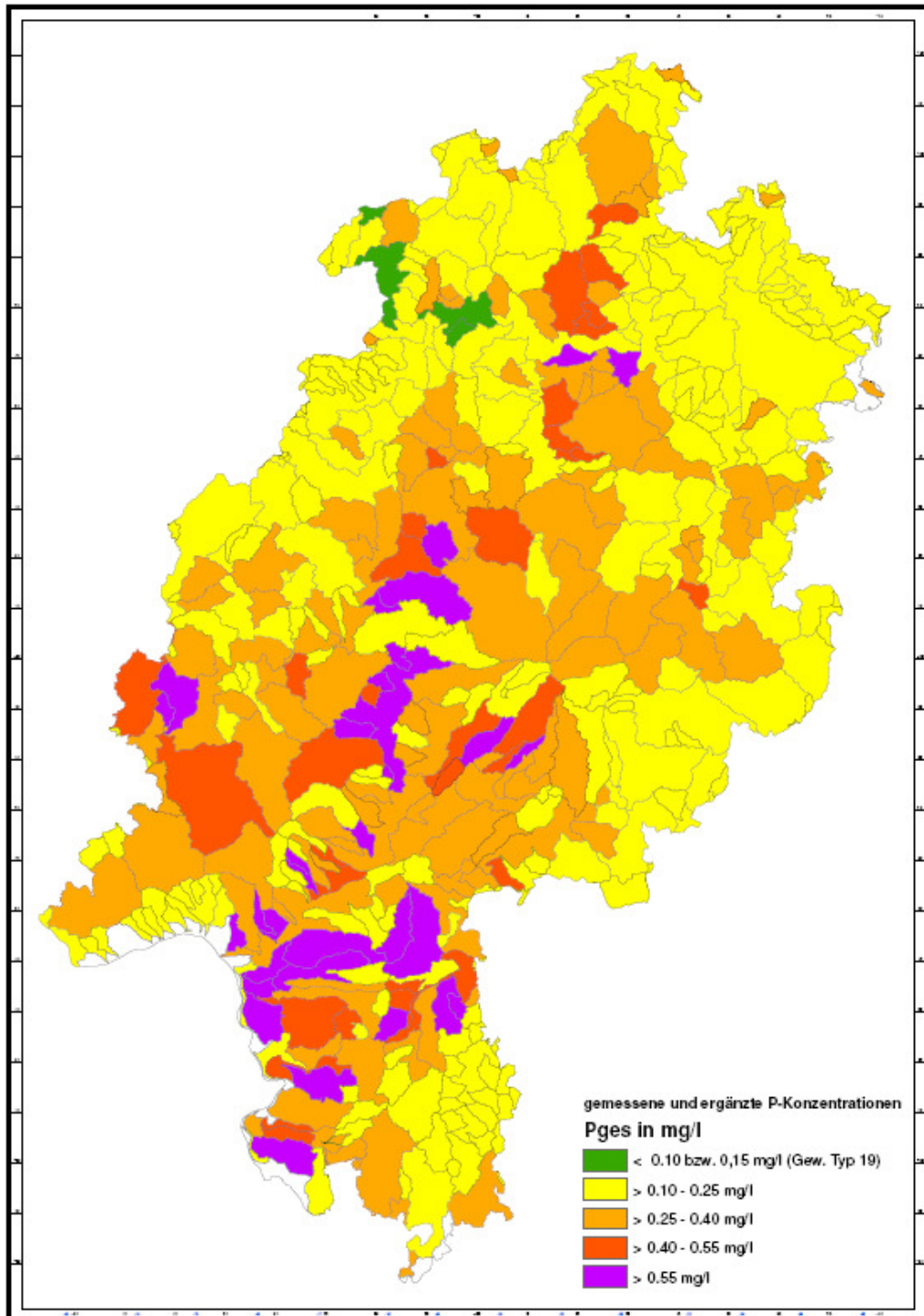


Abb. 9: Gesamtphosphorbelastung der Wasserkörper aus Konzentrationsmessungen 2005-2007, fehlende Messwerte durch empirische Abschätzung ergänzt

Anmerkung zur Karte: Bei der rechnerischen Zuordnung von P-Belastungen zu Wasserkörpern, bei denen keine Messwerte vorliegen, kommt es zu Ungenauigkeiten. Entsprechend ist für den Einzelfall zu prüfen, inwieweit auf Grund des errechneten P-Defizits tatsächlich entsprechende Belastungen vorliegen.

## **4 MASSNAHMENPROGRAMM**

### **4.1 METHODENBESCHREIBUNG**

Die in einem ersten Schritt durchgeführte Bewertung der Wasserkörper im Hinblick auf Gesamphosphor orientiert sich ausschließlich an den in Kapitel 3 dargestellten gemessenen und ergänzten Immissionsdaten. Die Ableitung des Handlungsbedarfs für die einzelnen Wasserkörper basiert grundsätzlich auf einem Vergleich dieser Ist-Werte mit einem zuvor festgelegten Ziel-Wert für die im Gewässer zu erreichende P-Fracht (guter Zustand).

Dieser Zielwert wurde in Abstimmung mit den Projektbeteiligten für die Mehrzahl der Wasserkörper auf 0,1 mg/l Gesamphosphor festgelegt (vgl. [8], [11]). Ausschließlich für die insbesondere in Südhessen vorkommenden Niederungsgewässer (Gewässertyp 19) wird ein abweichender Zielwert von 0,15 mg/l berücksichtigt. Bezugsgröße für die Bestimmung der daraus abzuleitenden zulässigen P-Fracht ist, wie bereits bei der Auswertung von Immissionsdaten, der mittlere Abfluss MQ.

Unter Berücksichtigung der aus dem Vergleich von Ist-Wert und Soll-Wert für jeden Wasserkörper abgeleiteten Defizite werden im nächsten Schritt zielführende Maßnahmenvorschläge zur Reduzierung der P-Einträge erarbeitet.

Auf Grund der zu einem großen Teil aus Punktquellen stammenden Frachten steht insbesondere die Reduzierung der Einträge aus Kläranlagen sowie Misch- und Regenwassereinleitungen im Mittelpunkt der Maßnahmenplanung. Entsprechende Vorschläge werden zunächst als Einzelmaßnahmen technisch beschrieben und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Phosphorelimination bewertet (vgl. auch [9]).

Maßnahmen zur Reduzierung diffuser P-Einträge werden ausschließlich aus den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten „Szenarien erosiven  $P_{\text{ges}}$ -Eintrags“ [10] übernommen.

Abhängig von der Art der Einzelmaßnahmen ist davon auszugehen, dass sich diese vorzugsweise für die Anwendung auf bestimmte Anlagen- bzw. Wirkungsgruppen eignen (z.B. Kläranlagen einer bestimmten Größenordnung). Mit Blick auf die abschließende Maßnahmenplanung werden zuvor definierte Einzelmaßnahmen zunächst in entsprechenden Wirkungsgruppen zusammengefasst und ggf. in Kombination mit anderen Maßnahmen auf die P-Eintragspfade der einzelnen Wasserkörper angewendet.

Dabei wird diese für eine Maßnahme oder Maßnahmenkombination ermittelte, mögliche Frachteinsparung von der tatsächlichen Belastung des jeweils betrachteten Wasserkörpers subtrahiert. Im Ergebnis entsteht somit eine angepasste Belastungskarte, anhand der die Wirkung der zuvor definierten Maßnahmenkombinationen deutlich wird.

Unter Berücksichtigung der maximal erreichbaren Reduzierung des P-Eintrags kann im Ergebnis für jeden Wasserkörper eine neue Phosphorbelastung ermittelt werden, die im günstigsten Fall unterhalb des Schwellenwertes von 0,1 mg/l bzw. 0,15 mg/l liegt. Wird dieser Zielwert mit den angesetzten Maßnahmen nicht erreicht, wäre zu erörtern, woher die verbleibenden P-Einträge stammen und welche zusätzlichen Maßnahmen zur weiteren Verbesserung des Gewässerzustandes ggf. getroffen werden können.

Nicht zuletzt richtet sich die Umsetzung von Maßnahmenkombinationen nach dem hierfür anzusetzenden Zeit- und Kostenaufwand. Für die vorgeschlagenen Maßnahmen wurden entsprechende Richtwerte zusammengestellt und in der Planung berücksichtigt. Ergebnis der Gesamtbewertung ist ein gemäß WRRL in Zeitstufen gestaffeltes Maßnahmenprogramm, mit dem eine schrittweise Reduzierung der Gesamtphosphorbelastung erreicht werden soll.

## 4.2 HANDLUNGSBEDARF

Inwieweit eine Reduzierung der Phosphoreinträge ins Gewässer erforderlich ist, wird insbesondere anhand von biologischen Indikatoren ermittelt. Als wesentlicher Indikator für die Bewertung von Phosphoreinträgen gilt insbesondere der Trophieindex. Dieser wird in Fließgewässern hauptsächlich anhand des Artenspektrums und der Häufigkeit von verschiedenen Kieselalgen im Gewässer ermittelt. Ein erhöhtes Vorkommen nährstoffanzeigender Algenarten lässt auf ein eutrophiertes Gewässer schließen und ist somit Zeichen dafür, dass eine Reduzierung der Phosphoreinträge erforderlich wird. Abb. 10 (rechts) zeigt die Bewertung des ökologischen Zustands der Wasserkörper anhand des Trophieindex (Teilkomponente Kieselalgen) gemäß dem nationalen Bewertungsverfahren „PHYLIB“. Handlungsbedarf besteht grundsätzlich für Wasserkörper, deren ökologischer Zustand in die Klassen 3 und höher eingestuft wurde. Darüber hinaus wird die Phosphorbelastung der Gewässer messtechnisch erfasst und bewertet.

Gemäß WRRL wurden in Hessen in den vergangenen Jahren für insgesamt 266 Wasserkörper Überwachungsmessungen zur Bestimmung der Gesamtposphorkonzentrationen im Gewässer durchgeführt. Für die übrigen 167 Wasserkörper, die kaum Phosphoreinträge aus Kläranlageneinleitungen erhalten, wurde im Rahmen des landesweiten Monitoring zunächst auf entsprechende Konzentrationsmessungen verzichtet. Die gemessenen Konzentrationen werden neben der biologischen Bewertung zur Einschätzung des Handlungsbedarfs herangezogen. Es gelten die u.a. in Abb. 9 zugrunde gelegten Zielwerte von 0,10 mg/l bzw. 0,15 mg/l  $P_{ges}$ .

Befindet sich ein Wasserkörper jedoch in einem guten ökologischen Zustand, so besteht – unter der Voraussetzung von sicheren und zuverlässigen Ergebnissen – zunächst kein Handlungsbedarf zur Reduzierung der P-Einträge, auch wenn die gemessenen Phosphor-Konzentrationswerte ggf. den Zielwert überschreiten.

Konzentrationsmessung für  $P_{ges}$  und die Bewertung des ökologischen Zustandes werden unterstützt durch zusätzlich vorliegende Analysen des Orthophosphatgehalts (Ortho-P) als weiterem Kriterium zur Abschätzung des Handlungsbedarfs. Im Abwasser liegt ein großer Teil des Gesamtposphors in anorganisch gelöster Form als Ortho-P vor (vgl. 4.3.1.1 ). Dieser gilt als der biologisch leichter verfügbare Phosphoranteil, der sich insofern ebenfalls für die Bewertung des Gewässerzustandes anbietet. Setzt man für Ortho-P die nach LAWA vorgeschlagenen Zielwerte 0,07 bzw. 0,10 mg/l an (vgl. [11]), so ist, wie in Abb. 10 (links) dargestellt, davon auszugehen, dass nach den vorliegenden Messungen insgesamt bereits mehr Wasserkörper die Anforderungen des guten „stofflichen“ Zustandes erfüllen als auf der Grundlage  $P_{ges}$ .



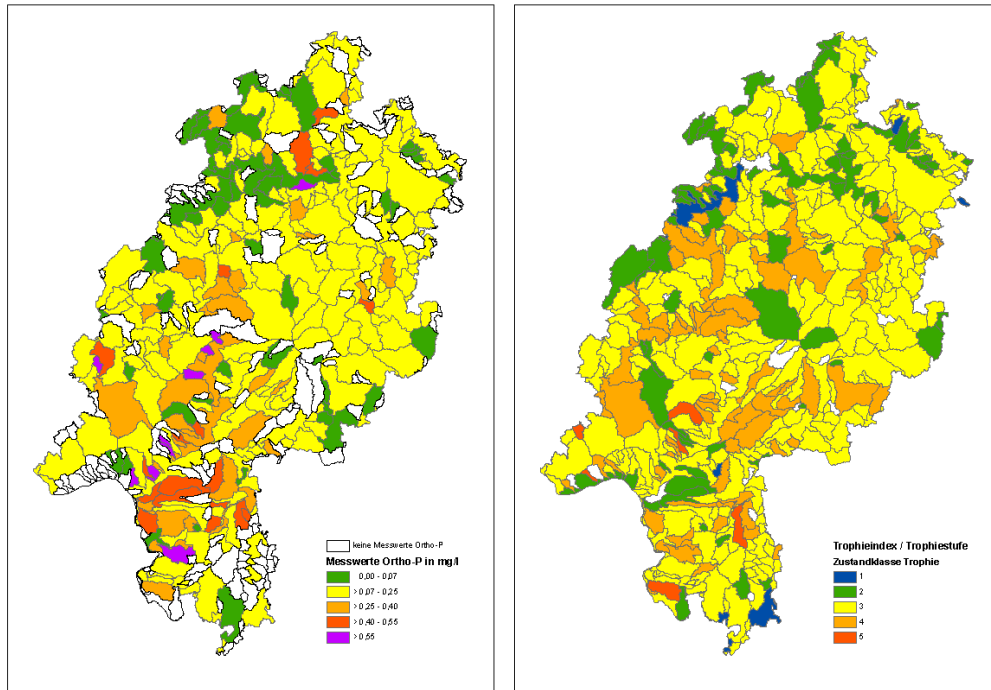


Abb. 10: Konzentrationsmittelwerte „Ortho-P“ (links) - Zustandsklassen „Trophie“ (rechts)

Unter Berücksichtigung von gemessenen Phosphorkonzentrationen (Immissionsbetrachtung) und den Ergebnissen der Einstufung nach Ortho-P und biologischen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass in den meisten hessischen Wasserkörpern Handlungsbedarf besteht, d.h. eine Reduzierung des P-Eintrags erforderlich ist (vgl. Abb. 12).

Insgesamt lassen sich jedoch auch eine Reihe von Wasserkörpern ausmachen, die sich auf Grund der Ergebnisse der biologischen Untersuchungen (Trophie) bereits in einem guten Zustand befinden. Insbesondere für diese 82 Wasserkörper kann grundsätzlich unabhängig von den Zielwerten für Phosphor davon ausgegangen werden, dass kein Handlungsbedarf besteht. Bei Wasserkörpern, die keinen guten Zustand hinsichtlich der Trophie aufweisen, in denen aber die Orientierungswerte für Phosphor unterschritten werden, sind weitere Prüfungen erforderlich. Maßgeblich für den Handlungsbedarf ist letztlich allein der biologische Befund. Unter Berücksichtigung der Klassifizierungen für Phosphor und Trophie-Index ergibt sich für die betrachteten 450 hessischen Wasserkörper ein Ergebnis gemäß Abb. 11.



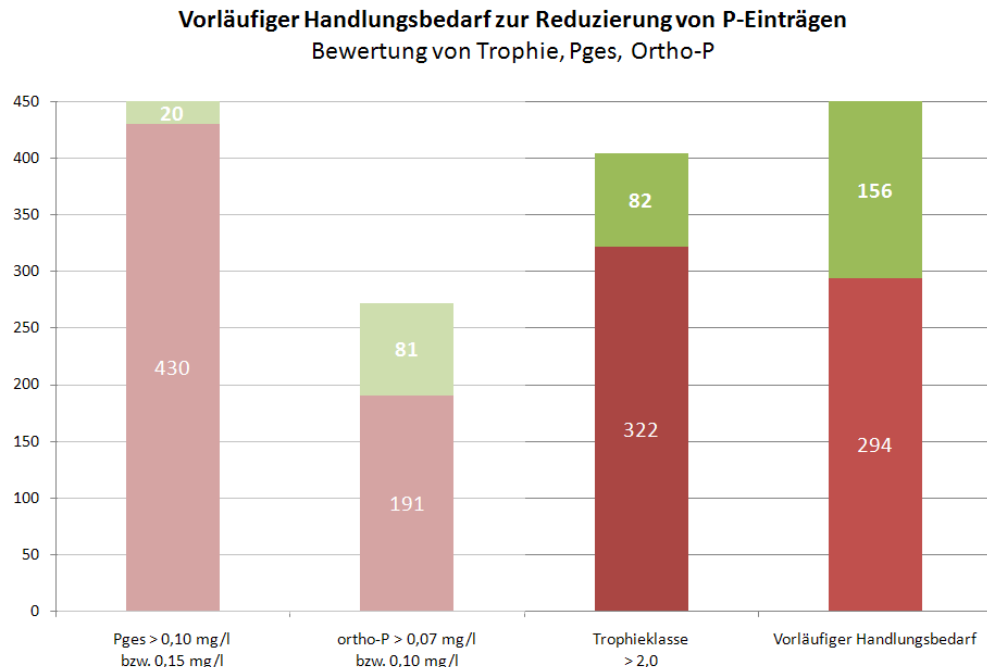


Abb. 11: Einschätzung des vorläufigen Handlungsbedarfs zur P-Reduzierung in hessischen Wasserkörpern unter Anwendung unterschiedlicher Bewertungskriterien

Sowohl die Ergebnisse aus der Zustandsbewertung nach „Trophie“ und „Ortho-P“ als auch die in Abb. 9 und Abb. 11 dargestellten Immissionswerte ermöglichen zunächst nur eine grundsätzliche Einschätzung des Handlungsbedarfs für die unterschiedlichen Wasserkörper. Ursachen für die ggf. erhöhte Gesamtphosphorbelastung lassen sich aus dieser Immissionsbetrachtung nicht ableiten. Um die im Folgenden näher beschriebenen Maßnahmen jedoch gezielt auf die wesentlichen Emissionspfade abzustimmen, ist eine Unterscheidung der Phosphoreinträge nach Haupteintragspfaden erforderlich. Unter Berücksichtigung der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Ausgangsdaten nach MEPhos [12] ergibt sich die in Abb. 13 dargestellte Verteilung. Entsprechend wurde davon ausgegangen, dass insbesondere für P-Einträge aus Kläranlagenabläufen (55% der Gesamtfracht) ein erhebliches Einsparungspotenzial besteht. Weitere Maßnahmen betreffen die Einträge aus diffusen Quellen (34%), wie z.B. der Landwirtschaft sowie aus Misch- und Regenwassereinleitungen (11%).

