



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

4. Monitoringbericht zur Wirkung der Düngeverordnung auf das Grundwasser und die Oberflächengewässer

Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien
für Ernährung und Landwirtschaft
sowie für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbrau-
cherschutz

November 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen	III
Verzeichnis der Tabellen	VI
1 Einleitung	1
2 Erste Monitoringebene: landwirtschaftliche Emissionen	2
2.1 Entwicklungen des Agrarsektors	2
2.1.1 Mineraldüngerabsatz	2
2.1.2 Viehbestände	3
2.1.3 Biogaserzeugung	6
2.1.4 Sonstige Düngemittel	7
2.1.5 Ökologischer Landbau	9
2.2 Entwicklungen Stickstoff	10
2.2.1 Anteil mit Nitrat belasteter Gebiete an der landwirtschaftlich genutzten Fläche	12
2.2.2 Kulturartenspektrum (Hauptkulturen)	13
2.2.3 Ertragsentwicklung der Hauptkulturen	16
2.3 Entwicklungen Phosphor	20
2.3.1 Flächenanteile eutrophierter (gelber) Gebiete	20
2.3.2 Bodenbedeckung	21
3 Zweite Monitoringebene: Immissionsdaten der Gewässer	24
3.1 Grundwasser	24
3.1.1 Analyse der Nitratbelastung an Messstellen des EU-Nitratmessnetzes	25
3.1.2 Analyse der Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes	27
3.1.3 Ausweisung von mit Nitrat belasteten Gebieten	34
3.2 Fließgewässer	34
3.2.1 Phosphorkonzentration in Fließgewässern	35
3.2.2 Eutrophierungseinstufung	36
4 Dritte Monitoringebene: Teilbereich Modellierung der regionalen Nährstoffsituation	39
4.1 Landwirtschaftliche Modellierung: Arbeiten am Thünen-Institut	39
4.2 Hydrologische Modellierung: Arbeiten am Forschungszentrum Jülich (FZJ)	40
4.3 Hydrologische Modellierung: Arbeiten am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)	44
5 Dritte Monitoringebene: Teilbereich Modellregionen	48
6 Synthese und Ausblick	53
7 Anhang: Methodik der Indikatorenberechnung	56

7.1	Emissionsindikatoren	56
7.1.1	Viehbestand	56
7.1.2	Bodenbedeckung (C-Faktor)	57
7.2	Modellregionen	57
Literaturverzeichnis		60

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Mineraldüngerabsatz in Deutschland in 1.000 t Nährstoff (Balken) bzw. in kg/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF, Linien), als gleitendes Mittel über drei Jahre (d. h., im Jahr 2022 ist das Jahresmittel 2020–2022 dargestellt, ermittelt aus den Angaben zu den Wirtschaftsjahren).....	2
Abbildung 2: Entwicklung des Viehbestands in Deutschland, in Großvieheinheiten (GV) und in GV je ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF). Sonstige Tiere beinhalten v. a. Schafe, Ziegen und Pferde.	4
Abbildung 3: Regionale Verteilung der Viehbesatzdichten auf die Bundesländer in 2022 und Entwicklungstrends seit 2012.	5
Abbildung 4: Anzahl der Rinder (in Köpfen/ha LF) in 2022 auf Kreisebene.	6
Abbildung 5: Entwicklung des Biogasanlagenbestandes und der installierten elektrischen Leistung (ohne Überbauung).	7
Abbildung 6: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm aus der öffentlichen Abwasserentsorgung.	8
Abbildung 7: Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrest und Kompost aus biologischen Behandlungsanlagen.	9
Abbildung 8: Flächenanteile des ökologischen Landbaus in Prozent der LF.....	10
Abbildung 9: Grundwasserkörper in schlechtem chemischem Zustand für Nitrat nach WRRL (links) und mit Nitrat belastete Gebiete nach AVV GeA (rechts).Darstellung: Thünen-Institut.	11
Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Hauptkulturarten an der LF der jeweiligen Kulisse.....	15
Abbildung 11: Ertragsentwicklung der Hauptkulturen seit 2010.	17
Abbildung 12: Kreiserträge für Winterweizen und Silomais mit prozentualer Abweichung zum Fünfjahresmittel und zum langjährigen Mittel.....	19
Abbildung 13: Eutrophierte Gebiete nach § 13a Düngeverordnung. Gebietsausweisung auf Grundlage der AVV GeA.	20
Abbildung 14: C-Faktor auf Rasterbasis (100 m × 100 m) für Ackerland und Dauerkulturen, vierjähriges Mittel (2018–2021).	22

Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der C-Faktorwerte auf Rasterbasis (100 m × 100 m) im Zeitverlauf nach eutrophierten und sonstigen Gebieten.	23
Abbildung 1: Nitratbelastung an den 620 Messstellen des EU-Nitratmessnetzes mit vollständiger Messreihe für den Zeitraum 2012 bis 2022.	26
Abbildung 16: Nitratbelastung an den 620 Messstellen des EU-Nitratmessnetzes mit vollständiger Messreihe für den Zeitraum 2012 bis 2022.	27
Abbildung 17: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.	28
Abbildung 18: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen. Nur die Messstellen mit vollständiger Messreihe wurden berücksichtigt.	30
Abbildung 19: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.	31
Abbildung 1: Karte der mittleren Nitratkonzentrationen für die 7.065 Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022 für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.	33
Abbildung 1: Auswertung des Indikators Phosphorkonzentration in Fließgewässern für die Messstellen des repräsentativen Messnetzes.....	36
Abbildung 1: Auswertung des Indikators Eutrophierungseinstufung für die Messstellen des repräsentativen Messnetzes (Stand: 2020).	38
Abbildung 1: Deutschlandweite und länderspezifische Datengrundlagen für die Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell mGROWA.....	41
Abbildung 1: Ergebnisse der ersten Modellierungen für die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen.	42
Abbildung 1: Ergebnisse der Modellevaluierungen für den Gesamtabfluss (jeweils obere Reihe) und für die Grundwasserneubildung (jeweils untere Reihe) für die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen.	43
Abbildung 1: Modellregionen aus dem Demonstrationsvorhaben MoNi.....	49

Abbildung 1: Stickstoffzufuhr, -abfuhr und -bilanzsaldo, Stickstoffzufuhr über mineralische (D_{min}) und flüssige organische Düngemittel (D_{org}) sowie Stickstoffzufuhr im Herbst (D_{Herbst} ; im Mittel der im Herbst gedüngten Flächen) im Mittel der Testschläge ($n=576$) für die Jahre 2014–2022. ...51

Abbildung 1: Ernte- und Herbst- N_{min} -Werte im Mittel der Testschläge ($n=576$) für die Jahre 2017–2022.....52

Abbildung 1: Nitrat-Sickerwasserkonzentration im Boden von 90 bis 300 cm Tiefe im Mittel der untersuchten Testschläge ($n=144$) für die Jahre 2017–2022.52

Abbildung 20: In den Modellregionen durchgeführtes Messprogramm mit Zuordnung zur vertikalen Bezugsebene.....59

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF) in mit Nitrat belasteten Gebieten. Auswertung auf Grundlage von ATKIS.	12
Tabelle 1: Landwirtschaftlich genutzte Fläche in eutrophierten Gebieten nach Bundesländern. Auswertung auf Grundlage von ATKIS.	21
Tabelle 1: Anzahl und Landnutzungsverteilung der für den vorliegenden Bericht in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 herangezogenen Messstellen des EU-Nitratmessnetzes (2012–2022) sowie Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes (2020–2022), für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.	25
Tabelle 1: Einstufung der mittleren Phosphorkonzentrationen nach Anlage 7 OGewV	35
Tabelle 1: Einstufung in die Eutrophierungsklassen der Berichterstattung zum Nitratbericht.....	37
Tabelle 1: Verwendete GV-Schlüssel	56

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist der 4. Monitoringbericht zur Wirkung der Düngeverordnung (DüV) auf das Grundwasser und die Oberflächengewässer, zu dem sich die Bundesrepublik Deutschland gegenüber der Europäischen Kommission verpflichtet hat. Die Berichterstattung erfolgt jährlich.