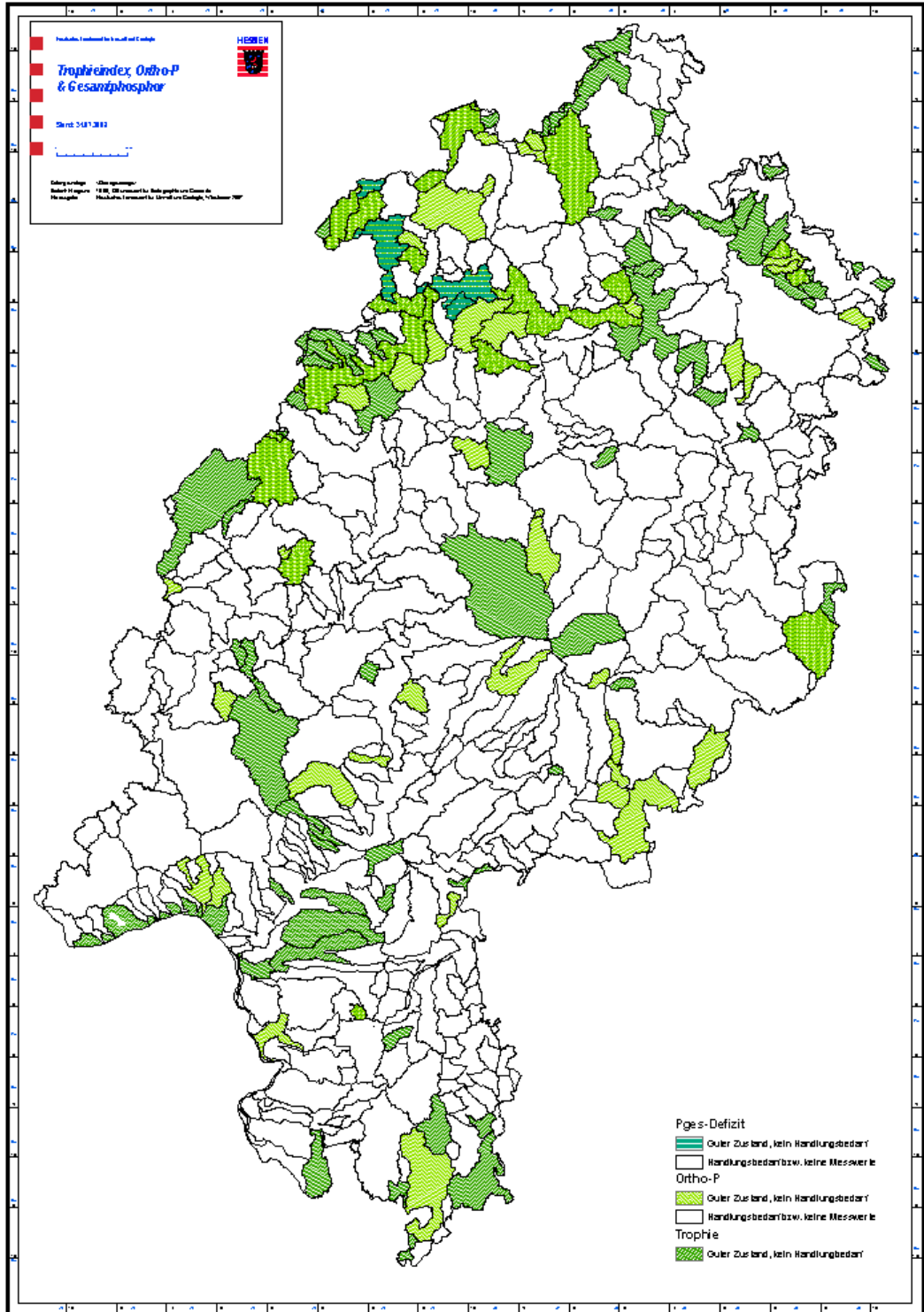


Abb. 12: Wasserkörper, für die auf der Grundlage Trophie-Index der ökologisch gute Zustand besteht oder die Zielwerte für  $P_{ges}$  bzw. Ortho-P eingehalten sind

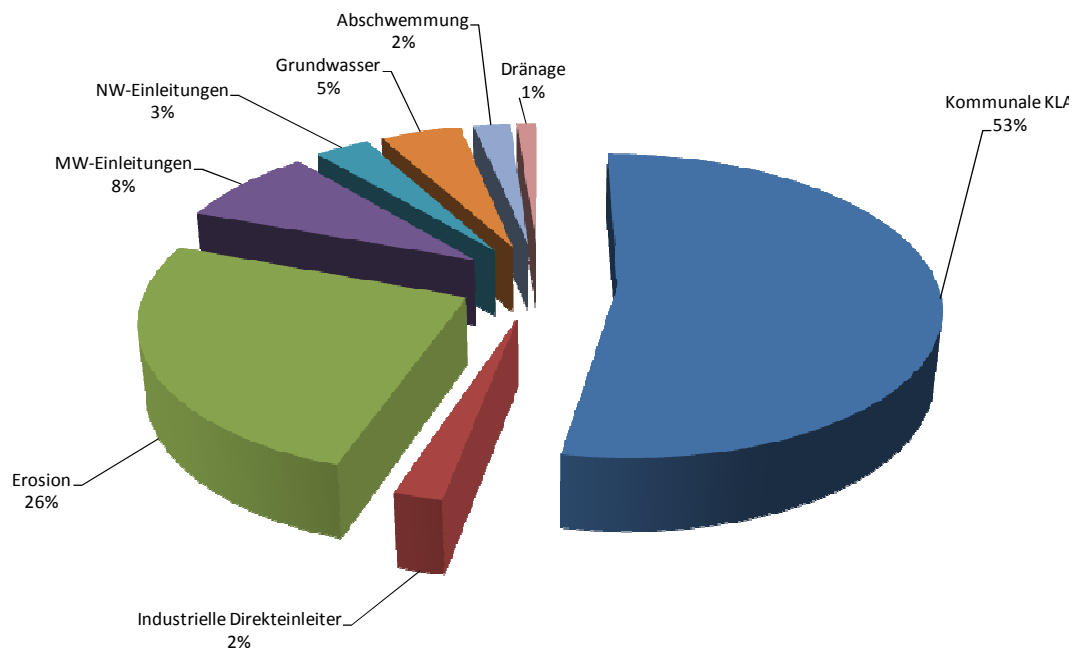


Abb. 13: Eintragspfade für Gesamtphosphor nach MEPhos (nach [12], Stand: April 2008)

Aus den beschriebenen Immissions- und Emissionsbetrachtungen (Überwachungswerte und MEPhos) liegen sehr umfangreiche Informationen zur Gesamtphosphorbelastung hessischer Wasserkörper vor. Auf Grund der bei der Ermittlung dieser Daten z.T. getroffenen Annahmen sind die Ergebnisse der Defizitanalyse für den Parameter Gesamtphosphor und der daraus abgeleitete Handlungsbedarf mit Blick auf die im Folgenden beschriebene Maßnahmenplanung jedoch grundsätzlich kritisch zu hinterfragen. Auf folgende Sachverhalte sei hingewiesen:

- Es liegen nicht für alle Wasserkörper geeignete Ergebnisse aus der Überwachungsmessung vor. Die ergänzten Immissionsdaten stellen eine Abschätzung dar und können die fehlenden Messwerte nur bedingt ersetzen.
- Die Mittelwerte der Konzentrationen an den Überwachungsmessstellen basieren i.d.R. auf einer unterschiedlichen Anzahl von Einzelmessungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten und unter wechselnden Randbedingungen erfasst wurden.
- Die pauschale Verwendung des langjährigen MQ zur Ermittlung der Frachten ohne Berücksichtigung des zum Zeitpunkt der Konzentrationsmessung tatsächlich vorherrschenden Abflusses an der Messstelle führt i.d.R. zu einer Überschätzung der tatsächlichen Fracht.
- Die Zahl der Untersuchungsergebnisse aus dem Überwachungsprogramm Kieselalgen ist z.Z. nur gering. So beruhen die oben dargestellten Ergebnisse zur trophischen Situation der Wasserkörper (siehe Abb. 11) oft nur auf ei-

ner Untersuchung innerhalb eines Wasserkörpers. Mit zunehmender Überwachung wird die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse sukzessive ansteigen.

Unter Berücksichtigung der im Rahmen des weiteren Monitoring erhobenen Daten und zusätzlich gewonnenen Erkenntnisse, sind vor diesem Hintergrund die vorliegenden Auswertungen der Defizitanalyse und in der Folge die vorgeschlagene Maßnahmenplanung zukünftig weiter anzupassen und zu verfeinern.

### 4.3 MASSNAHMENVORSCHLÄGE

Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen orientieren sich zunächst grundsätzlich an den Maßnahmenblättern des Handbuchs „Grundlagen für die Auswahl kosteneffizienter Maßnahmenkombinationen zur Aufnahme in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Wasserrahmenrichtlinie“ [9] (vgl. Tabelle 4.1). Unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Defizitanalyse für den Parameter Gesamtposphor konzentrieren sich die weiteren Ausführungen jedoch ausschließlich auf die identifizierten Haupt-Eintragspfade „kommunale Kläranlagen“ sowie „Misch- und Niederschlagswassereinleitungen“.

Maßnahmen, die auf eine Reduzierung des diffusen P-Eintrags abzielen, wurden ausschließlich auf Grund bereits erarbeiteter und vom Auftraggeber zur Verfügung gestellter Szenarien [10] in das Gesamtszenario und die Maßnahmenplanung eingebunden.

Tabelle 4.1: Maßnahmenblätter nach Umweltbundesamt [9]

| Nr. | Maßnahmenblatt  |
|-----|---|
| 1.1 | Ertüchtigung einer Kläranlage hinsichtlich der Parameter $BSB_5$ , CSB, $NH_4-N$ , $N_{ges}$ oder $P_{ges}$ .   |
| 1.2 | Reduzierung des Eintrags von Stoffen aus chemischer Produktion und Anwendung von Membranfiltern   |
| 1.3 | Qualifizierte Entwässerung im Misch- und Trennverfahren   |
| 1.4 | Dezentrale Maßnahmen zur Abflussvermeidung, -verminderung und –verzögerung: Nutzung von Entsiegelungspotenzialen und Versickerung von Regenwasser; Empfehlung zu einem gesplitteten Gebührenmaßstab |
| 1.5 | Bauwerke zur Misch- und Niederschlagswasserbehandlung (Retentionsbodenfilter, Regenüberlaufbecken, Stauraumkanäle, Regenrückhaltebecken)  |
| 1.6 | Unterstützende Maßnahmen zur Verringerung stofflicher Belastungen aus Niederschlagswassereinleitungen   |
| 2.1 | Verringerung von Nährstoff- und Pestizideinträgen durch Einrichtung von Uferandstreifen   |
| 2.2 | Verminderung der Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer und Grundwasser  |
| 2.3 | Verminderung der Phosphoreinträge in Oberflächengewässer  |
| 2.4 | Umweltgerechte Handhabung von Pflanzenschutzmitteln – Einhalten der Grundsätze der guten fachlichen Praxis im Pflanzenschutz  |
| 3.1 | Schaffen ökologisch verträglicher hydraulischer Verhältnisse durch Abflussregelungen, insbesondere hinsichtlich der Wasserstandsregulierung   |
| 4.1 | Schaffen ökologisch verträglicher hydraulischer Verhältnisse durch Abflussregelungen, insbesondere hinsichtlich der Restwasserdotierung   |
| 4.2 | Ökologisch ausgerichtete Hochwasserschutzkonzeption mit gezielter Verbesserung der Strukturgüte   |
| 5.1 | Herstellung der linearen Durchgängigkeit für Auf- und Abwärtswanderung der standorttypischen Arten  |
| 5.2 | Unterstützende wasserbauliche Maßnahmen zur Umgestaltung der Gewässermorphologie  |
| 5.3 | Standortgemäße, eigendynamische Entwicklung des Gewässerverlaufs durch modifizierte, extensivierte Gewässerunterhaltung   |
| 5.4 | Verbesserung der Ufer- und Sohlenstrukturen   |

Die in Tabelle 4.1 hervorgehobenen Maßnahmen 1.1 und 1.3 bis 1.5 zielen primär auf eine Verbesserung der Wasserqualität durch Reduzierung stofflicher Einträge, wie z.B. Phosphor. Inhalte und Ziele dieser Maßnahmen werden im Folgenden getrennt für die Eintragspfade Kommunale Kläranlagen und Misch-/Niederschlagswassereinleitungen näher erläutert.

### 4.3.1 Kommunale Kläranlagen

#### 4.3.1.1 Grundlagen

Phosphor kommt in der Natur in organischen und anorganischen Verbindungen vor. Im Abwasser liegt knapp die Hälfte des Gesamtphosphors ( $P_{ges}$ ) in partikulärer Form (davon der überwiegende Teil als organisch gebundener Phosphor  $P_{org}$ ) und die andere Hälfte in gelöster Form vor. Der gelöste Anteil besteht überwiegend aus den anorganischen Verbindungen ortho-Phosphat ( $oPO_4^{3-}$ , v.a. aus Urin) und Polyphosphaten (Poly-P, v.a. aus Geschirrspülmitteln) sowie zu einem geringeren Teil aus organischen P-Verbindungen (z.B. Phosphonate aus Waschmitteln).

Der einwohnerspezifische Gesamtphosphoranfall im Abwasser hat sich durch das Verbot von Polyphosphaten in Waschmitteln von früher über 4 g P/(E·d) auf ca. 1,8 g P/(E·d) (Jahr 2000, gemäß A 131 [13]) reduziert, wobei in den letzten Jahren wieder ein Anstieg über Maschinengeschirrspülmittel zu beobachten ist. In Anlehnung an einen DWA-Arbeitsbericht von 2003 [14] wird die aktuelle einwohnerspezifische P-Fracht daher mit **1,9 g P/(E·d)** angesetzt. Entsprechend dem jeweiligen Abwasseranfall ergeben sich Phosphor-Konzentrationen im Zulauf kommunaler Kläranlagen von 5-15 mg/l, bei einem Abwasseranfall von 200 l/(E·d) etwa **10 mg/l P**. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine P-Bilanz kommunaler Kläranlagen auf Grundlage der Angaben aus [14].

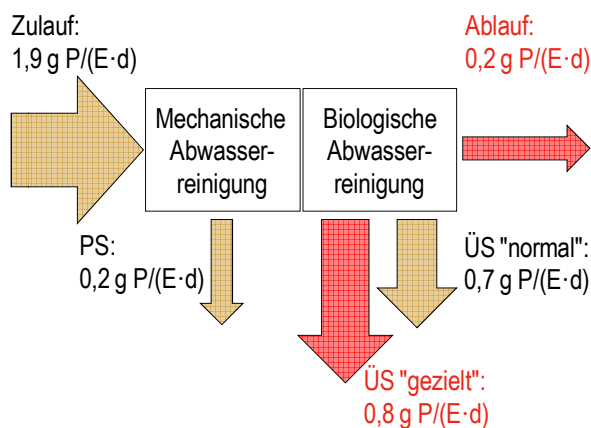


Abb. 14: Phosphorbilanz kommunaler Kläranlagen

Soll über die „normale“ P-Elimination mit dem Primärschlamm (ca. 0,2 g P/(E-d)) und dem Überschussschlamm (ca. 0,7 g P/(E-d)) hinaus gezielt Phosphor eliminiert werden, so werden hierzu zwei Verfahren eingesetzt:

- **Chemisch-Physikalische Phosphorelimination**  
Durch die Zudosierung von Fällmitteln (meist Eisen- oder Aluminiumsalze) wird das im Abwasser gelöste Phosphat in unlösliche Verbindungen überführt. Aufgrund von Konkurrenzreaktionen muss überstöchiometrisch Fällmittel zudosiert werden, was durch erhöhte  $\beta$ -Werte (Verhältnis zudosierte zu theoretisch erforderliche Fällmittelmenge) von z.B.  $\beta = 1,5$  berücksichtigt wird. Aus den unlöslichen Verbindungen bilden sich Flocken, die ausfallen und als Schlamm abgetrennt werden. Dabei werden auch partikuläre Phosphorverbindungen mitgefällt.
- **Erhöhte biologische P-Elimination („Bio-P“)**  
Durch den Wechsel aerober und anaerober Bedingungen im Belebungsbecken kommt es zur Anreicherung von Phosphat im Schlamm durch spezielle Bakterien. Mit dem Überschussschlammabzug wird der Phosphor aus dem System entfernt. Da mit rein biologischer P-Elimination die Überwachungswerte nicht sicher eingehalten werden können, werden die Kläranlagen meist mit einer unterstützenden P-Fällung ausgerüstet.

Mit gezielter P-Elimination sind Ablaufkonzentrationen von **ca. 1 mg/l** (entsprechend ca. 0,2 g P/(E-d)) betriebssicher zu erreichen. Nach [15] kann davon ausgegangen werden, dass davon etwa 0,25 mg/l P partikulär gebunden vorliegt und etwa 0,1 mg/l P gelöst, aber nicht fällbar sind. Der Rest von etwa 0,5-0,7 mg/l P ist fällbares ortho-Phosphat.

Bei der Bemessung von Kläranlagen gemäß DWA-A 131 [13] wird davon ausgegangen, dass eine Dimensionierung für Überwachungswerte  $< 1,0$  mg/l nicht möglich ist. Im Betrieb können jedoch durchaus geringere Ablaufkonzentrationen erzielt werden, indem die ortho-Phosphat-Fracht weiter reduziert wird. Gujer (1999, [16]) gibt Ablaufwerte von **0,5 mg/l P** an, die mit der Simultanfällung erreicht werden. Allerdings wird bei diesen Ablaufkonzentrationen mit höheren Fällmittelmengen (d.h. höheren  $\beta$ -Werten) gerechnet.

Je nach Feststoffabtrieb aus der Nachklärung kann sich die P-Konzentration erhöhen. So führt nach DWA-A 131 [13] ein Feststoffabtrieb von 1 mg/l im Ablauf zu einer Erhöhung der P-Konzentration um 0,02 bis 0,04 mg/l. Dies zeigt, dass zur Sicherstellung niedriger P-Ablaufkonzentrationen neben der P-Elimination auch das Belebungsverfahren, bestehend aus Belebungsbecken und Nachklärung, funktionsfähig sein muss.

#### 4.3.1.2 Datenbasis

Als Datengrundlage für die Auswahl und Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der P-Elimination auf kommunalen Kläranlagen diente die Datei *TE\_KA\_001-002\_KaFrEls\_Szenario.xls* [6] mit Stand Ende 2005. Diese entspricht dem Lagebericht 2006 zur „Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen“ [22].

Die vorliegenden Kläranlagendaten wurden getrennt nach Größenklassen ausgewertet. Zur Ermittlung der Phosphorfrachten (alle Angaben als  $P_{ges}$ ) wurden für jede Größenklasse die Frachten der einzelnen Kläranlagen aufsummiert. Die Einzelfrachten wurden der Datei *TE\_KA\_001-002\_KaFrEls\_Szenario.xls* [6] entnommen. Diese Frachten sind nach Angabe des Auftraggebers berechnete Werte, die als Produkt aus der mittleren  $P_{ges}$ -Ablaufkonzentration gemäß EKVO-Kontrolle 2005 (Mittelwert aus den vorliegenden 24h- bzw. 2h- Mischproben) und der Jahresabwassermenge ermittelt wurden.

#### 4.3.1.3 Emittierte Phosphorfrachten in Hessen im Ist-Zustand

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Danach werden 723 hessische Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von insgesamt ca. 10 Mio. EW in die Auswertung einbezogen. Von diesen Anlagen wird insgesamt eine Jahresfracht von **817 t/a Phosphor** emittiert.

Tabelle 4.2: Emittierte Phosphorfrachten hessischer Kläranlagen 2005

| Größenklasse                 | Anzahl Anlagen<br>[-] | Ausbaugröße<br>[EW] | $P_{ges}$ -Ablauf-<br>fracht<br>[t/a] | Anteil Fracht<br>[%] |
|------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|----------------------|
| GK 5 (> 100.000 EW)          | 10                    | 3.755.000           | 141                                   | 17                   |
| GK 4 (> 10.000 – 100.000 EW) | 158                   | 5.114.403           | 354                                   | 43                   |
| GK 3 (> 5.000 – 10.000 EW)   | 79                    | 610.240             | 110                                   | 13                   |
| GK 2 (> 1.000 – 5.000 EW)    | 243                   | 623.394             | 169                                   | 21                   |
| GK 1 (< 1.000 EW)            | 233                   | 127.646             | 43                                    | 5                    |
| <b>Summe GK 1 – GK 5</b>     | <b>723</b>            | <b>10.230.683</b>   | <b>817</b>                            | <b>100</b>           |

Die von den Kläranlagen der einzelnen Größenklassen emittierten Phosphorfrachten sind als Übersicht in Abb. 15 dargestellt.



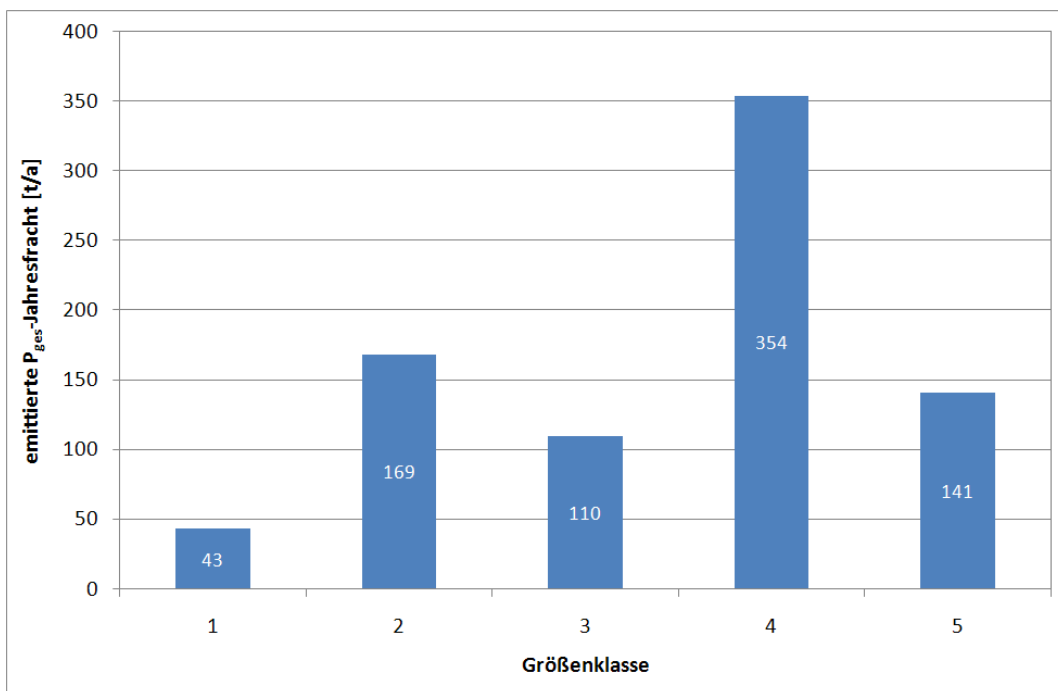


Abb. 15: Emittierte Phosphor-Jahresfrachten in Hessen im Jahr 2005 in Abhängigkeit der Größenklasse

Wie die Abb. 15 zeigt, liefern die Kläranlagen der **Größenklasse 4** (10.000 – 100.000 EW) den weitaus größten P-Frachtanteil von **43 % der Gesamtfracht**. Die von den Kläranlagen der Größenklasse 2 (1.000 – 5.000 EW) eingeleitete P-Fracht liegt in der gleichen Größenordnung wie die der Größenklasse 5 (> 100.000 EW). Dabei stehen den 243 berücksichtigten Kläranlagen der Größenklasse 2 insgesamt 10 Kläranlagen der Größenklasse 5 gegenüber. Die P-Fracht aus Anlagen der Größenklasse 3 (5.000 – 10.000 EW) ist etwas geringer, die der Größenklasse 1 (< 1.000 EW) mit nur 5 % der Gesamtfracht vernachlässigbar.

In Abb. 16 sind die derzeitigen mittleren Phosphor-Ablaufkonzentrationen aller Kläranlagen nach Größenklassen dargestellt.

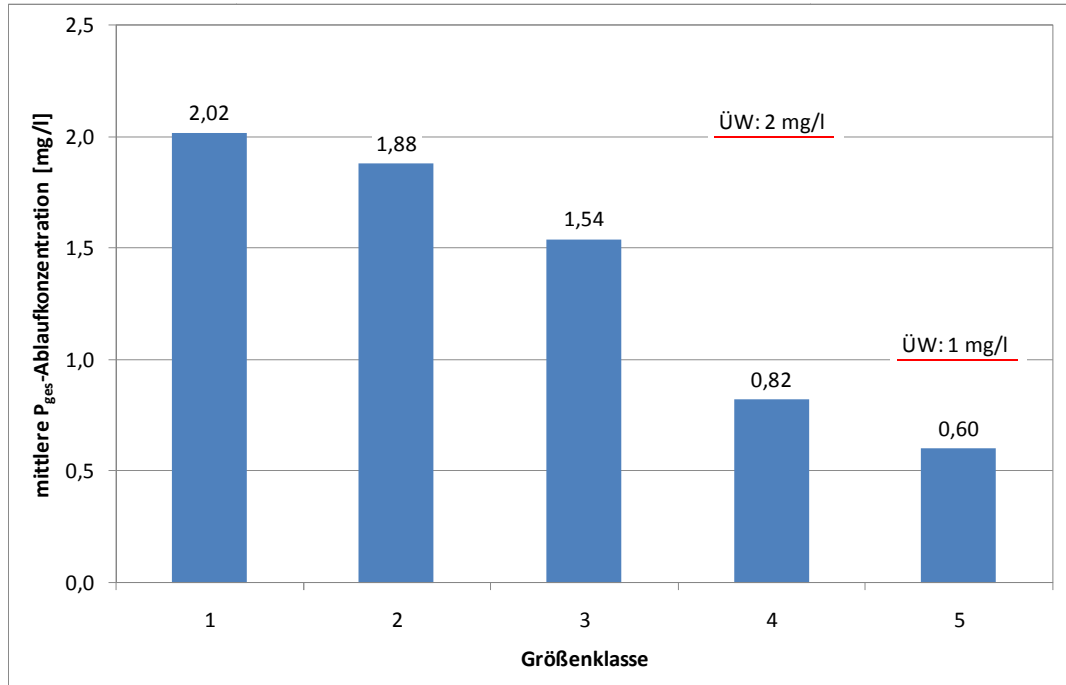


Abb. 16: Mittlere Phosphor-Ablaufkonzentrationen in Hessen im Jahr 2005 in Abhängigkeit der Größenklasse

Die Ablaufkonzentrationen variieren mit der Größenklasse. In den Größenklassen 1-3 ist gemäß Abwasserverordnung [17] kein Überwachungswert für Phosphor einzuhalten. Örtlich kann jedoch ein Überwachungswert festgesetzt sein.

Für die Größenklasse 4 liegt der Überwachungswert laut Abwasserverordnung bei 2 mg/l und für die Größenklasse 5 bei 1 mg/l. Im Mittel werden diese Überwachungswerte deutlich unterschritten. Auch hier können jedoch örtlich verschärfte Bedingungen vorliegen.

#### 4.3.1.4 Einzelmaßnahmen

Die emittierten Phosphorfrachten können durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden. Die mögliche Reduzierung wird im Folgenden berechnet. Dabei werden folgende Maßnahmengruppen unterschieden:

- **Maßnahmengruppe 1:** Kläranlagen ohne gezielte P-Elimination
- **Maßnahmengruppe 2:** Kläranlagen mit P-Fällung (und ggf. Bio-P)
- **Maßnahmengruppe 3:** Kläranlagen mit rein biologischer P-Elimination

#### MAßNAHMENGRUPPE 1: KLÄRANLAGEN OHNE GEZIELTE P-ELIMINATION

Von den 555 Kläranlagen der Größenklassen 1-3 besitzen 477 Anlagen keine gezielte P-Elimination. Davon entfallen 54 Anlagen auf die Größenklasse 3, 208 Anlagen auf die Größenklasse 2 und 218 Anlagen auf die Größenklasse 1.

#### Maßnahme 1.1: Errichtung einer P-Fällungsanlage

Die in Tabelle 4.3 aufgeführte Reduktion der P-Jahresfracht basiert auf der Errichtung einer „einfachen“ P-Fällung mit mittleren Ablaufkonzentrationen von ca. 1 mg/l. Dieser Zielwert erscheint realistisch, da die mit einer P-Fällung ausgerüsteten Kläranlagen derzeit mittlere Ablaufwerte von 1,22 mg/l (GK 2) bzw. 1,11 mg/l (GK 3) erreichen (vgl. Tabelle 4.4 auf Seite 34).

Tabelle 4.3: Reduktion der emittierten P-Fracht durch Errichtung einer P-Fällungsanlage

|  | Einheit      | GK 1        | GK 2        | GK 3        | GK 4 | GK 5 |
|--|--------------|-------------|-------------|-------------|------|------|
| Anzahl der Kläranlagen                 | [-]          | 233         | 243         | 79          | 158  | 10   |
| davon ohne gezielte P-Elimination      | [-]          | 218         | 205         | 54          | 0    | 0    |
| von diesen emittierte P-Fracht*        | [t/a]        | 41          | 151         | 87          | 0    | 0    |
| Jahresabwassermenge (JAM)              | [m³/a]       | 20.034.176  | 76.133.295  | 50.765.522  |      |      |
| mittl. Ablaufkonz. (Ist)**             | [mg/l]       | 2,06        | 1,99        | 1,72        |      |      |
| mittl. Ablaufkonz. mit P-Fällung       | [mg/l]       | 1,00        | 1,00        | 1,00        |      |      |
| emittierte P-Fracht mit P-Fällung      | [t/a]        | 20          | 76          | 51          |      |      |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>21</b>   | <b>75</b>   | <b>36</b>   |      |      |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>2,6%</b> | <b>9,2%</b> | <b>4,4%</b> |      |      |

\* Summe der P<sub>ges</sub>-Einzelfrachten gemäß Tabelle TE\_KA\_001-002\_KaFrEls\_Szenario.xls; die Einzelfrachten sind berechnete Werte (JAM · Mittel der EKVO-Werte 2005)

\*\* rückgerechnet als Quotient P<sub>ges</sub>-Jahresfracht/JAM

Die Errichtung einer P-Fällung auf allen Anlagen der **Größenklasse 3** ohne P-Elimination würde somit zu einer Reduktion der gesamten von hessischen Kläranlagen emittierten P-Fracht um **4,4 %** führen. Hierzu wären 54 Anlagen umzurüsten. Die Errichtung einer P-Fällung auf Anlagen der **Größenklasse 2** würde zu einer doppelt so hohen Reduktion von **9,2 %** führen. Hierzu wären allerdings viermal so viele Kläranlagen umzurüsten (205 Anlagen). In der Größenklasse 1 ist die erzielbare Reduktion mit 2,6 % gering, sodass eine Nachrüstung der 218 Anlagen hier nicht lohnt.

Insgesamt ließe sich durch Nachrüstung aller Anlagen der **Größenklasse 2+3** eine Reduktion der gesamten von hessischen Kläranlagen emittierten P-Fracht um 111 t/a = **13,6 %** erzielen. Hierzu müssten 259 Anlagen umgerüstet werden.

Als Verfahren bietet sich hier die auch auf den größeren Kläranlagen eingesetzte Simultanfällung an. Als Fällmittel kommen meist Eisen- oder Aluminiumverbindungen zum Einsatz. Es werden Baumaßnahmen zur Errichtung der Fällungsanlage erforderlich.

### **Maßnahme 1.2: Bio-P oder Kombination Bio-P/Fällung**

Eine Alternative zur chemisch-physikalischen P-Elimination (Fällung) ist prinzipiell die erhöhte biologische P-Elimination (Bio-P). Die derzeitige mittlere Ablaufkonzentration der Kläranlagen der GK 2+3 ohne gezielte P-Elimination liegt jedoch bereits bei Konzentrationen kleiner 2,0 mg/l (siehe obige Tabelle). Mit reiner Bio-P lässt sich keine wesentlich geringere Ablaufkonzentration betriebssicher erreichen, da die Eliminationsgrade stark schwanken können. Die biologische P-Elimination wird daher meist in Kombination mit einer P-Fällung durchgeführt.

Die biologische P-Elimination ist vor allem dann wirtschaftlich, wenn bestehende Becken oder Beckenteile genutzt werden können, d.h. kein Neubau notwendig ist. Wenn ausreichend Beckenvolumen zur Verfügung steht und die verfahrenstechnischen und baulichen Voraussetzungen gegeben sind, sollten die Möglichkeiten zur Bio-P stets ausgeschöpft werden. So kann z.B. im Sommer, wenn bei höheren Abwassertemperaturen ein geringeres Beckenvolumen benötigt wird als bemessungstechnisch ausgewiesen, ein Teil des Volumens für die biologische P-Elimination aktiviert werden. Da einzelne Faktoren der Kläranlagen wie Abwasserzusammensetzung, Beckenanordnung und Leitungsführung eine Rolle spielen und die Anwendbarkeit der Bio-P daher einzelfallspezifisch ist, wird die pauschale Ausweitung der biologischen P-Elimination hier nicht weiter untersucht.

## MAßNAHMENGRUPPE 2: KLÄRANLAGEN MIT P-FÄLLUNG (UND GGF. BIO-P)

Die Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 (> 10.000 EW) müssen laut Abwasserverordnung die Überwachungswerte hinsichtlich Phosphor einhalten und sind daher überwiegend mit Einrichtungen zur P-Fällung ausgerüstet, teilweise in Kombination mit erhöhter biologischer P-Elimination. Auch von den Kläranlagen der Größenklasse 1 bis 3 sind einige Anlagen zur Fällung ausgerüstet. Durch eine betriebliche Optimierung der Fällung können die Ablaufkonzentrationen und damit die emittierten P-Frachten verringert werden.

### Maßnahme 2.1: Betriebliche Optimierung vorhandener Fällungsanlagen

Tabelle 4.4 zeigt, wie sich bei den Anlagen mit P-Fällung eine reduzierte Phosphorkonzentration im Ablauf auf die emittierten P-Frachten auswirkt. Da die mittlere berechnete Ablaufkonzentration der Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 mit Fällung bereits 0,85 mg/l bzw. 0,63 mg/l beträgt, wurde eine Verringerung auf 0,5 mg/l für alle betrachteten Anlagen angesetzt. Dieser Wert ist bei entsprechendem Betrieb der Fällung durchaus erreichbar (vgl. Kapitel 4.3.1.1).

Tabelle 4.4: Reduktion der emittierten P-Fracht durch betriebliche Optimierung

|  | Einheit      | GK 1        | GK 2        | GK 3        | GK 4         | GK 5        |
|--|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Anzahl der Kläranlagen                 | [-]          | 233         | 243         | 79          | 158          | 10          |
| davon mit gezielter P-Elimination      | [-]          | 15          | 38          | 25          | 158          | 10          |
| davon mit Fällung                      | [-]          | 13          | 32          | 25          | 129          | 9           |
| von diesen emittierte P-Fracht*        | [t/a]        | 2           | 14          | 23          | 294          | 135         |
| Jahresabwassermenge (JAM)              | [m³/a]       | 1.234.974   | 11.703.001  | 20.566.696  | 347.528.953  | 214.981.641 |
| mittl. Ablaufkonz. (Ist)**             | [mg/l]       | 1,57        | 1,22        | 1,11        | 0,85         | 0,63        |
| mittl. Ablaufkonz. nach Opt.           | [mg/l]       | 0,50        | 0,50        | 0,50        | 0,50         | 0,50        |
| emittierte P-Fracht nach Opt.          | [t/a]        | 1           | 6           | 10          | 174          | 107         |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>1</b>    | <b>8</b>    | <b>13</b>   | <b>121</b>   | <b>28</b>   |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>0,2%</b> | <b>1,0%</b> | <b>1,5%</b> | <b>14,8%</b> | <b>3,4%</b> |

\* Summe der Einzelfrachten gemäß Tabelle TE\_KA\_001-002\_KaFrEls\_Szenario.xls; die Einzelfrachten sind berechnete Werte (JAM · Mittel der letzten EKVO-Werte)

\*\* rückgerechnet als Quotient P-Jahresfracht/JAM

Die Aufstellung zeigt deutlich, dass mit betrieblicher Optimierung die weitaus größte P-Fracht-Reduktion auf den Anlagen der **GK 4** zu erzielen ist (**ca. 15 % der Gesamtfracht**). Auf den Anlagen der GK 5 liegt die mittlere Ablaufkonzentration bereits bei 0,63 mg/l, sodass das Potenzial für eine weitere Reduktion gering ist. Die Anlagen der GK 1-3 mit P-Fällung sind frachtmäßig nicht relevant.

Zur betrieblichen Optimierung sollte zunächst eine generelle Betriebsberatung erfolgen, um sicher zu stellen, dass die Fällungsanlage entsprechend ihrer Auslegung betrieben wird. Als nächstes ist eine Optimierung der Dosierstelle, der Einmischung, ggf. des Fällmittels und der Steuer-/Regelstrategie vorzunehmen. An letzter Stelle sollte die Erhöhung der Fällmittelmenge ( $\beta$ -Wert) stehen.

### **Maßnahme 2.2: Ergänzung von Fällungsanlagen um eine zusätzliche Reinigungsstufe**

Durch die Fällung bis auf P-Ablaufkonzentrationen von 0,5 mg/l wird der fällbare Anteil am gesamten Phosphor so weit reduziert, dass eine weitere Verringerung der Ablaufkonzentration nur noch durch eine Kombination aus Fällung/Flockung und Filtration erreicht werden kann. Hierdurch wird auch der in Feststoffen partikulär gebundene Phosphor eliminiert. Zur Feststoffreduzierung im Ablauf bei gleichzeitig effizienter Reduzierung der Phosphorfrachten sind folgende nachgeschaltete Verfahren denkbar:

- **Mikrosiebung (MS):** erreichbare mittl. Ablaufkonz.: 0,3 mg P/l
- **Flockungsfiltration (FF):** erreichbare mittl. Ablaufkonz.: 0,2 mg P/l [18]
- **Membranfiltration (MF):** erreichbare mittl. Ablaufkonz.: 0,1 mg P/l

Die angegebenen Ablaufkonzentrationen beruhen auf Literaturangaben und Erfahrungswerten. Eine weitere Verringerung der Phosphorkonzentration im Ablauf kommunaler Kläranlagen ist nach derzeitigem Stand der Technik nicht möglich.

Bei der Mikrosiebung ist eine vorgeschaltete Sekundärfällung/Flockung erforderlich. FlockungsfILTER haben in der Regel eine höhere Abscheideleistung hinsichtlich Phosphor. Die höchste Phosphorelimination lässt sich mit nachgeschalteter Membranfiltration erzielen. Haupteinsatzzweck der Membranfiltration ist meist die Reduzierung der Konzentration der noch im Ablauf vorhandenen Keime. Alle drei Verfahren sollten aus Kostengründen und auch im Interesse eines optimalen Betriebs der Verfahren erst dann zum Einsatz kommen, wenn die betrieblichen Möglichkeiten zur Optimierung der Fällung erschöpft sind.

In Tabelle 4.5 ist für die genannten P-Ablaufkonzentrationen die mögliche Verringerung der P-Jahresfrachten in den einzelnen Größenklassen aufgeführt.