Im vorliegenden Bericht sind die aktuellen Entwicklungen bzw. der Sachstand zu den im Feinkonzept (2. Monitoringbericht vom November 2021) festgelegten Einzelindikatoren dargestellt, die nach den drei Monitoringebenen Emissionen – Immissionen – Modellierung/Modellregionen untergliedert sind. Er schließt mit einer Synthese der Erkenntnisse, die aus den Indikatoren gewonnen werden und gibt einen Ausblick auf die zu erwartenden Weiterentwicklungen des Monitoringsystems für den folgenden Bericht. Die methodischen Details der Indikatorberechnung sind im Anhang aufgeführt, soweit Erläuterungen erforderlich sind.

Das Monitoringsystem wurde 2021 zusammen mit Bund und Ländern konzipiert und befindet sich seit 2022 im Aufbau. Die Berichte werden nun systematisch um die im Feinkonzept (2. Monitoringbericht 2021) skizzierten Daten und Analysen erweitert. Gegenüber dem letzten Monitoringbericht von 2022 konnte das System um zwei wesentliche Aspekte erweitert werden. Erstens konnten für einige Bundesländer erstmals Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) ausgewertet werden (Kapitel 2.2.2 und 2.3.2). Damit können nun Auswertungen zur Landnutzung im Emissionsteil berichtet werden. Zweitens wurden für diesen Bericht erstmals die Grundwassermessstellen des Ausweisungsmessnetzes der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung mit Nitrat belasteter und eutrophierter Gebiete (AVV GeA), zusätzlich zum EU-Nitratmessnetz, ausgewertet (Kapitel 3.1.2). Damit fließen in die Darstellung der Immissionen in das Grundwasser Daten von rund 11.000 Messstellen ein. Die Arbeiten im Rahmen der Modellierung verlaufen plangemäß, sodass voraussichtlich 2024 erste Ergebnisse berichtet werden können. In diesem Bericht wird der aktuelle Sachstand für den Aufbau der Modellierung dargestellt (Kapitel 4). Außerdem werden im Berichtsteil Modellregionen erstmals kleinräumige Daten aus fünf Ackerbaugebieten berichtet (Kapitel 5). Das Monitoringsystem soll darstellen, wie sich die Situation in mit Nitrat belasteten bzw. eutrophierten Gebieten darstellt und die Informationsgrundlage für eine mögliche Nachsteuerung im Bereich der Maßnahmen bereitstellen. Zu diesem Zweck wird ein Teil der Emissionsdaten erstmals, differenziert nach belasteten und unbelasteten Gebieten ausgewertet und dargestellt (Kapitel 6).

Mit der Änderung des Düngegesetzes (DüngG) soll darüber hinaus zukünftig die Rechtsgrundlage für die Datenerhebung und die Durchführung des Monitorings geschaffen werden. Das DüngG schafft die Grundlage für den Erlass einer Verordnung, in der rechtsverbindlich festgelegt werden soll, welche Daten für das Monitoring zu erheben, verarbeiten und nutzen sind. Das DüngG wird derzeit im Bundestag diskutiert und soll voraussichtlich Anfang /2024 verabschiedet werden. I

2 Erste Monitoringebene: landwirtschaftliche Emissionen

2.1 Entwicklungen des Agrarsektors

2.1.1 Mineraldüngerabsatz

Der Mineraldüngerabsatz ist als gleitendes dreijähriges Mittel dargestellt (Abbildung 1), da die Absatzmenge eines Jahres aufgrund von überjähriger Lagerhaltung nur bedingt Rückschlüsse auf die tatsächlich gedüngte Menge zulässt und die zugrunde liegenden Daten nach Wirtschaftsjahren erfasst werden. Jahre mit niedrigen Düngemittelpreisen bewirken einen Anreiz zum Lageraufbau; in Hochpreisphasen werden Lagerbestände auf den Betrieben tendenziell aufgebraucht. Die folgenden Aussagen zum Mineraldüngereinsatz 2022 beziehen sich also auf das dreijährige Mittel 2020–2022. Im Jahresmittel 2019–2021 betrug die Absatzmenge an mineralischem Stickstoffdünger 1,24 Mio. t N (75 kg N/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche [LF]). Dieser reduzierte sich im Jahresmittel 2020–2022 um etwa 122.000 t N auf 1,12 Mio. t N (68 kg N/ha LF). Der Absatz von mineralischem Phosphat reduzierte sich im Jahresmittel 2020–2022 im Vergleich zum Jahresmittel 2019–2021 um rund 44.000 t, von 185.000 t P_2O_5 (11 kg P_2O_5 /ha LF) auf 141.000 t P_2O_5 (8 kg P_2O_5 /ha LF).

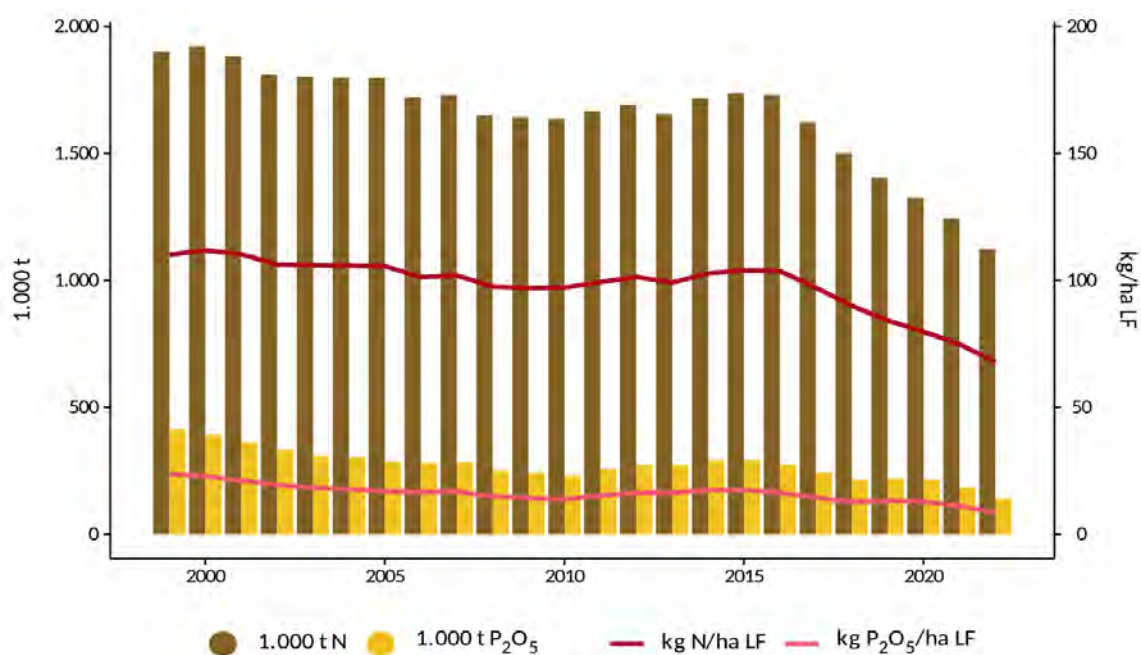


Abbildung 1: Mineraldüngerabsatz in Deutschland in 1.000 t Nährstoff (Balken) bzw. in kg/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF, Linien), als gleitendes Mittel über drei Jahre (d. h., im Jahr 2022 ist das Jahresmittel 2020–2022 dargestellt, ermittelt aus den Angaben zu den Wirtschaftsjahren).