Tabelle 4.5: Reduktion der emittierten P-Fracht durch zusätzl. Reinigungsstufe

|  | Einheit      | GK 1        | GK 2        | GK 3        | GK 4         | GK 5         |
|--|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Anzahl der Kläranlagen                 | [-]          | 233         | 243         | 79          | 158          | 10           |
| davon mit gezielter P-Elimination      | [-]          | 15          | 38          | 25          | 158          | 10           |
| davon mit Fällung                      | [-]          | 13          | 32          | 25          | 129          | 9            |
| von diesen emitt. P-Fracht n. Opt.*    | [t/a]        | 1           | 6           | 10          | 174          | 107          |
| Jahresabwassermenge (JAM)              | [m³/a]       | 1.234.974   | 11.703.001  | 20.566.696  | 347.528.953  | 214.981.641  |
| mittl. Ablaufkonz. n.Opt.              | [mg/l]       | 0,50        | 0,50        | 0,50        | 0,50         | 0,50         |
| mittl. Ablaufkonz. mit MS              | [mg/l]       | 0,30        | 0,30        | 0,30        | 0,30         | 0,30         |
| emittierte P-Fracht mit MS             | [t/a]        | 0           | 4           | 6           | 104          | 64           |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>0</b>    | <b>2</b>    | <b>4</b>    | <b>70</b>    | <b>43</b>    |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>0,0%</b> | <b>0,3%</b> | <b>0,5%</b> | <b>8,5%</b>  | <b>5,3%</b>  |
| mittl. Ablaufkonz. mit FF              | [mg/l]       | 0,20        | 0,20        | 0,20        | 0,20         | 0,20         |
| emittierte P-Fracht mit FF             | [t/a]        | 0           | 2           | 4           | 70           | 43           |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>0</b>    | <b>4</b>    | <b>6</b>    | <b>104</b>   | <b>64</b>    |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>0,0%</b> | <b>0,4%</b> | <b>0,8%</b> | <b>12,8%</b> | <b>7,9%</b>  |
| mittl. Ablaufkonz. mit MF              | [mg/l]       | 0,10        | 0,10        | 0,10        | 0,10         | 0,10         |
| emittierte P-Fracht mit MF             | [t/a]        | 0           | 1           | 2           | 35           | 21           |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>0</b>    | <b>5</b>    | <b>8</b>    | <b>139</b>   | <b>86</b>    |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>0,1%</b> | <b>0,6%</b> | <b>1,0%</b> | <b>17,0%</b> | <b>10,5%</b> |

\* gemäß Tabelle 4.4

Die Errichtung einer 3. Stufe auf den 9 Anlagen der **Größenklasse 5** mit Fällung (nach betrieblicher Optimierung) würde somit zu einer weiteren Reduktion der gesamten von hessischen Kläranlagen emittierten P-Fracht um ca. **5-10 %** führen. Die Errichtung einer 3. Stufe auf allen Anlagen der Größenklasse 4 würde zu einer höheren Reduktion von 8-17 % führen. Hierzu wären allerdings 129 Kläranlagen umzurüsten, was aus Kostengründen kaum vertretbar wäre. Neben den hohen Investitionskosten verursachen nachgeschaltete Anlagen zudem weitere Betriebskosten für die Abwasserförderung und das Rückspülen der Filter/Siebe. Ihre Betreuung erfordert als zusätzliche Verfahrensstufe weitere Personalkosten.

**MAßNAHMENGRUPPE 3: KLÄRANLAGEN MIT REIN BIOLOGISCHER P-ELIMINATION**

Auf Kläranlagen mit ausschließlich biologischer P-Elimination (ohne Fällung) ist es denkbar, die Eliminationsleistung durch eine zusätzliche Fällung weiter zu verbessern. Dies ist in Tabelle 4.6 dargestellt. Dabei wird in den kleineren Größenklassen von einer „einfachen“ P-Fällung mit mittleren Ablaufkonzentrationen von ca. 1 mg/l ausgegangen wie in Maßnahme 1.1. In GK 4 wird eine „optimierte“ Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l angesetzt wie in Maßnahme 2.1.

Tabelle 4.6: Reduktion der emittierten P-Fracht durch Errichtung einer P-Fällungsanlage auf Anlagen mit rein biologischer P-Elimination

|  | Einheit      | GK 1        | GK 2        | GK 3 | GK 4        | GK 5       |
|--|--------------|-------------|-------------|------|-------------|------------|
| Anzahl der Kläranlagen                 | [-]          | 233         | 243         | 79   | 158         | 10         |
| davon mit gezielter P-Elimination      | [-]          | 15          | 38          | 25   | 158         | 10         |
| davon mit ausschließlich Bio-P         | [-]          | 2           | 6           | 0    | 26          | 1          |
| von diesen emittierte P-Fracht         | [t/a]        | 0,2         | 3,2         | 0    | 52          | 5,7        |
| Jahresabwassermenge (JAM)              | [m³/a]       | 177.925     | 1.852.535   | 0    | 74.102.359  | 18.925.722 |
| mittl. Ablaufkonz. (Ist)               | [mg/l]       | 1,01        | 1,72        | -    | 0,70        | 0,30       |
| mittl. Ablaufkonz. mit P-Fällung*      | [mg/l]       | 1,00        | 1,00        | -    | 0,50        | -          |
| emittierte P-Fracht mit P-Fällung      | [t/a]        | 0,2         | 1,9         | -    | 37          | -          |
| <b>Reduktion der P-Fracht</b>          | <b>[t/a]</b> | <b>0,0</b>  | <b>1,3</b>  | -    | <b>15</b>   | -          |
| <b>bez. auf Gesamtfracht (817 t/a)</b> | <b>[%]</b>   | <b>0,0%</b> | <b>0,2%</b> | -    | <b>1,8%</b> | -          |

\* GK 4: optimierter Betrieb vorausgesetzt

Nach den zur Verfügung stehenden Daten handelt es sich im Wesentlichen um eine Anlage der GK 5 sowie 26 Anlagen der GK 4. Die mittleren Ablaufkonzentrationen liegen bereits bei 0,3 mg/l (GK 5) bzw. 0,7 mg/l (GK 4). Bei den wenigen Anlagen der GK 1 und 2 sind die Ablaufkonzentrationen ebenfalls bereits relativ niedrig. In der GK 3 sind keine Anlagen mit rein biologischer P-Elimination vorhanden. Bei der Anlage der GK 5 ist bekanntermaßen bereits eine nachgeschaltete 3. Stufe vorhanden (Mikrosiebung mit Sekundärfällung/Flockung). Bei den Anlagen der GK 4 ist die durch Fällung erzielbare Frachtreduktion selbst bei optimiertem Betrieb (Ablaufkonzentration 0,5 mg/l) mit 1,8 % der Gesamtfracht minimal. Entsprechend bleibt diese Maßnahme im Folgenden unberücksichtigt.



#### 4.3.1.5 Wirksamkeit

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass mit folgenden Maßnahmen die größte P-Frachtreduzierung erreicht werden kann:

- **Maßnahme 1.1:** Ausrüstung der Kläranlagen der Größenklassen 1-3 mit Fällungsanlagen (Verringerung der P-Ablaufkonzentration auf 1 mg/l)
- **Maßnahme 2.1:** Optimierung aller vorhandenen Fällungsanlagen (Verringerung der P-Ablaufkonzentration auf 0,5 mg/l)
- **Maßnahme 2.2:** Zusätzliche Errichtung einer 3. Stufe auf Anlagen mit Fällung nach Optimierung der Fällung (Weitere Verringerung der P-Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l auf 0,1-0,3 mg/l)

In der folgenden Abbildung 6.1 sind die Reduktionspotenziale für die untersuchten Maßnahmen dargestellt.

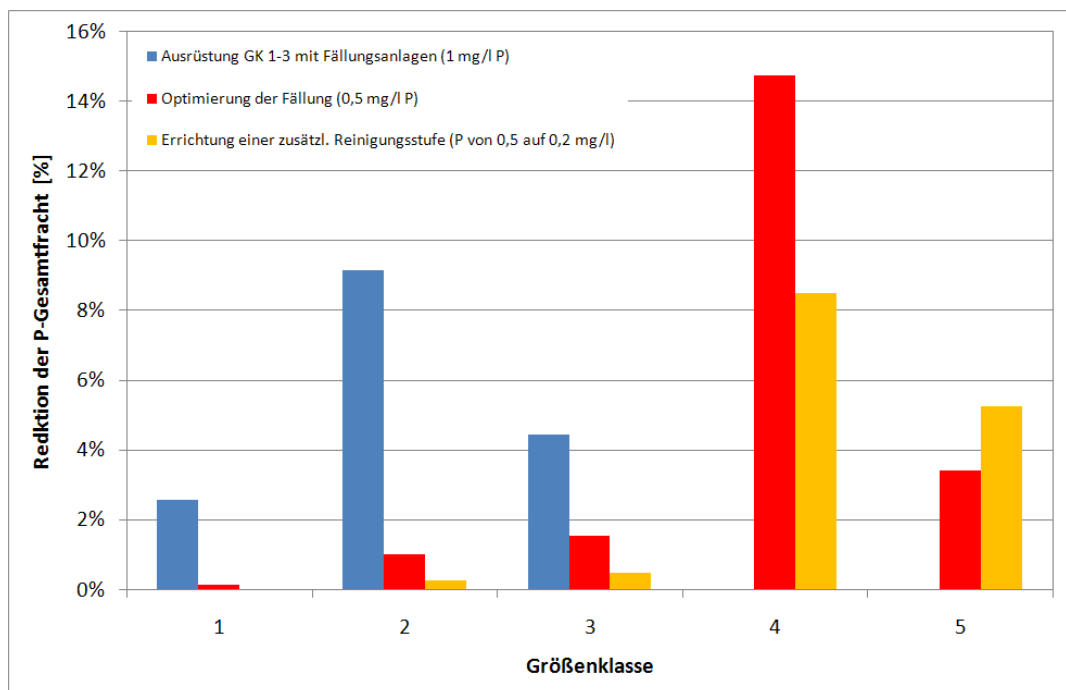


Abb. 6.1: Reduktion der P-Gesamtfracht durch unterschiedliche Maßnahmen

Durch die Ausrüstung der **kleineren Kläranlagen (Größenklassen 1-3)** mit einer Fällung kann vor allem in der Größenklasse 2 das größte Reduktionspotenzial erreicht werden. In **Größenklasse 2 und 3** zusammen ließe sich die Gesamtfracht um **13,6 %** reduzieren. In der Größenklasse 3 sind 54 Kläranlagen betroffen, im Bereich der Größenklasse 2 mit 205 Kläranlagen fast viermal so viele Anlagen. Die Optimierung vorhandener Fällungsanlagen oder der Einsatz nach-

geschalteter Verfahrensstufen würden hier nur eine geringe Reduktion der emittierten P-Fracht bewirken.

Für die Anlagen der **Größenklassen 4 und 5** bestehen bereits flächendeckende Anforderungen an die P-Elimination.

In der **Größenklasse 5** liegt die mittlere Ablaufkonzentration bereits bei 0,6 mg/l. Das Reduktionspotenzial einer betrieblichen Optimierung auf Ablaufkonzentrationen von 0,5 mg/l ist daher gering. Eine nennenswerte Verringerung der P-Gesamtfracht kann hier erst durch eine Kombination aus Fällung und nachgeschalteten Verfahren erfolgen. Hierzu wären die 9 vorhandenen Fällungsanlagen der GK 5 jedoch mit einer Flockungsfiltration, Mikrosiebung oder Mikrofiltration nachzurüsten, um auch die in abtreibenden Feststoffen enthaltenen P-Anteile gezielt abscheiden zu können. Damit könnte die emittierte P-Fracht um **ca. 5-10 % der Gesamtfracht** gesenkt werden.

Eine deutlich größere Reduktion der P-Frachten ergeben Maßnahmen im Bereich der **Größenklasse 4**. Hier könnte durch eine betriebliche Optimierung der vorhandenen Fällungsanlagen die mittlere P-Ablaufkonzentration auf 0,5 mg/l gesenkt und dadurch eine Verringerung der P-Frachten um **ca. 15 % der Gesamtfracht** erzielt werden. Durch den Einsatz nachgeschalteter Verfahrensstufen ließe sich eine weitere Frachtreduktion von ca. 13 % erzielen. Allerdings wären für die Ausrüstung der insgesamt 129 Fällungsanlagen mit einer 3. Stufe sehr hohe Kosten aufzuwenden.

#### 4.3.1.6 Kosten

Den beschriebenen Verringerungen der emittierten P-Frachten stehen Kosten gegenüber, die durch diese Maßnahmen verursacht werden. Diese Kosten werden hier für einzelne Maßnahmen geschätzt.

##### **MAßNAHMENGRUPPE 1: AUSRÜSTUNG VON KLÄRANLAGEN DER GK 2 & 3 MIT FÄLLUNGSANLAGEN**

Die Kostenschätzung erfolgte unter Berücksichtigung folgender Ansätze:

- **Investitionskosten**  
Für die Ausrüstung der Anlagen der GK 3 mit einer fest installierten P-Fällungsanlage wurden pauschal 75.000 € angesetzt, um die Kosten für den Dosiertank, die Pumpentechnik, die Verrohrung, den Abfüllplatz, MSR-Technik und die Anbindung an die vorhandene E-Technik zu berücksichtigen. Die Kosten basieren auf Angaben von Herstellern der Fällmittelstationen (SAT GmbH, 2008), Kosten aus eigenen Projekten und Angaben aus [19]. In der GK 2 wurden zur Hälfte Festinstallationen (größere Kläranlagen) und zur Hälfte mobile Anlagen á 15.000 € (kleinere Kläranlagen) gerechnet. Bezogen auf die Ausbaugröße der Anlagen ohne P-Elimination ergeben sich spezifische Investitionskosten (aufgerundet) von **20 €/EW** in GK 2 und **15 €/EW** in GK 3.
- **Kosten für Fällmittel**  
Es wurden Kosten für die Fällung mit Eisen(III) Chlorid angesetzt. Eisen III ist eine gebrauchsfertige Lösung und daher insbesondere für kleinere Anlagen geeignet. Nach Angaben des Herstellers Sidra Chemie, Ibbenbüren (2008) liegen die Kosten bei 130 bis 150 €/t. Der Eisenanteil der Lösung beträgt 14 %. Für die kleineren Anlagen wurden Kosten von 150 €/t angesetzt.
- **Ansatz des  $\beta$ -Werts**  
Als  $\beta$ -Wert wurde zum Erreichen einer P-Ablaufkonzentration von 1 mg/l ein Wert von 1,5 angesetzt. Dies entspricht den Angaben im DWA-Arbeitsblatt A 202 [18].
- **Klärschlammwässerung und -entsorgung**  
Durch den Einsatz der Fällmittel entsteht zusätzlicher Schlamm. Für die Schlammwässerung wurden zusätzliche Kosten von 30 €/t für Anlagen der GK 3 bzw. 45 €/t für GK 2 angesetzt. Alternativ ist insbesondere für kleinere Anlagen eine landwirtschaftliche Verwertung des Nassschlammes ( $TR_{\min} = 5\%$ ) möglich, so dass sich die Kosten auf 13 €/t für GK 3 und 16 €/t für GK2 redu-

zieren lassen. Diese Kosten wurden anhand von aktuellen Angaben der Em-  
schergenossenschaft [20] abgeschätzt und mit weiteren Literaturangaben ab-  
geglichen.

- **Personalkosten**

Die Angabe des Personaleinsatzes erfolgt auf Basis des DWA-Merkblatts M  
271 [21]. Die Personalkosten wurden auf Basis eines Jahresgehalts von  
40.000 € brutto geschätzt.

- **Jahreskostenberechnung**

In die Jahreskostenberechnung gingen folgende Ansätze ein:

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Abschreibungszeitraum <sup>1</sup> : | 10 Jahre |
| Zinssatz:                            | 4 %      |

Die Auswertung führt zu Investitionskosten in Höhe von ca. 16,3 Mio. €. Bei Jah-  
reskosten in Höhe von rund 3,5 Mio. € liegen die spezifischen Jahreskosten je  
eliminiertes kg P bei 31 bzw. 33 €/a für die GK 2 und 3. Je angeschl. EW und  
Betriebsjahr wurden spezifische Kosten in Höhe von 2,80 bis 4,60 €/(EW\*a) ge-  
schätzt.

---

<sup>1</sup> Abschreibungszeitraum für Maßnahmen gem. FisMapro abweichend: 30 Jahre  
Abschreibung von Membrananlagen vereinfacht: eigentlich 7 – 8 Jahre

**MAßNAHMENGRUPPE 2.1:  
OPTIMIERUNG DER FÄLLUNG AUF KLÄRANLAGEN DER GK 4 & 5**

Abweichend von Maßnahmengruppe 1 wurden folgende Kostenansätze berücksichtigt:

- **Investitionskosten**

Zur Verbesserung der eingesetzten Technik werden pauschal 70.000 € für Kläranlagen der Größenklasse 4 und 200.000 € für Kläranlagen der Größenklasse 5 kalkuliert. Die Kosten stehen für die Anpassung der Fällungsanlage an die verschärften Anforderungen zur Verfügung. Dies sind Kosten für eine Betriebsberatung, die Erweiterung der Fällmittelstation, Erweiterung der Messtechnik, andere Dosierstellen sowie eine Erweiterung/Modernisierung der Steuerung. Z.B. kann durch eine Dosierung an zwei unterschiedlichen Dosierstellen (Zulauf und Ablauf der Belebung) als Zweipunktfällung in der Regel mit einem geringeren  $\beta$ -Wert gearbeitet werden und so die benötigten Fällmittelmengen reduziert werden.

Bezogen auf die Ausbaugröße der Anlagen mit P-Fällung ergeben sich spezifische Investkosten (aufgerundet) von **3 €/EW** in GK 4 und **1 €/EW** in GK5.

- **Kosten für Fällmittel**

Entsprechend der Größenklassen der Kläranlagen können die spezifischen Fällmittelkosten leicht unterschiedlich angesetzt werden. Für die Größenklasse 4 sind dies 140 €/t und für die Größenklasse 5 entsprechend 130 €/t.

- **Ansatz des  $\beta$  –Werts**

Zum Erreichen der geringeren Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l wurde der  $\beta$ -Wert gegenüber Maßnahmengruppe 1 auf 2,0 heraufgesetzt.

- **Klärschlammwässerung und –entsorgung**

Entsprechend der Größenklasse der Kläranlage wurden höhere Kosten für die Klärschlammwässerung angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass mit der Kläranlagengröße auch der Anteil der Schlämme, die in die Mitverbrennung bzw. Monoverbrennung gehen, stark zunimmt. Deshalb wurde für die Größenklasse 4 mit 105 €/t und für die Größenklasse 5 mit 75 €/t gerechnet.

Für die Optimierung der vorhandenen Fällung auf Kläranlagen der GK 4 und 5 werden Investitionskosten in Höhe von ca. 10,8 Mio. € abgeschätzt. Die spezifischen Jahreskosten für eine Verbesserung der P-Elimination liegen für die Größenklasse 4 bei ca. 21 €/kg  $P_{\text{eliminiert}}$ . Für die Größenklasse 5 liegt der Betrag bei 16 €/kg  $P_{\text{eliminiert}}$ .

**MAßNAHMENGRUPPE 2.2:  
ZUSÄTZLICHE REINIGUNGSSTUFE AUF KLÄRANLAGEN DER GK 4 & 5**

Innerhalb der Maßnahmengruppe 2.2 wird eine Auswahl unterschiedlicher Verfahren bewertet, für die grundsätzlich unterschiedliche Invest- und Betriebskosten anzusetzen sind. Zur Verbesserung der P-Elimination durch eine zusätzliche Reinigungsstufe werden verfahrensabhängig für die GK 4 und 5 folgende Kosten abgeschätzt:

- **Investitionskosten**

|                      |   |
|----------------------|---|
| Mikrosiebung:        | 1,0 bis 8,0 Mio. €/Anlage                               |
| Flockungsfiltration: | 4,0 bis 25,0 Mio. €/Anlage                              |
| Membranfiltration:   | abh. von JAM 100 bis 120 €/m <sup>2</sup> Membranfläche |

Die spezifischen Investitionskosten reichen damit von **30 bis 250 €/EW** (vgl. auch Abb. 17 ).