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 04.09.2023; Datenlizenz by-2-0.

Der seit 2016 zu beobachtende Rückgang beim Absatz mineralischer Düngemittel hat sich weiter fortgesetzt. Während die verschärften Düngeregeln der DüV 2017 und die Trockenheit der vergangenen Jahre wichtige Gründe für den Rückgang der mineralischen Düngemittel, insbesondere von mineralischen Stickstoffdüngern waren, kommen nun zwei weitere hinzu. Zum einen sind im Jahr 2020 die schärferen Regeln für mit Nitrat belastete Gebiete nach § 13a DüV in Kraft getreten. Damit muss in mit Nitrat belasteten Gebieten der gesamtbetriebliche Stickstoffdüngbedarf um 20 % verringert werden. Zum anderen haben der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und die Energiekrise mineralische Düngemittel stark verteuert und deren Marktverfügbarkeit mitunter erheblich eingeschränkt.

2.1.2 Viehbestände

In Abbildung 2 ist die Entwicklung des Viehbestands in Deutschland seit 1990 in Großvieheinheiten (GV) insgesamt bzw. je Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche (GV/ha LF) dargestellt. Insgesamt sind die Viehbestände seit Anfang der 1990er-Jahre rückläufig, wobei die Bestände phasenweise wieder geringfügig gestiegen sind. Seit 2014 ist ein deutlich rückläufiger Trend der Viehbestände zu beobachten. Es ist zu erwarten, dass dieser Trend auch in Zukunft Bestand haben wird und sich der Nährstoffanfall aus der Tierhaltung entsprechend verringert. Die anhaltende Diskussion um die Stellung der Nutztierhaltung in der Gesellschaft und ein verändertes Konsumverhalten sowie wiederkehrende Krisen auf den Exportmärkten (z. B. bedingt durch die Afrikanische Schweinepest), die steigenden Anforderungen an Stallungen (Luftreinhaltung, Tierwohl) und düngerechtlichen Vorgaben zur ordnungsgemäßen Verwertung der anfallenden Wirtschaftsdünger (insbesondere ab der DüV 2017) sowie die derzeitige Energiekrise bieten den Betrieben wenig Anreize, bestehende Tierhaltung aufrecht zu erhalten oder auszubauen. Lediglich die Geflügelhaltung ist seit den 1990er-Jahren gestiegen. Sie hat aber am gesamten Viehbesatz nur einen geringen Anteil im Vergleich zu Rindern und Schweinen.