- **Kosten für Fällmittel**

Fällmittelkosten, wurden entsprechend Maßnahmengruppe 2.1 unverändert mit 140 €/t und 130 €/t angenommen. Verfahrensabhängig werden jedoch unterschiedliche Mengen Fällmittel benötigt (vgl. Betriebskosten gemäß Abb. 17).

- **Personalkosten**

Die Angabe des Personaleinsatzes erfolgt auf Basis des DWA-Merkblatts M 271 [21]. Die Personalkosten wurden auf Basis eines Jahresgehalts von 40.000 € brutto geschätzt. Je nach Verfahren wird ein Personalbedarf von

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Mikrosiebung:        | 20 bis 30 h/Monat            |
| Flockungsfiltration: | 30 bis 40 h/Monat            |
| Membranfiltration:   | 60 bis 80 h/Monat angesetzt. |

- **Klärschlammwässerung und –entsorgung**

Der Schlammwässerung und –entsorgung liegen die gleichen spezifischen Kostenansätze zugrunde wie für Maßnahmengruppe 2.1. Auf Grund unterschiedlicher Schlammengen unterscheiden sich jedoch die in diesem Bereich für die unterschiedlichen Verfahren entstehenden Gesamtkosten.

Hinzu kommen unterschiedliche Ansätze für Reinigungsmittel und Energiebedarf. Für die zusätzliche Reinigungsstufe auf Kläranlagen der GK 4 und 5 werden auf dieser Grundlage Investitionskosten in Höhe von ca. 260 Mio. € für die Mikrosiebung und 1,3 bis 1,6 Mrd. € für die Flockungs- bzw. Membranfiltration abgeschätzt. Die spezifischen Jahreskosten für eine Verbesserung der P-Elimination liegen weitgehend unabhängig von der Größenklasse bei ca. 300 bis 3.000 €/kg P<sub>eliminiert</sub>.

| Größenklasse   |             | GK1          | GK 2         | GK3           | GK 4           | GK5           | Gesamt        |
|--|-------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|  |             | bis 1.000 EW | bis 5.000 EW | bis 10.000 EW | bis 100.000 EW | ab 100.000 EW |               |
| Anzahl Anlagen gesamt  | Stk.        | 233          | 243          | 79            | 158            | 10            | 723           |
| Ausbaugröße gesamt   | EW          | 127.646      | 623.394      | 610.240       | 5.114.403      | 3.755.000     | 10.230.683    |
| <b>1. zusätzliche P-Fällung</b>  |             |              |              |               |                |               |               |
| Anlagen ohne P-Elimination   | Stk.        |              | 205          | 54            |                |               |               |
| Ausbaugröße ohne P-Elimination   | EW          |              | 509.717      | 409.090       |                |               |               |
| Investkosten gesamt  | €           |              | 10.194.340   | 6.136.350     |                |               | 16.330.690    |
| spezifische Investkosten   | €/EW        |              | 20,00        | 15,00         |                |               |               |
| Jahreskosten   | €/a         |              | 2.414.583    | 1.221.149     |                |               |               |
| davon Betriebskosten   | €/a         |              | 1.157.713    | 464.592       |                |               |               |
| spezifische Jahreskosten   | €/kg Pel. a |              | 32           | 34            |                |               |               |
|  | €/EW a      |              | 4,74         | 2,99          |                |               |               |
| <b>2. Optimierung vorh. Fällung</b>  |             |              |              |               |                |               |               |
| Anlagen mit P-Fällung  | Stk.        |              |              |               | 129            | 9             |               |
| Ausbaugröße mit P-Fällung  | EW          |              |              |               | 3.989.053      | 3.425.000     |               |
| Investkosten gesamt  | €           |              |              |               | 9.030.000      | 1.800.000     | 10.830.000    |
| spezifische Investkosten   | €/EW        |              |              |               | 2,26           | 0,53          |               |
| Jahreskosten   | €/a         |              |              |               | 2.619.311      | 472.689       |               |
| davon Betriebskosten   | €/a         |              |              |               | 1.505.994      | 250.765       |               |
| spezifische Jahreskosten   | €/kg Pel. a |              |              |               | 22             | 17            |               |
|  | €/EW a      |              |              |               | 0,66           | 0,14          |               |
| <b>3. Zusätzliche Reinigungsstufe</b><br>(bei bereits optimierter Fällung) |             |              |              |               |                |               |               |
| <b>a) Mikrosiebung</b>   |             |              |              |               |                |               |               |
| Investkosten gesamt  | €           |              |              |               | 159.562.120    | 102.750.000   | 262.312.120   |
| spezifische Investkosten   | €/EW        |              |              |               | 40,00          | 30,00         |               |
| Jahreskosten   | €/a         |              |              |               | 21.957.177     | 13.666.681    |               |
| davon Betriebskosten   | €/a         |              |              |               | 2.284.613      | 998.537       |               |
| spezifische Jahreskosten   | €/kg Pel. a |              |              |               | 314            | 318           |               |
|  | €/EW a      |              |              |               | 5,50           | 3,99          |               |
| <b>b) Flockungfiltration</b>   |             |              |              |               |                |               |               |
| Investkosten gesamt  | €           |              |              |               | 797.810.600    | 513.750.000   | 1.311.560.600 |
| spezifische Investkosten   | €/EW        |              |              |               | 200,00         | 150,00        |               |
| Jahreskosten   | €/a         |              |              |               | 102.596.126    | 65.419.116    |               |
| davon Betriebskosten   | €/a         |              |              |               | 4.233.304      | 2.078.393     |               |
| spezifische Jahreskosten   | €/kg Pel. a |              |              |               | 987            | 1.022         |               |
|  | €/EW a      |              |              |               | 25,72          | 19,10         |               |
| <b>c) Membranfiltration</b>  |             |              |              |               |                |               |               |
| Investkosten gesamt  | €           |              |              |               | 997.263.250    | 616.500.000   | 1.613.763.250 |
| spezifische Investkosten   | €/EW        |              |              |               | 250,00         | 180,00        |               |
| Jahreskosten   | €/a         |              |              |               | 455.032.907    | 270.518.462   |               |
| davon Betriebskosten   | €/a         |              |              |               | 332.079.379    | 194.509.595   |               |
| spezifische Jahreskosten   | €/kg Pel. a |              |              |               | 3.274          | 3.146         |               |
|  | €/EW a      |              |              |               | 114,07         | 78,98         |               |

Abb. 17: Maßnahmenvorschläge zur Reduzierung der Phosphoreinträge aus kommunalen Kläranlagen – Zusammenfassung Kostenschätzung

#### 4.3.1.7 Maximale P-Elimination nach dem Stand der Technik

Im vorstehenden Kapitel werden unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Phosphorelimination in hessischen Kläranlagen beschrieben. Die diskutierten Vorschläge konzentrieren sich insbesondere auf die Einrichtung zusätzlicher Reinigungsstufen, wie z.B. Fällung oder Flockungsfiltration sowie die betriebliche Optimierung vorhandener Anlagenteile. Im Ergebnis lassen sich mit den dargestellten Maßnahmen verfahrensabhängig unterschiedliche Konzentrationen von 1,0 bis 0,1 mg  $P_{ges}$ /l im Ablauf kommunaler Kläranlagen erreichen.

Bei der Maßnahmenfindung wurde grundsätzlich von Reinigungsverfahren ausgegangen, die den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen und bereits auf zahlreichen Anlagen zum Einsatz kommen. Mit Blick auf die Entwicklung neuer Reinigungsverfahren (z.B. Membranfiltration) erscheint es denkbar, dass sich die Phosphorelimination in Zukunft weiter verbessern lässt.

Als Perspektive für die langfristige Maßnahmenplanung wird im Folgenden aufgezeigt, wie sich eine flächendeckende Umsetzung verbesserter Reinigungsverfahren auf die Phosphorbelastung der Oberflächengewässer auswirken könnte. Hierzu wurde für alle kommunalen Kläranlagen davon ausgegangen, dass durch den Einsatz weiterentwickelter Reinigungsverfahren ein Ablaufwert von 0,10 mg  $P_{ges}$ /l eingehalten wird. In der Folge ließe sich die Phosphoremission aus kommunalen Kläranlagen um rund 90 % von derzeit 817 t/a auf verbleibende 85 t/a reduzieren.

Inwieweit sich diese Einsparungen auf den Zustand der Oberflächengewässer auswirken würden, zeigt Abb. 18. Entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise wurden für jeden Wasserkörper die nach Anwendung der Maßnahme verbleibenden Phosphorfrachten und -konzentrationen bestimmt. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Grenzwerte von 0,1 bzw. 0,15 mg  $P_{ges}$ /l sind diejenigen Wasserkörper grün hervorgehoben, die sich im „guten Zustand“ befinden.

Im Ergebnis ist davon auszugehen, dass sich nach der Reduzierung aller Kläranlagenabflüsse auf 0,10 mg  $P_{ges}$ /l insgesamt 60 der bewerteten 450 hessischen Wasserkörper im guten Zustand hinsichtlich der Konzentration von  $P_{ges}$  befänden und 293 Wasserkörper der nächsthöheren Belastungsklasse einen Konzentrationswert von 0,25 mg/l nicht überschreiten.





#### 4.3.2 Misch- und Niederschlagswassereinleitungen

Gemäß dem Lagebericht zur „Beseitigung von kommunalen Abwässern“ [22] bestanden in Hessen im Jahr 2006 insgesamt rund 5.800 Entlastungsbauwerke (RÜB, RÜ, SK) mit einem Beckenvolumen von fast 1,4 Mio. m<sup>3</sup>. Nach MEPhos wird aus diesen Bauwerken jährlich eine Phosphorfracht von rund 126 t in die Gewässer eingeleitet. Hinzu kommen ca. 49 t/a, die über Niederschlagswassereinleitungen emittiert werden. Die über beide Pfade gemeinsam eingeleitete P-Fracht beträgt somit ca. 175 t/a, entsprechend etwa 20% der Kläranlagenemission (nach MEPhos ca. 810 t/a).

Im Gegensatz zu den sehr detaillierten Informationen über Kläranlagen und Kläranlagenstandorte lagen für Misch- und Niederschlagswassereinleitungen in Hessen keine vergleichbaren spezifischen Informationen vor. Standorte, Einleitungsmengen und -konzentrationen waren für die Maßnahmenplanung nicht bekannt, so dass Einzelmaßnahmen ausschließlich auf der Basis von aggregierten Daten definiert und in ihrer Wirkung beschrieben wurden. Aussagen zu den Auswirkungen auf einzelne Wasserkörper sind auf dieser Basis nicht möglich.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Entlastungsmengen sowie die Konzentrationswerte der Inhaltsstoffe im Entlastungsabfluss zeitlich und regional starken Schwankungen unterworfen sind. Unter Berücksichtigung einer von den örtlichen Randbedingungen abhängigen Wirkung möglicher Maßnahmen, ist bei der Berechnung von reduzierten Phosphoreinträgen deshalb ebenfalls mit großen Unsicherheiten zu rechnen.

Die für Misch- und Niederschlagswassereinleitungen vorgeschlagenen Maßnahmen konzentrieren sich insbesondere auf die drei Bereiche

- **Qualifizierte Entwässerung**, z.B. Ausbau der Regenwasserbehandlung
- **Abflussvermeidung und -verminderung**, z.B. Versickerung
- **Weitergehende Mischwasserbehandlung**, z.B. Bodenfilter

#### **4.3.2.1 Qualifizierte Entwässerung**

##### **ZIELE:**

Schaffung zusätzlicher Rückhalteräume und Reduzierung der Entlastungsabflüsse ins Gewässer durch Aus- und Neubau von Anlagen zur Misch- und Regenwasserbehandlung. Zusätzliche Erweiterung von Anlagen zur Behandlung stark verschmutzter Niederschlagswassereinleitungen.

##### **ERLÄUTERUNG:**

Über Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gelangt Phosphor sowohl gelöst als auch mit Feststoffen ins Gewässer. Die Eintragsmenge richtet sich bei Mischwassereinleitungen insbesondere nach der Entlastungsaktivität der einzelnen Überlaufbauwerke (Entlastungshäufigkeit und –dauer). Durch einen Ausbau oder eine bessere Ausnutzung vorhandener Kapazitäten für die Mischwasserbehandlung ist es vielerorts möglich, Entlastungsmengen und –frachten ggf. deutlich zu reduzieren. Wird kein neues Behandlungsvolumen geschaffen, so kann die Nutzung vorhandener Kapazitäten ggf. durch eine Erhöhung der Übernahmemenge auf dem Klärwerk oder die Abstimmung von Weiterleitungsmengen (Drosselabflüsse) optimiert werden.

Sowohl die bauliche als auch die betriebliche Optimierung der Mischwasserbehandlung setzen eine eingehende Analyse der Bestandssituation voraus. Als wesentliche Entscheidungsgrundlage können u.a. die Ergebnisse einer Schmutzfrachtberechnung hilfreich sein, aus denen Rückschlüsse auf das Entlastungsverhalten einzelner Bauwerke und des Gesamtsystems abgeleitet werden können.

Als weiterer Emissionspfad gelten Niederschlagswassereinleitungen. Von Bedeutung sind insbesondere stark belastete Niederschlagswasserabflüsse, die z.B. von Straßen oder gewerblich genutzten Flächen abgeleitet werden. Durch eine zentrale oder dezentrale Behandlung dieser erheblich belasteten Oberflächenabflüsse können auch die über diesen Eintragspfad ins Gewässer eingeleiteten stofflichen Belastungen reduziert werden. Als Behandlungsverfahren eignen sich z.B. Regenklärbecken, Filtersysteme oder Bodenfilter (vgl. Kapitel 4.3.2.3).

##### **WIRKUNG AUF P-EMISSION:**

Das jeweils erforderliche Behandlungsvolumen ist systembedingt auf Grund von unterschiedlichen Anschluss- und Befestigungsgraden der Einzugsgebiete unterschiedlich einzustufen. Richtwerte deuten auf ein spezifisches Volumen für die Mischwasserbehandlung von ca. 0,35 m<sup>3</sup>/EW. Belastbare Aussagen zur möglichen Reduzierung von Phosphoreinträgen ins Gewässer bei einem entsprechenden Ausbaugrad der Mischwasserbehandlung sind nicht bekannt. Grundsätzlich wird von einem bis zu 50%-igen Rückhalt partikulärer Stoffe ausgegangen. Für gelöste Stoffe wird eine Verbesserung um 20 bis 30% angenommen (vgl. [9]).

Der Wirkungsgrad von Regenklärbecken hinsichtlich der Rückhaltung von  $P_{ges}$  wird abhängig vom spezifischen Beckenvolumen nach [25] mit 16% bis 34% beziffert.

Bei der Bewertung des Wirkungsgrades ist aber zu beachten, dass insbesondere durch den Ausbau von Behandlungsvolumen in der Mischwasserkanalisation zwar entsprechend verschmutzte Entlastungsabflüsse vermieden werden. Gleichzeitig gelangt durch die Rückhaltung im Kanalnetz jedoch mehr Abwasser und damit größere Frachtmengen zur Kläranlage. Infolge der erhöhten Abwassermenge ist somit davon auszugehen, dass sich die über die Kläranlage emittierte Fracht durch den Ausbau der Mischwasserbehandlung erhöhen wird. Mit Blick auf das Gesamtsystem und die Gesamtemission wird sich also ein geringerer Wirkungsgrad einstellen. Dies gilt jedoch nicht für die Behandlung von Niederschlagswassereinleitungen.

Angesichts des landesweit bereits vorhandenen Volumens der Mischwasserbehandlung wird angenommen, dass ein Ausbau diesbezüglich in Hessen, von Ausnahmen abgesehen, eher von untergeordneter Bedeutung ist. Grundsätzlich größeres Potenzial mit Blick auf die Reduzierung von Entlastungsfachten bietet stattdessen die betriebliche Optimierung vorhandener Systeme. In welchem Maße jedoch die zurzeit über Mischwassereinleitungen emittierten Phosphorfrachten durch eine entsprechend bessere Nutzung vorhandener Kapazitäten reduziert werden können, lässt sich kaum zutreffend abschätzen.

Unter der Annahme, dass unterschiedliche Maßnahmen für eine qualifizierte Entwässerung, d.h. Ausbau und Optimierung der Mischwasserbehandlung und gezielte Behandlung von stark verschmutztem Niederschlagswasser, günstig kombiniert würden, wäre nach eigener Schätzung in der Summe eine **Reduzierung** der zur Zeit über diese Pfade insgesamt eingetragenen **Phosphorfrachten** von **im Mittel ca. 15%** vorstellbar.

#### **SEKUNDÄRWIRKUNG AUF DAS GEWÄSSER:**

Insbesondere durch die Behandlung von Niederschlagswasserabflüssen lässt sich neben den P-Einträgen auch die Einleitung andere Schadstofffrachten reduzieren. Ein wesentlicher Effekt ist die Reduzierung von Schwermetallen, die in Verbindung mit Schweb- und Trübstoffen, die durch Sedimentation u.a. in den zur Niederschlagswasserbehandlung häufig eingesetzten Regenklärbecken zurückgehalten werden.

#### **KOSTEN:**

Die Kosten für den Neubau von Beckenvolumen für die Mischwasserbehandlung können in der Regel mit einem durchschnittlichen Wert von  $750 \text{ €/m}^3$  angenommen werden [9]. Ginge man davon aus, dass für Hessen ein Ausbau des vorhandenen Speichervolumens von ca. 2 Mio.  $\text{m}^3$  (Entlastungs- und Rückhaltebauwerke) um weitere ca.  $100.000 \text{ m}^3$  ( $6 \text{ Mio. EW} \times 0,35 \text{ m}^3/\text{EW} = 2,1 \text{ Mio. m}^3$ ) erforder-

lich wäre, beliefen sich die hierfür anzusetzenden Gesamtkosten auf rund 75 Mio. €.

Die Kosten für den Bau von Regenklärbecken liegen je nach Gesamtgröße bei i.M. ca. 1.000 €/m<sup>3</sup> [9]. Das noch erforderliche Behandlungsvolumen kann jedoch abhängig von den zukünftigen gesetzlichen Anforderungen aus heutiger Sicht nicht mit ausreichender Sicherheit eingeschätzt werden. In Hessen überwiegt jedoch mit fast 80% bezogen auf die Gesamtlänge der Kanalisation, eindeutig der Anteil der Mischwasserkanäle. Maßnahmen zur Behandlung von Niederschlagswassereinleitungen werden sich in der Folge voraussichtlich zunächst auf besondere Verschmutzungsschwerpunkte konzentrieren. Eine Kostenschätzung für die betriebliche Optimierung von Abflüssen und Abflussteuerungen ist auf der Grundlage der vorliegenden Daten nicht möglich.

#### **4.3.2.2 Abflussvermeidung und -verminderung**

##### **ZIELE:**

Vermeidung bzw. Verminderung von Abflüssen durch eine naturnahe Regenwasserbewirtschaftung, d.h. Entsiegelung von befestigten Flächen, Versickerung von Niederschlagswasser oder Regenwassernutzung.