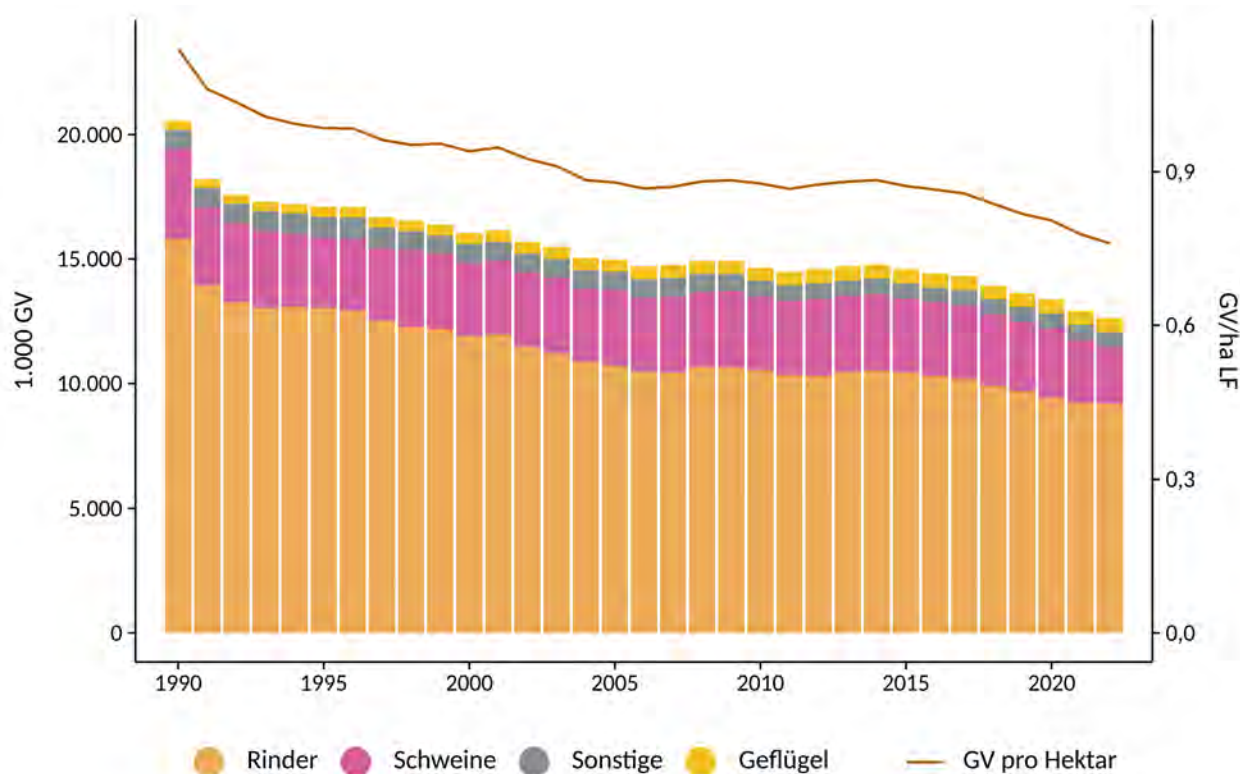


Abbildung 2: Entwicklung des Viehbestands in Deutschland, in Großvieheinheiten (GV) und in GV je ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF). Sonstige Tiere beinhalten v. a. Schafe, Ziegen und Pferde.

Anmerkung: Abweichungen zur Darstellung im 3. Monitoringbericht sind begründet durch Wechsel der Datenquelle konsistent zur Klimaberichterstattung. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Tierdaten aus dem Landwirtschaftlichen Emissionsinventar, unveröffentlichter Bericht 2024. Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 04.09.2023; Datenlizenz by-2-0.

Die Reduzierung des Viehbestands ist zu großen Teilen auf die Entwicklung in der Rinderhaltung zurückzuführen, die im Betrachtungszeitraum kontinuierlich rückläufig ist. Betrug die Anzahl der gehaltenen Rinder um die Jahrtausendwende noch 14,5 Mio., wurden in 2022 rund 11 Mio. Rinder in Deutschland gehalten. Im Vergleich zu 2021 ist der Bestand etwa konstant geblieben.

Seit einigen Jahren ist auch der Schweinebestand rückläufig. Waren die Bestände seit Anfang der 1990er-Jahre bis Mitte der 2010er-Jahre recht stabil, ist seitdem ein deutlicher Rückgang zu beobachten. Im Mai 2023 wurden in Deutschland rund 20,7 Mio. Schweine gehalten, 1,4 Mio. weniger als im Vorjahreszeitraum und 4 Mio. weniger als 2021. Im Vergleich zum Jahr 2014 ist der Schweinebestand im Mai 2023 um rund 7,4 Mio. Tiere bzw. 26 % gesunken.

Bei einer räumlich differenzierten Betrachtung auf Bundeslandebene werden deutliche Tierhaltungsschwerpunkte sichtbar (Abbildung 3). So liegt in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen die durchschnittliche Viehbesatzdichte bei über 1 GV/ha LF, in Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg und Bayern zwischen 0,6 und 1 GV/ha LF und in den mittel- und ostdeutschen Bundesländern

deutlich darunter. Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Bayern weisen die höchsten Rinderdichten auf, während in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen auch die Schweine einen deutlichen Anteil am Viehbesatz haben.

Rinder zeigen in allen Bundesländern seit 2012 einen ähnlichen absteigenden Trend und spiegeln insoweit das bundesweite Bild wider. Die Entwicklung der Schweinebestände ist ähnlich, allerdings fand ein Großteil des Bestandabbaus erst in den vergangenen fünf Jahren statt. Der stärkste Rückgang von Schweinen ist in den beiden Bundesländern mit der höchsten Schweinebesatzdichte, Niedersachsen (-0,006 GV/ha LF pro Jahr) und Nordrhein-Westfalen (-0,012 GV/ha LF pro Jahr), zu verzeichnen.

Geflügelbesatzdichten zeigen seit 2012 in den meisten Bundesländern, mit wenigen Ausnahmen, einen steigenden Trend oder blieben auf einem konstanten Level.

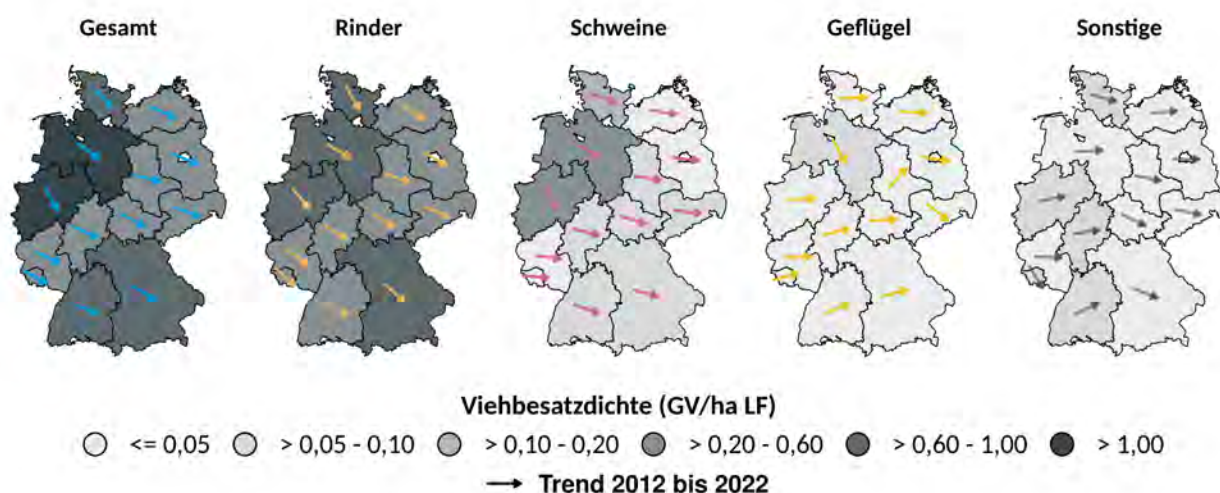


Abbildung 3: Regionale Verteilung der Viehbesatzdichten auf die Bundesländer in 2022 und Entwicklungstrends seit 2012.

Anmerkung: Die Pfeile symbolisieren die Richtung der Trends. Die Entwicklungen in jedem Bundesland sind als relative Werte zur maximalen Veränderung einer Tierart dargestellt. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Tierdaten aus dem Landwirtschaftlichen Emissionsinventar, unveröffentlichter Bericht 2024. Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 04.09.2023; Datenlizenz by-2-0. Die Anzahl der Rinder liegt auf Kreisebene vor (Abbildung 4). Innerhalb der viehstarken Bundesländer zeigt sich eine hohe räumliche Variabilität, mit Kreisen von über zwei Rindern pro ha LF, zum Beispiel am Niederrhein, in den Alpen oder im Bayerischen Wald.