##### **ERLÄUTERUNG:**

Infolge der in zahlreichen Kommunen zunehmend an Bedeutung gewinnenden Einführung des gesplitteten Gebührenmaßstabs, ist davon auszugehen, dass auch die ortsnahe Beseitigung oder Vermeidung von Niederschlagswasserabflüssen an Attraktivität gewinnt. Derzeit wird eine ortsnahe Beseitigung von Niederschlagswasser überwiegend durch Versickerungseinrichtungen realisiert. Auf Grund der, in der Regel direkten Einleitung des Niederschlags in den Boden bzw. das Grundwasser, konzentrieren sich entsprechende Maßnahmen insbesondere auf gering verschmutzte Oberflächenabflüsse. Eine Reduzierung der ins Kanalnetz gelangenden Schadstofffrachten ist daher kaum zu erwarten. Die Wirkung entsprechender Maßnahmen besteht insbesondere in einer hydraulischen Entlastung der Abwasseranlagen. Schadstoffeinträge, die bisher u.a. aus der Entlastung von hydraulisch überlasteten Abwasseranlagen ins Gewässer eingeleitet wurden, können vermehrt zurückgehalten.

Als technische Möglichkeiten kommen u.a. Versickerungseinrichtungen wie Mulden-Rigolen-Systeme oder wasserdurchlässige Flächenbeläge in Betracht. Inwieweit eine Versickerung von Niederschlagswasser grundsätzlich möglich ist, richtet sich nach den örtlichen hydrogeologischen Randbedingungen, vor allem der Durchlässigkeit des Bodens.

Günstige Randbedingungen bieten sich darüber hinaus im Rahmen der Erschließung von Neubaugebieten, für die bereits während der Planung eine frühzeitige Berücksichtigung der für die Rückhaltung und Versickerung erforderlichen Flä-

chen möglich ist. Demgegenüber besteht bei einer nachträglichen Veränderung bestehender Entwässerungseinrichtungen häufig die Schwierigkeit, entsprechende Flächen in den Bestand zu integrieren. Die nachträgliche Flächenentsiegelung erfordert somit ggf. unverhältnismäßig hohe Kosten.

#### **WIRKUNG AUF P-EMISSION:**

Die Reduzierung des P-Eintrags durch Abflussvermeidung und -verminderung lässt sich insbesondere auf die Reduzierung von Entlastungsabflüssen zurückführen. Der P-Eintrag über Niederschlagswassereinleitungen wird sich hingegen kaum verändern, da sich entsprechende Maßnahmen zum naturnahen Umgang mit Regenwasser auf eine Vermeidung von gering verschmutzten Abflüssen konzentrieren.

Abhängig von der entsiegelten, vom Kanalnetz abgekoppelten Fläche wird insbesondere eine Verringerung der Entlastungsmengen und damit eine Reduzierung der über diesen Eintragspfad ins Gewässer eingeleiteten Gesamtfracht erreicht. Nach [9] ist davon auszugehen, dass bundesweit etwa 10-15% der bisher abflusswirksamen Flächen mittelfristig entsiegelt bzw. über Versickerungseinrichtungen vom Kanalnetz getrennt werden können. In der Folge wäre eine **Reduzierung der Entlastungsmengen** und der entlasteten Schadstofffrachten um ebenfalls **10-15%** denkbar (vgl. auch [23]).

#### **SEKUNDÄRWIRKUNG:**

Zunehmende Erschließungen und Flächenbefestigungen haben regional zu einer deutlichen Reduzierung der Grundwasserneubildung geführt. Die gezielte Versickerung von Niederschlägen in Verbindung mit einer Entsiegelung befestigter Flächen kann dazu beitragen, diesem Trend entgegenzuwirken.

Darüber hinaus bedeutet die Vermeidung von Niederschlagsabflüssen grundsätzlich auch eine deutliche Reduzierung der hydraulischen Belastung für Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer.

#### **KOSTEN:**

Verfahrensbedingt können die Kosten für Versickerungseinrichtungen ggf. stark differieren. Entsprechende Kostenannahmen bewegen sich in einer Preisspanne von 5-35 €/m<sup>2</sup> bezogen auf die entsiegelte Fläche (vgl. [24]). Vergleichsweise günstig ist die Errichtung von Versickerungsmulden (ca. 5 €/m<sup>2</sup>) gegenüber Maßnahmen zur Flächenentsiegelung, z.B. mit Rasengittersteinen (ca. 35 €/m<sup>2</sup>).

#### **4.3.2.3 Weitergehende Mischwasserbehandlung**

##### **ZIELE:**

Rückhaltung und Reinigung verschmutzter Regen- bzw. Mischwassereinleitungen durch zusätzliche Bauwerke für die Abwasserbehandlung. Stoffliche und hydraulische Verminderung der Gewässerbelastung.

##### **ERLÄUTERUNG:**

Feststoffe und gelöste Stoffe aus der Trenn- und Mischwasserkanalisation tragen zur Schädigung des Gewässers bei. In Bauwerken zur mechanischen Vorbehandlung, wie Regenüberlauf- oder Regenklärbecken werden diese Stoffe nur bedingt zurückgehalten. Weitergehende Behandlungsverfahren, wie z.B. Bodenfilter stellen eine geeignete Maßnahme dar, um sedimentativ nicht abgeschiedene Frachten (u.a. Phosphor, Stickstoff und Schwermetalle) vor der Einleitung ins Gewässer zurückzuhalten. Die im Bodenfilter zurückgehaltenen Schadstoffe werden im Filter abgebaut oder adsorbiert. Retentionsbodenfilter dienen zudem zur Reduzierung hydraulischer Belastungen durch Rückhaltung. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Bodenfilteranlagen als zusätzliche Maßnahme z.B. hinter einem bestehenden Regenüberlaufbecken angeordnet werden, um eine weitere Reduzierung der Schadstoffe im vorgereinigten Abfluss zu erreichen.

Für diese bauliche Maßnahme sind entsprechende administrative Maßnahmen, wie Flächenerwerb oder Nutzungsregelung an den Gewässerrändern, zu ergreifen. Abhängig von der Beschickungshäufigkeit und –menge erfordert die Errichtung eines Bodenfilters ggf. größere Flächen, die entsprechende Nutzungsmöglichkeiten voraussetzen.

##### **WIRKUNG AUF P-EMISSION:**

Die Reinigungsleistung von Bodenfiltern ist insbesondere abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und der baulichen Ausführung. Folgende Faktoren haben u.a. Einfluss auf die Reinigungsleistung (vgl. [9]):

- Auswahl eines für die Schadstoffrückhaltung und Abwasserbeschaffenheit geeigneten Filtermaterials und Filteraufbaus,
- voraussichtlich zu erwartende und bei der Bemessung anzusetzende Beschickungshäufigkeit und –höhe,
- Leistungsfähigkeit der mechanischen Vorbehandlung z.B. in Regenüberlaufbecken und stoffliche Zusammensetzung des in den Bodenfilter eingeleiteten Wassers,
- Fremdwasseranteil und Ablagerung im Kanalnetz.

Hinsichtlich Dimensionierung und Betrieb dieser Anlagen liegen bisher auf Grund vergleichsweise kurzer Betriebszeiten der vorhandenen Anlagen nur wenige Erfahrungen vor. Entsprechend ist davon auszugehen, dass Angaben zur Reinigungsleistung grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet sind.

Hinsichtlich der Phosphorrückhaltung wird der **stoffliche Wirkungsgrad** von Bodenfiltern von Hillenbrand und Böhm [25] nach Hahn et al. [26] mit **53% P<sub>ges</sub>** bezogen auf die Belastung im Zulauf des Bodenfilters angegeben.

Während nach Einschätzung der LfU eine Vorhersage der erzielbaren Ablaufkonzentrationen grundsätzlich nicht möglich ist [27], wird in Bemessungshinweisen für hessische Abwasseranlagen [28] ein **Wirkungsgrad von 40 – 60 %** angegeben. Demnach wären im Ablauf des Bodenfilters **Konzentrationen von 0,2 - 0,5 mg/l** erreichbar.

#### **SEKUNDÄRWIRKUNG AUF DAS GEWÄSSER**

In Verbindung mit der grundsätzlichen Reduzierung von gelösten und partikulären Abwasserinhaltsstoffen, werden abhängig von der Bodenbeschaffenheit des Filters neben Phosphor zahlreiche weitere Schad- und Nährstoffe zurückgehalten. Hierzu zählen u.a. Stickstofffrachten sowie Schwermetalle, die überwiegend mit dem Niederschlagswasser von stark verschmutzten Flächen stammen und ohne weitergehende Behandlung mit dem Entlastungsabfluss unmittelbar ins Gewässer gelangen.

Durch die Retentionswirkung entsprechender Behandlungsmaßnahmen wird zudem die hydraulische Belastung des Gewässers infolge von Abflussspitzen gedämpft und somit eine Schädigung des Gewässerbetts sowie der Biozönose an der Einleitungsstelle verhindert.

#### **KOSTEN:**

Die Kosten für den Bau von Bodenfiltern orientieren sich an dem zu errichtenden Behandlungsvolumen. Entsprechend der in [29] angegebenen Kostenrichtwerte ist mit Baukosten in Höhe von 275 - 500 €/m<sup>3</sup> zu rechnen.



### 4.3.3 Diffuse Quellen

Die Stoffströme aus diffusen Quellen liegen als Ergebnis einer Berechnung mit dem Modell MEPhos für die Pfade Erosion und Abschwemmung von Ackerflächen, Drainage und Grundwasser vor [1]. Maßnahmen zur Verminderung der diffusen Belastungen wurden für die Pfade Erosion und Abschwemmung in drei Varianten konzipiert [30]. Den Varianten liegt eine Gebietskulisse der Erosionsgefährdung (Einteilung in Gefährdungsklassen der Erosion auf der Grundlage der Bodenabtragungsgleichung) zu Grunde. Die Varianten unterscheiden sich in der Intensität der Maßnahmenwirkung und der Einschränkungen für die Landwirtschaft:

Variante „Vorschlag“: Maßnahmen mit geringer Eingriffsintensität bzw. hoher Akzeptanz auf Seiten der Landwirtschaft, die relativ gut in der landwirtschaftlichen Praxis umgesetzt werden können.

Variante 1: Maßnahmen mit mittlerer und hoher Eingriffsintensität einschl. der Umwandlung von Ackerland in Grünland.

Variante 2: Maßnahmen mit mittlerer und hoher Eingriffsintensität bei Beibehaltung einer Ackernutzung auf den aktuell als Acker genutzten Flächen.

Die entsprechende Einbindung erfolgte im Rahmen der in Kapitel 4.4 dargestellten Gesamtszenarien. Wirksamkeit und Kosten der unterschiedlichen Einzelszenarien lassen sich anhand der in Anlage 1 ausführlich dargestellten Kennzahlen wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 7: Reduzierung diffuser P-Einträge (nach [10])

| <b>Zusammenfassung der Wirksamkeit [t/a]</b><br>von Maßnahmen zur Reduzierung diffuser Phosphoreinträge |                  |     |                   |     |                   |     |
|---|------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
|   | <b>Vorschlag</b> |     | <b>Variante 1</b> |     | <b>Variante 2</b> |     |
| Maßnahmen Erosion   | 182,45           | 38% | 274,68            | 58% | 295,82            | 62% |
| Maßnahmen Abschwemmr  | 0,92             | 3%  | 0,93              | 3%  | 1,54              | 5%  |
| <b>Summe</b>  | <b>183,37</b>    |     | <b>275,61</b>     |     | <b>297,36</b>     |     |

Tabelle 8: Kosten für die Reduzierung diffuser P-Einträge (nach [10])

| <b>Zusammenfassung der jährlichen Kosten</b><br>für Maßnahmen zur Reduzierung diffuser Phosphoreinträge |                                    |                                    |                                    |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|   | <b>Vorschlag</b>                   | <b>Variante 1</b>                  | <b>Variante 2</b>                  |
| Maßnahmen Erosion   | 14.272.668 €/a<br>78 €/kg Pges*a   | 30.032.794 €/a<br>109 €/kg Pges*a  | 31.395.209 €/a<br>106 €/kg Pges*a  |
| Maßnahmen Abschwemmr  | 2.222.919 €/a<br>2.414 €/kg Pges*a | 3.869.387 €/a<br>4.177 €/kg Pges*a | 4.100.894 €/a<br>2.668 €/kg Pges*a |
| <b>Summe</b>  | <b>16.495.665</b>                  | <b>33.902.290</b>                  | <b>35.496.210</b>                  |

#### 4.4 MASSNAHMEN-SZENARIO

##### 4.4.1 Maßnahmenkombinationen

Im vorausgegangenen Kapitel wurden Maßnahmenvorschläge beschrieben, die grundsätzlich zu einer Reduzierung des Phosphoreintrags beitragen sollen. Insbesondere die Einzelmaßnahmen zur Verbesserung der P-Elimination auf **kommunalen Kläranlagen** wurden abhängig von der Art der Maßnahme bereits zu Wirkungsgruppen zusammengefasst. Entsprechend werden im Rahmen unterschiedlicher Szenarien folgende Maßnahmengruppen berücksichtigt:

1. Nachrüstung einer P-Fällung für Anlagen ohne P-Elimination, insbesondere
  - a) Kläranlagen der Größenklasse GK 3 (54 Anlagen)
  - b) Kläranlagen GK 2 (205 Anlagen)
2. Betriebliche Optimierung von Anlagen mit vorhandener P-Elimination
  - a) Kläranlagen GK 4 (158 Anlagen)
  - b) Kläranlagen GK 5 (24 Anlagen)
3. Nachrüstung einer zusätzlichen Reinigungsstufe (Flockungsfiltration bzw. Mikro-siebung) für Anlagen mit zuvor optimierter P-Elimination
  - a) Kläranlagen GK 5 (24 Anlagen)
  - b) Kläranlagen GK 4 (159 Anlagen)

Maßnahmenvorschläge zur Reduzierung der P-Einträge aus **Misch- und Niederschlagswassereinleitungen** wurden ausschließlich auf der Basis allgemeiner Annahmen für Gesamthessen beschrieben. Eine Bestimmung möglicher Frachteinparungen für einzelne Wasserkörper war auf Basis der verfügbaren Daten nicht möglich. Entsprechend finden die dargestellten Maßnahmen keine Berücksichtigung in den im Folgenden aufgestellten Gesamtszenarien.

Hinsichtlich weiterer Einträge aus **diffusen Quellen**, wurde auf die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Maßnahmenkombinationen zurückgegriffen. Diese zeigen in drei Varianten für jeden Wasserkörper (Vorschlag, Szenario 1 & 2) auf, welche Phosphoreinsparungen insbesondere durch Maßnahmen in der Landwirtschaft möglich sind. Dabei beschreibt die Variante „Vorschlag“ ein Minimalszenario während die Szenarien 1 und 2 darüber hinaus die Umsetzung weitergehender, langfristiger Maßnahmen voraussetzen.

Unter Berücksichtigung der für die Einzelmaßnahmen ermittelten möglichen P-Reduzierungen wurden die beschriebenen Maßnahmenkombinationen für „diffuse Einträge“ und „kommunale Kläranlagen“ entsprechend Abb. 19 zu vier übergeordneten Gesamtszenarien zusammengefasst:

1. **„Aufbau“-Szenario:** Einrichtung zusätzlicher Anlagen zur Phosphorfällung auf kleineren Kläranlagen (GK 2 & 3), die bisher keine P-Elimination betreiben und Kombination mit der „Vorschlagvariante“ zur einfachen Reduzierung diffuser Einträge.
2. **Szenario „Optimierung“:** Betriebliche Optimierung von größeren Kläranlagen (GK 4 & 5) zur Verbesserung der vorhandenen P-Elimination und Kombination mit der „Vorschlagvariante“ zur einfachen Reduzierung diffuser Einträge.
3. **Szenario „Weitergehende Optimierung“:** Betriebliche Optimierung von größeren Kläranlagen (GK 4 & 5) zur Verbesserung der vorhandenen P-Elimination und Kombination mit „Variante 1“ zur weitergehenden Reduzierung diffuser Einträge.
4. **„Ausbau“-Szenario:** Neubau von Anlagen zur Phosphatfällung (GK 2 & 3) und Ausbau der vorhandenen P-Elimination größerer Kläranlagen (GK 4 & 5) durch Errichtung einer Flockungsfiltration als zusätzliche Reinigungsstufe. Kombination der Kläranlagenmaßnahmen mit „Variante 2“ zur maximalen Reduzierung diffuser Einträge. Gleichzeitig wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass vor der Einrichtung einer zusätzlichen Reinigungsstufe die Fällung der betreffenden Anlagen bereits Optimiert wurde.

|                                      |                       | Maßnahmen "diffuse Einträge" |             |             |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------|-------------|
|                                      |                       | Vorschlag                    | Vorschlag 1 | Vorschlag 2 |
| Maßnahmen<br>"kommunale Kläranlagen" | 1a) P-Fällung GK 3    | ✓                            |             | ✓           |
|                                      | 1b) P-Fällung GK 2    | ✓                            |             | ✓           |
|                                      | 2a) Optimierung GK 4  | ✓                            | ✓           | ✓           |
|                                      | 2b) Optimierung GK 5  | ✓                            | ✓           | ✓           |
|                                      | 3a) F-filtration GK 5 |                              |             | ✓           |
|                                      | 3b) F-filtration GK 4 |                              |             | ✓           |

Abb. 19: Maßnahmenkombinationen zur Reduzierung der P-Einträge aus „diffusen Quellen“ und „kommunalen Kläranlagen“ – Gesamtszenarien I - IV

#### 4.4.2 Reduzierte Phosphoreinträge

Ziel der Szenario-Betrachtung war es, die für jeden Wasserkörper, mit den jeweils angesetzten Maßnahmenkombinationen maximal erreichbaren Frachteinsparungen zu ermitteln. Diese wurden daraufhin mit den ursprünglich aus der Immissionsbetrachtung für die Wasserkörper festgelegten Phosphorbelastungen verrechnet, um im Ergebnis für jedes Gesamtszenario analog zu Abb. 9 eine neue Belastungs- / Defizitkarte zu erstellen.

Bei der Berechnung der reduzierten P-Einträge war zu berücksichtigen, dass die verwendeten Immissionsdaten in den Jahren 2005 bis 2007 erfasst wurden. Die daraus berechneten Frachten wurden aus diesen Daten unter Verwendung des langjährigen MQ ermittelt. Während die in den Jahren 2006 und 2007 beobachteten Abflüsse weitgehend dem langjährigen Mittel entsprachen, war das Jahr 2005 vergleichsweise abflussschwach. Um diese Disparität angemessen zu berücksichtigen wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber die anhand der Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen ermittelte frachtbezogene Wirkung angepasst. Als Ergebnis einer Vergleichsrechnung für die Jahresabwassermengen 2006/ 2007 mit dem Jahr 2005 (Überwachungswerte der Kläranlagen) wurde ein Faktor von 1,11 (11%) gewählt, um den die JAM aus dem Jahr 2005 und damit die frachtbezogene Wirkung der beschriebenen Maßnahmen erhöht wurde.

Im Einzelnen wurde zur Ermittlung der reduzierten P-Einträge im Rahmen der Gesamtszenarien in folgenden Bearbeitungsschritten vorgegangen:

1. Annahme reduzierter Ablaufkonzentrationen [mg/l] unter Berücksichtigung der jeweils angenommenen Einzelmaßnahmen in Anlehnung an 4.3 (z.B. zusätzliche P-Fällung,  $P_{ab} = 1,0$  mg/l).
2. Ermittlung der eingesparten P-Fracht [t/a] unter Berücksichtigung der verbesserten und ursprünglichen Ablaufkonzentrationen sowie der für die jeweilige Kläranlage anzusetzenden Jahresabwassermenge (JAM in  $m^3$ ).
3. Aufsummierung der einzelnen Frachteinsparungen aller Kläranlagen, die in den gleichen Wasserkörper einleiten zur Ermittlung einer Gesamtfrachteinsparung je Wasserkörper [t/a].
4. Im Jahr 2005 lagen die beobachteten Gewässerabflüsse unterhalb des langjährigen MQ-Mittelwertes. Um dies angemessen zu berücksichtigen, wurden die zuvor aus den Ablaufwerten für das Jahr 2005 ermittelten Frachteinsparungen in Abstimmung mit dem Auftraggeber pauschal um 11% erhöht.
5. Kombination der Frachteinsparungen aus kommunalen Kläranlagen mit den für jeden Wasserkörper angegebenen P-Einsparungen aus einem der „diffusen“ Szenarien.

6. Kaskadierung der Frachteinsparungen bei Einträgen von oberhalb liegenden Wasserkörpern, da nur so eine spätere Verrechnung mit den Belastungen aus Immissionsmessungen möglich ist.
7. Umrechnung der aus der Immissionsbetrachtung vorliegenden Phosphorkonzentrationen in Phosphorfrachten unter Berücksichtigung des für jeden Wasserkörper angegebenen Abflusses MQ.
8. Verrechnung der Gesamtfrachteinsparungen mit den für das Gewässer ermittelten P-Frachten; Umrechnung in Konzentrationen und Darstellung der Ergebnisse in einer neuen Belastungs- / Defizitkarte.

Für jedes der zuvor beschriebenen vier Gesamtszenarien, wurde nach den Bearbeitungsschritten eins bis acht vorgegangen, um für jeden Wasserkörper entsprechende Frachteinsparungen und reduzierte Phosphorbelastungen zu ermitteln. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Abb. 20 bis Abb. 23 zusammengefasst. In der Summe ergeben sich aus den betrachteten Szenarien die in Tabelle 9 aufgezeigten Frachteinsparungen.

Tabelle 9: Wirksamkeit der Gesamtszenarien (Summe der Frachteinsparungen)

|                                  |                                | Szenario I        | Szenario II       | Szenario III      | Szenario IV      |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Ausgangssituation<br>IST-Zustand | Kommunale Kläranlagen          |                   | 817,2 t/a         |                   |                  |
|                                  | <i>weitere Punktquellen</i>    |                   | 158,4 t/a         |                   |                  |
|                                  | Erosion                        |                   | 477,1 t/a         |                   |                  |
|                                  | Abschwemmung                   |                   | 30,6 t/a          |                   |                  |
|                                  | <i>weitere diffuse Quellen</i> |                   | 138,1 t/a         |                   |                  |
|                                  | <b>Summe P-Einträge</b>        |                   | <b>1621,4 t/a</b> |                   |                  |
| Maßnahmen<br>Frachteinsparung    | Kommunale Kläranlagen          | 129,1 t/a         | 205,8 t/a         | 205,8 t/a         | 533,0 t/a        |
|                                  | Erosion                        | 182,4 t/a         | 182,4 t/a         | 274,7 t/a         | 295,8 t/a        |
|                                  | Abschwemmung                   | 0,9 t/a           | 0,9 t/a           | 0,9 t/a           | 1,5 t/a          |
|                                  | <b>Summe P-Einsparung</b>      | <b>312,5 t/a</b>  | <b>389,1 t/a</b>  | <b>481,4 t/a</b>  | <b>830,4 t/a</b> |
| <b>Summe neue P-Fracht</b>       |                                | <b>1308,9 t/a</b> | <b>1232,3 t/a</b> | <b>1140,0 t/a</b> | <b>791,0 t/a</b> |



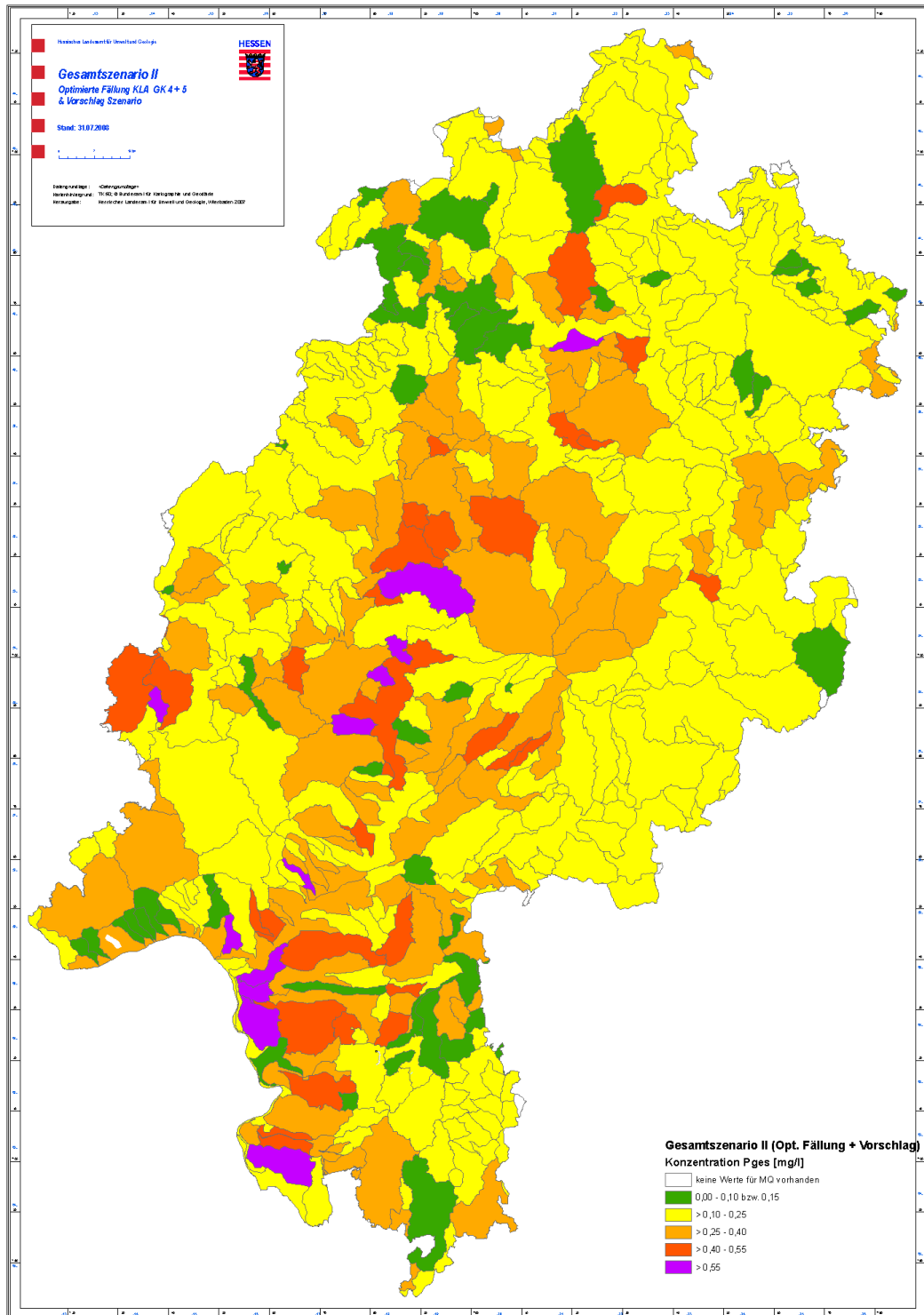


Abb. 21: Ergebnis Gesamtszenario II (Optimierte Fällung & Vorschlag-Variante)

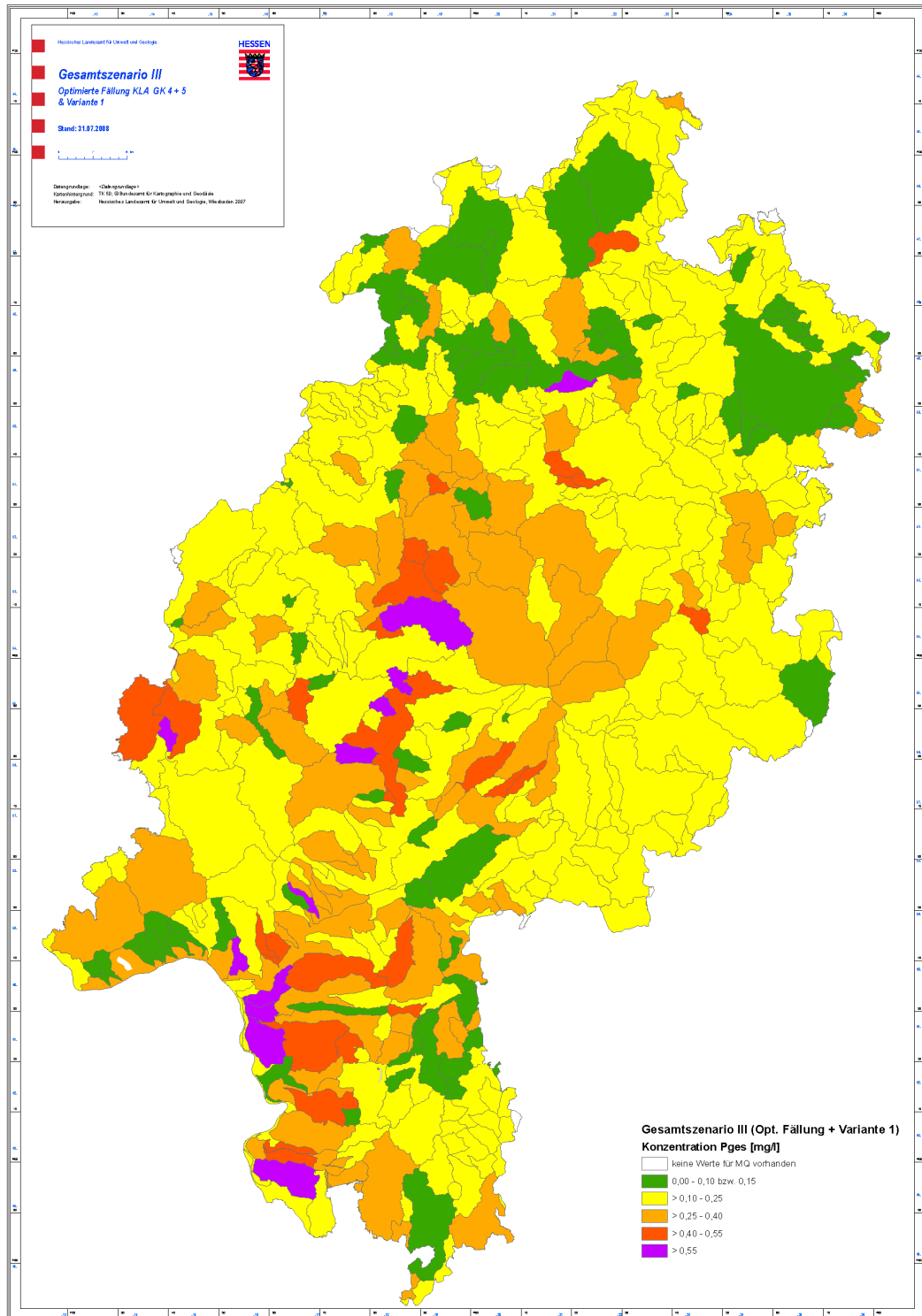


Abb. 22: Ergebnis Gesamtszenario III (Optimierte Fällung & Variante 1)



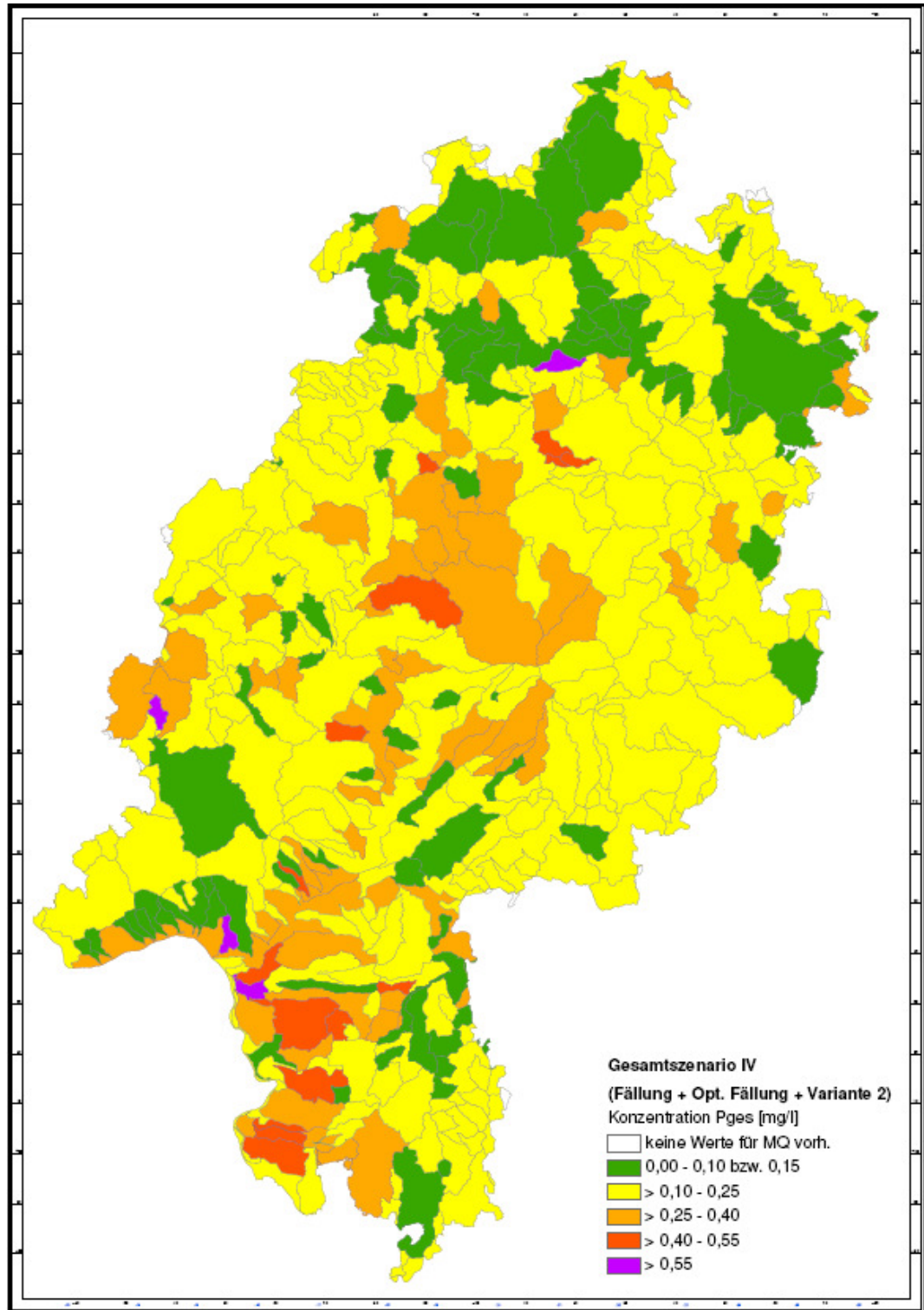


Abb. 23: Ergebnis Gesamtszenario IV (Optimierte Fällung, zusätzl. Reinigungsstufe & Variante 2)

#### 4.4.3 Bewertung der Gesamtszenarien: Zeitbedarf und Kosten

Für die in den Szenarien zusammengefassten Maßnahmen(kombinationen) ist ein unterschiedlicher Zeitbedarf für die technische/ bauliche Umsetzung und die Wirkungsentfaltung zu berücksichtigen. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Maßnahmen zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen und Maßnahmen, die auf eine Reduzierung des P-Eintrags aus diffusen Quellen abzielen.

Maßnahmen zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen sind im Einzelfall grundsätzlich kurzfristig umsetzbar. Mit einer Wirkungsentfaltung ist unmittelbar nach Inbetriebnahme der Anlage zu rechnen. Im Rahmen der Gesamtbetrachtung für das Land Hessen (723 Kläranlagen) werden jedoch unter Berücksichtigung der in den vorstehenden Kapiteln dargestellten Gesamtszenarien zahlreiche unterschiedliche Einzelmaßnahmen notwendig sein, um die Belastung der Oberflächengewässer spürbar zu verringern. Entsprechend sind die vorgeschlagenen Maßnahmen zu priorisieren, um somit möglichst frühzeitig und mit vertretbaren Kosten einen Erfolg hinsichtlich der P-Reduzierung zu erzielen. Mit Blick auf die überwiegend kurzfristige Umsetzbarkeit und sofortige Wirkungsentfaltung orientiert sich die Priorisierung und zeitliche Maßnahmenplanung insbesondere an den Maßnahmenvorschlägen zur Reduzierung von Kläranlagenemissionen. In Anlehnung an die Vorgaben gemäß WRRL werden drei Zeitstufen unterschieden:

- 1. Zeitstufe:** Maßnahmen, die sofort begonnen werden und vollständig innerhalb des ersten Maßnahmenplans, d.h. bis zum Jahr 2015 umzusetzen sind.
- 2. Zeitstufe:** Maßnahmen, die innerhalb des ersten Maßnahmenplans begonnen werden, für die jedoch u.a. aus technischen und finanziellen Gründen ein Abschluss erst nach 2015 möglich ist.
- 3. Zeitstufe:** Maßnahmen, die auf der teilweisen Umsetzung von Zeitstufe eins bzw. zwei beruhen oder die nur mit erheblichen finanziellen Anstrengungen zu realisieren sind und mit denen somit erst nach 2015 begonnen werden kann.

Vor diesem Hintergrund sind die zuvor beschriebenen Maßnahmenvorschläge „Fällung“, „Betriebliche Optimierung“ und „zusätzliche Reinigungsstufe“ wie folgt zu bewerten:

### **1. Zeitstufe (Abschluss vor 2015): Betriebliche Optimierung**

Da sich die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung vorhandener Fällungsanlagen insbesondere auf größere Kläranlagen (GK 4 & 5) konzentrieren, zeigt sich deren Wirkung insbesondere in den südhessischen Ballungsräumen. Dort lässt sich die zuvor kritische Belastung einzelner Wasserkörper um ein bis zwei Stufen verbessern. Die Gesamtbelastung geht von 817 t/a auf 611 t/a, d.h. um 206 t/a zurück. Höchste Priorität hat insbesondere die Optimierung von 158 Anlagen der GK 4, durch die das größte Einsparungspotenzial aktiviert werden kann. Zeitlich können die Maßnahmen weitgehend vollständig innerhalb des ersten Maßnahmenprogramms bis 2015 realisiert werden. Der hierfür anzusetzende Investitionsaufwand liegt bei ca. 3,1 Mio. €/a. Mit vergleichsweise geringen spezifischen Investkosten in Höhe von ca. 16 bis 21 €/kg P unterscheidet sich die betriebliche Optimierung erheblich von anderen Maßnahmen und bietet das günstigste Kosten-Nutzen-Verhältnis.

### **2. Zeitstufe (Beginn vor 2015): Zusätzliche Fällung**

Für die Nachrüstung kleinerer Kläranlagen der GK 2 und 3 (ab 1.000 EW) ist vor allem unter Berücksichtigung der für die Nachrüstung anzusetzenden Anfangsinvestitionen grundsätzlich von einem höheren Gesamtaufwand auszugehen. Betroffen sind u.a. mehr als 200 Anlagen der GK 2, für deren Nachrüstung neben den Kosten auch ein entsprechender Zeitbedarf einzuplanen ist. Eine Umsetzung wird dementsprechend sowohl aus zeitlichen als auch finanziellen Gründen innerhalb des ersten Maßnahmenplans bis 2015 nur teilweise möglich sein.

Die Wirkung der Maßnahmen betrifft im Gegensatz zur betrieblichen Optimierung weniger die Ballungsräume und nicht die hoch belasteten Wasserkörper. Sichtbare Verbesserungen zeigen sich hingegen verstärkt bei den bisher mäßig bis stark belasteten Wasserkörpern im nord- und mittelhessischen Bereich. Die Gesamtemission wird durch die zusätzliche Fällung um rund 130 t/a reduziert. Die Jahreskosten liegen bei 3,5 Mio. €/a; die spezifischen Kosten betragen 31 bis 33 €/kg P und entsprechen damit einem vergleichsweise ungünstigeren Kosten-Nutzen-Verhältnis gegenüber der betrieblichen Optimierung.

### 3. Zeitstufe (Beginn nach 2015): Zusätzliche Reinigungsstufe

Der Einsatz einer zusätzlichen Reinigungsstufe (Flockungsfiltration, Mikrosiebung oder Membranfiltration) wird grundsätzlich für größere Kläranlagen (GK 4 & 5) vorgeschlagen. Entsprechend konzentriert sich die Wirkung der zusätzlichen P-Reduzierung ähnlich wie für die Maßnahmen der ersten Zeitstufe auf den südhessischen Ballungsraum. Für zahlreiche der dortigen Wasserkörper lässt sich mit entsprechenden Maßnahmen ein geringer bis mäßiger Belastungszustand erreichen. Die Phosphoremission wird insgesamt um rund 530 t/a reduziert.

Als Voraussetzung für die Einrichtung einer zusätzlichen Reinigungsstufe wird entsprechend Kapitel 4.3.1 von einer bereits weitgehend optimierten Fällung ausgegangen (0,5 mg P<sub>ges</sub>/l). U.a. aus diesem Grund wird angenommen, dass entsprechende Maßnahmen nicht vor Ablauf des ersten Maßnahmenprogramms, d.h. nicht vor 2015 in größerem Umfang umgesetzt werden können. Hinzu kommt, dass zur Errichtung der erforderlichen Anlagen erhebliche Investitionen erforderlich sein werden. Abhängig vom gewählten Reinigungsverfahren und den angestrebten Ablaufwerten sind Gesamtkosten von bis zu 1,3 Mrd. € (Flockungsfiltration) anzusetzen. Die spezifischen Kosten für die Flockungsfiltration liegen mit i.M. ca. 950 €/kg P weit über den Ansätzen für die Fällung und die betriebliche Optimierung, so dass die Umsetzung entsprechender Maßnahmen voraussichtlich auf wenige Anlagen beschränkt bleibt.

Eine grundsätzliche Alternative zur Flockungsfiltration stellt die Mikrosiebung dar, die als zusätzliche Reinigungsstufe ebenfalls eine Möglichkeit bietet, den in der Fällung erzielten Ablaufwert weiter zu verbessern. Obschon sich dieser nicht wie bei der Flockungsfiltration auf 0,2 mg/l sondern voraussichtlich nur auf 0,3 mg/l reduzieren lässt, liegen die Vorteile des Verfahrens überwiegend in den vergleichsweise geringeren spezifischen Kosten von 4 bis 5 €/EW a.

Entsprechend der Matrix in Abb. 19 können jeder Zeitstufe wahlweise unterschiedliche Szenarien zur Verringerung diffuser Emissionen zugeordnet werden wobei sich die Einteilung der Zeitstufen ausschließlich an den zuvor priorisierten Maßnahmen zur Verbesserung kommunaler Kläranlagen orientiert. Die somit für jede Zeitstufe anzusetzenden Gesamtkosten aus Maßnahmen an Punktquellen und diffusen Quellen sind unter Berücksichtigung der zeitlichen Umsetzung nachfolgend in Abb. 24 zusammengefasst.

| Gesamtszenario |  | Kosten**    | P <sub>el.</sub> | bis 2015 | nach 2015 |
|----------------|--|-------------|------------------|----------|-----------|
| I              | Zusätzliche P-Fällung<br>+ Vorschlag-Szenario    | 16,3 Mio. € | 111 t/a          |          |           |
|                |  | 16,5 Mio. € | 183 t/a          |          |           |
|                |  | 32,8 Mio. € | 294 t/a          |          |           |
| II             | Betriebliche Optimierung<br>+ Vorschlag-Szenario | 10,8 Mio. € | 149 t/a          |          |           |
|                |  | 16,5 Mio. € | 183 t/a          |          |           |
|                |  | 27,3 Mio. € | 332 t/a          |          |           |
| III            | Betriebliche Optimierung<br>+ Szenario 1         | 10,8 Mio. € | 149 t/a          |          |           |
|                |  | 34,0 Mio. € | 276 t/a          |          |           |
|                |  | 44,8 Mio. € | 425 t/a          |          |           |
| IV             | 3. Reinigungsstufe*<br>+ Szenario 2              | 1,3 Mrd. €  | 168 t/a          |          |           |
|                |  | 35,5 Mio. € | 297 t/a          |          |           |
|                |  | 1,3 Mrd. €  | 465 t/a          |          |           |

\* die Kosten- / Wirksamkeitsberechnung basiert auf der Annahme einer Flockungsfiltration als zusätzl. Reinigungsstufe  
 \*\* Gesamtkosten als Summe aus KLA-Maßnahmen + Erosion & Abschwemmung

Abb. 24: Zeitstufen für die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung von Phosphoreinträgen aus Kläranlagen und diffusen Quellen

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde im Jahr 2000 der Grundstein für ein mehrstufiges Programm mit dem Ziel der Erreichung des „guten Zustandes“ in allen Gewässern der Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2015 gelegt. Als Ergebnis des in den letzten Jahren landesweit durchgeführten Monitoring hat sich herausgestellt, dass für einen großen Teil der hessischen Oberflächengewässer die Erreichung dieses Ziels (guter Zustand) für eine Reihe von Parametern unwahrscheinlich oder unklar ist. Eine wesentliche Ursache für den mäßigen, unbefriedigenden oder schlechten Zustand vieler Wasserkörper sind anthropogene Belastungen. Als limitierender Faktor für die Eutrophierung sind insbesondere Phosphoreinträge aus Kläranlagen oder von landwirtschaftlich genutzten Flächen von großer Bedeutung für die Maßnahmenplanung.

Vor dem Hintergrund der diesbezüglich zu erstellenden Maßnahmen- und Bewirtschaftungspläne beauftragte das Land Hessen DAHLEM Beratende Ingenieure mit der Erarbeitung von Szenarien zur Reduzierung der Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer. Ziel war die Erreichung vorgegebener Orientierungswerte für Gesamtphosphor für möglichst viele Wasserkörper. Grundlage für die Ableitung des Handlungsbedarfs war somit zunächst ein Vergleich von Ist- und Zielwerten der P-Frachten, auf dessen Basis dann Maßnahmenvorschläge erarbeitet wurden. Als Zielwert wurde in Abstimmung mit den Projektbeteiligten und in Anlehnung an LAWA-Vorgaben für die Mehrzahl der Wasserkörper eine Gesamtphosphorbelastung von 0,10 mg P<sub>ges</sub>/l festgelegt. Im Rahmen von vier Gesamtszenarien wurde aufgezeigt, inwieweit mit unterschiedlichen Kombinationen von Maßnahmen zur Reduzierung von P-Einträgen aus Kläranlagen und diffusen Quellen dieser Zielwert für die Oberflächengewässer erreicht werden kann. Neben konkreten Maßnahmen wurden begleitenden Maßnahmen aufgezeigt, mit denen darüber hinaus eine Reduzierung der P-Einträge aus Misch- und Niederschlagswassereinleitungen möglich ist.

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen konkreten Maßnahmenvorschläge konzentrieren sich insbesondere auf den Haupteintragspfad „Kläranlagen“. Mit Blick auf die unterschiedlichen Ausbaugrößen (Größenklassen) und Reinigungsstufen (mit/ohne P-Elimination) der betrachteten Kläranlagen war es erforderlich, grundsätzlich verschiedene Einzelmaßnahmen zu definieren. Hierbei wurde unterschieden zwischen

- Ausrüstung von Kläranlagen der Größenklassen 2 & 3 mit Fällungsanlagen zur Verringerung der P-Ablaufkonzentration auf 1 mg/l.
- Optimierung aller vorhandenen Fällungsanlagen zur Verringerung der P-Ablaufkonzentration auf 0,5 mg/l.

- Errichtung einer zusätzlichen Reinigungsstufe auf Anlagen mit Fällung nach Optimierung der Fällung zur weiteren Verringerung der P-Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l auf 0,1 - 0,3 mg/l.

Bewertet wurden die Maßnahmen nach ihrer ökologischen Wirksamkeit (Erfolgsaussichten und Zeitfaktor) und Kosteneffizienz. Als Ergebnis dieser Bewertung zeigte sich, dass insbesondere die betriebliche Optimierung von bereits mit einer Phosphorfällung ausgerüsteten Kläranlagen ein erhebliches Potenzial bietet, den Phosphoreintrag mit vergleichsweise geringen Investitionen deutlich zu reduzieren. Mit Gesamtinvestitionen von rund 10,8 Mio. € ließen sich durch Optimierungsmaßnahmen jährlich ca. 150 t des auf diesem Weg eingetragenen Phosphors einsparen. Da es sich hierbei im Wesentlichen um die Optimierung großer Anlagen handelt, liegen die einwohnerspezifischen Kosten bei weniger als 1 € pro Einwohner und Jahr.

Demgegenüber wurden für die Nachrüstung von Kläranlagen ohne Fällung ein vergleichsweise höherer finanzieller und zeitlicher Aufwand ermittelt. Da es sich allein in der GK 2 um mehr als 200 Anlagen handelt, die nachzurüsten wären, ist davon auszugehen, dass eine Umsetzung kaum innerhalb des ersten Maßnahmenplans bis 2015 realisiert werden kann. Darüber hinaus erfordert die Umsetzung Gesamtinvestitionen in Höhe von rd. 16,3 Mio. € oder umgerechnet etwa 3 bis 5 € pro Einwohner und Jahr.

Die mit Abstand größten Kosten wurden für die Einrichtung einer zusätzlichen Reinigungsstufe auf Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 ermittelt. Verfahrensabhängig sind hierfür einwohnerspezifische Kosten von mehr als 100 €/a anzusetzen. Neben den mit Abstand teuersten Reinigungsverfahren wie Flockungs- und Membranfiltration bietet der Einsatz der Mikrosiebung eine vergleichsweise günstige Alternative. Mit rund 4 bis 5 € pro Einwohner und Jahr betragen die spezifischen Kosten für die Mikrofiltration nur etwa 20 % der Kosten für die vergleichsweise teure Flockungsfiltration. Gleichzeitig sind mit 0,30 mg  $P_{ges}/l$  nahezu ähnliche Ablaufwerte erreichbar.

Im Ergebnis ist davon auszugehen, dass insbesondere die Optimierung vorhandener Fällungen eine geeignete Maßnahme darstellt, um kurzfristig und mit vertretbarem finanziellem Aufwand eine deutliche Reduzierung des Phosphoreintrags aus kommunalen Kläranlagen zu erreichen. Die Umsetzung dieser Maßnahmen wäre nach Einschätzung der Autoren noch innerhalb des ersten Maßnahmenprogramms bis 2015 möglich. Parallel dazu können Kläranlagen ohne Phosphorelimination schrittweise mit einer Fällung ausgerüstet werden, um auf diesem Wege mittelfristig eine weitere Verbesserung der Phosphorelimination herbeizuführen. Angesichts des finanziellen und technischen Aufwandes werden diese Maßnahmen für eine zweite Zeitstufe angesetzt, deren Umsetzung über das Jahr 2015 hinaus reicht. Die Nachrüstung von zusätzlichen Reinigungsstufen

wird mit Blick auf die hierfür aufzuwendenden Kosten auch mittelfristig voraussichtlich zunächst auf wenige Anlagen beschränkt bleiben. In größerem Maßstab wird eine Umsetzung überwiegend für den Zeitraum nach 2015 gesehen. Die gleichzeitig fortschreitende Entwicklung neuer Reinigungsverfahren wie z.B. Membranfiltration legt jedoch die Vermutung nahe, dass langfristig eine weitere Reduzierung des Phosphoreintrags möglich wird. Mögliche Ergebnisse wurden im vorliegenden Bericht zu einem „Maximalszenario“ zusammengefasst.

Die Szenarien basieren auf dem Parameter Gesamt-Phosphor und stellen aus verschiedenen Gründen in ihren Ergebnissen eher pessimale Varianten dar. Da die Maßnahmen an den Kläranlagen vorwiegend zu einer Reduzierung von pflanzenverfügbarem Ortho-P im Ablauf führen, kann bei diesem Parameter eine deutlich höhere Gewässerentlastung erwartet werden. Festzuhalten ist jedoch, dass sich durch die aufgezeigten Maßnahmen auch bei Gesamtphosphor erhebliche Verbesserungen einstellen. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob die gelb hinterlegten Wasserkörper ggf. doch in den guten „stofflichen“ Zustand gebracht werden können. Dabei ist immer zu bedenken, dass die Entscheidung über die Erreichung des guten ökologischen Zustandes am Ende nicht über Zielwerte der Phosphor-Konzentration, sondern durch den biologischen Befund herbeigeführt wird. Die Maßnahmen müssen allerdings an der wesentlichen Ursache - den Nährstoffen – ansetzen.

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Maßnahmen vermitteln zusammenfassend einen Eindruck von den Möglichkeiten zur Erreichung des guten „stofflichen“ Zustandes in zahlreichen Wasserkörpern. Grundsätzlich stellt sich bei der Umsetzung aller Maßnahmen sowohl zur Reduzierung des P-Eintrags aus Kläranlagen als auch aus diffusen Quellen jedoch die Frage nach der sich als Ergebnis tatsächlich einstellenden Verbesserung des Gewässerzustandes. Inwieweit unterschiedliche Einzelmaßnahmen bzw. das Zusammenspiel von Maßnahmen an den Quellen und ggf. im Gewässer zur Herstellung des guten Zustandes beitragen, könnte darüber hinaus anhand von Pilotmaßnahmen in Hessen gezeigt werden. Denkbar wäre z.B. die exemplarische Umsetzung von Pilotprojekten unter Berücksichtigung der im Bericht genannten Vorschläge zur Optimierung oder Erweiterung kommunaler Kläranlagen mit dem Ziel, die praktische Umsetzung und Wirkung entsprechender Maßnahmen näher zu beschreiben.

**DAHLEM** Beratende Ingenieure  
GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG

Darmstadt, im Juli 2008

Projektleitung und Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Thomas Nichler

Dr.-Ing. Anke Durth

Dipl.-Ing. Andreas Hickmann

Dr.-Ing. André Niemann



## 6 LITERATUR

---

- [1] Forschungszentrum Jülich: Modell zur Ermittlung des Phosphoreintrags aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer, <http://www.fz-juelich.de/icg/icg-4/index.php?index=760>
- [2] Modellgestützte Analyse signifikanter Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen, Forschungsprojekt des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG), 2007/2008.
- [3] Niemann, A.; Knippenberg, M.: Ermittlung der diffusen Belastungen für das Einzugsgebiet der Ruhr zwischen Bachum und Villgst; Erläuterungsbericht im Auftrag des Ruhrverbandes, Dahlem Beratende Ingenieure, Essen, Juli 2004.
- [4] Abstimmung der Projektbearbeitung mit dem Auftraggeber (HLUG) gemäß Email vom 12.06.2008.
- [5] Abstimmung der Projektbearbeitung mit dem Auftraggeber (HLUG) gemäß Vermerk 2321/02.
- [6] Auszüge aus dem Hessisches-Abwasseranlagen-Kataster (HAA), Tabellen „TE\_KA\_001-002\_KaFrEls\_Szenario.xls“ und „KA\_007-013\_KA\_TeileBioDetail Gr041231.xls“ Stand: 25.04.2008.
- [7] Abstimmung der Projektbearbeitung mit dem Auftraggeber (HLUG) gemäß Vermerk 2321/04.
- [8] Abstimmung der Projektbearbeitung mit dem Auftraggeber (HLUG) gemäß Vermerk 2321/05.
- [9] Grundlagen für die Auswahl der kosteneffizientesten Maßnahmenkombinationen zur Aufnahme in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Wasserrahmenrichtlinie, Handbuch 02/04, herausgegeben vom Umweltbundesamt, Berlin, Januar 2004.
- [10] Schnittstelle Boden: Szenarien erosiven Pges-Eintrags, Kostenabschätzung (Berechnung), Tabellarische Darstellung möglicher P-Reduktion und Vermeidungskosten in drei Varianten bereitgestellt vom Auftraggeber (HLUG), Stand 18.04.2008.
- [11] LAWA-AO: Rahmenkonzept Monitoring, Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibung (Teil B), Arbeitspapier II, Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Komponenten, März 2007.
- [12] Geodatenbank Fachdaten „WRRL\_OW\_WK\_SZENARIO\_CAS“, bereitgestellt vom Auftraggeber (HLUG), 1. April 2008.
- [13] ATV-DVWK-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, GFA, St. Augustin, Mai 2000.
- [14] ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.1 „Phosphorrückgewinnung“, Bericht in KA 06/2003.

- 
- [15] Potenzial zur Reduzierung der Phosphor-Emissionen kommunaler Kläranlagen in Hessen, EAWAG Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Gutachten im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dübendorf, Mai 2008.
- [16] Gujer, W.: Siedlungswasserwirtschaft, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [17] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) vom 21.03.1997, in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S.1108, 2625), geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Oktober 2007 (BGBl. I S.2461).
- [18] ATV-DVWK-A 202, Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, GFA, St. Augustin, April 2004.
- [19] Günthert, F.W.; Reicherter, E.: Investitionskosten der Abwasserreinigung, Oldenbourg-Verlag, München, 2001.
- [20] Schmelz, G.: Vortrag auf der Fachtagung Klärschlamm, Bonn, 6./7.12.2006.
- [21] ATV-M 271, Personalbedarf für den Betrieb kommunaler Kläranlagen, GFA, St. Augustin, September 1998.
- [22] Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen, Lagebericht 2006, Hessisches Ministerium für Umwelt, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz, Wiesbaden, Juli 2007.
- [23] Zukunftsvereinbarung Regenwasser: Vereinbarung zur Umsetzung von Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, Emschergenossenschaft, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW und Kommunen, Dortmund, Oktober 2005.
- [24] Umsetzung der WRRL in NRW: Maßnahmen / Steckbriefe, (<http://www2.hydrotec.de/wrrl-nrw/wiki/index.php/Ma%C3%9Fnahmen/Steckbriefe>), Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW und Kommunen, Stand der Veröffentlichung: 06-2008.
- [25] Hillenbrand, T.; Böhm, E.: Kosten-Wirksamkeit von Maßnahmen im Bereich der Regenwasserbehandlung und –bewirtschaftung; Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, Dezember 2003.
- [26] Hahn, H. H. et al.: Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer aus städtischen befestigten Flächen – Endbericht, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 2000.
- [27] Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2002.
- [28] Online-Dokumentation für die Schmutzfrachtsimulation SMUSI 4.0, TU-Darmstadt, Darmstadt, Juni 1997.

- 
- [29] Verordnung über Zuweisungen zum Bau von Abwasseranlagen vom 8. Februar 2006, GVBl. I S. 31, aufgrund des § 32 des Finanzausgleichsgesetzes in der Fassung vom 16. Januar 2004 (GVBl. I S. 22), zuletzt geändert durch Gesetz vom 30. Januar 2006 (GVBl. I S. 22).
- [30] Peter, M., Ricarda, Miller: Maßnahmen zur Verminderung der diffusen Phosphor- und Pflanzenschutzmitteleinträge in Oberflächengewässer. Bericht für das HLUG, Ingenieurbüro Schnittstelle Boden, Stand 12.06.2008.