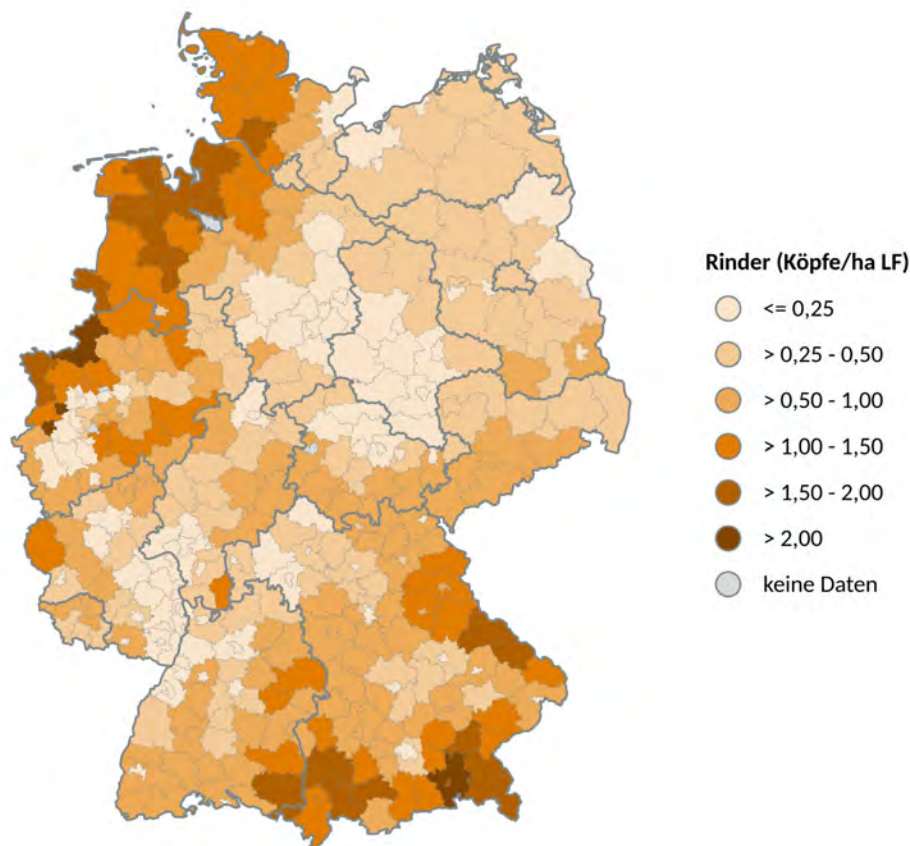


Abbildung 4: Anzahl der Rinder (in Köpfen/ha LF) in 2022 auf Kreisebene.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 04.09.2023; Datenlizenz by-2-0.

Da zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern und zu Wirtschaftsdüngerimporten keine neueren Daten vorliegen, werden diese Kapitel nicht erneut aufgeführt. Eine Verbesserung der Datengrundlage wird gemäß Feinkonzept (2. Monitoringbericht) in Zukunft angestrebt.

2.1.3 Biogaserzeugung

Gärreste sind nährstoffhaltige Rückstände aus Gärprozessen zur Biogaserzeugung, die häufig in der Landwirtschaft als Dünger verwendet werden. Ihr Volumen hängt vorwiegend von der Kapazität einer Anlage ab, die in der Regel anhand der installierten elektrischen Leistung gemessen wird. Darüber hinaus hängt die Nährstoffmenge, die in Form von Gärresten anfällt, von den eingesetzten Substraten (z. B. Gülle, Mist, pflanzliche Substrate, Bioabfälle etc.) ab. Der mit den Gärresten verbundene Nährstoffanfall (Anlagenoutput) entspricht dabei in etwa der Nährstoffmenge, die durch Gärsubstrate (Anlageninput) in die Anlagen gelangt. Die Anlagenkapazitäten in Deutschland haben

infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes von 2004 stark zugenommen (Abbildung 5), der Zuwachs ist aber seit Mitte der 2010er-Jahre deutlich geringer als noch ein Jahrzehnt zuvor.

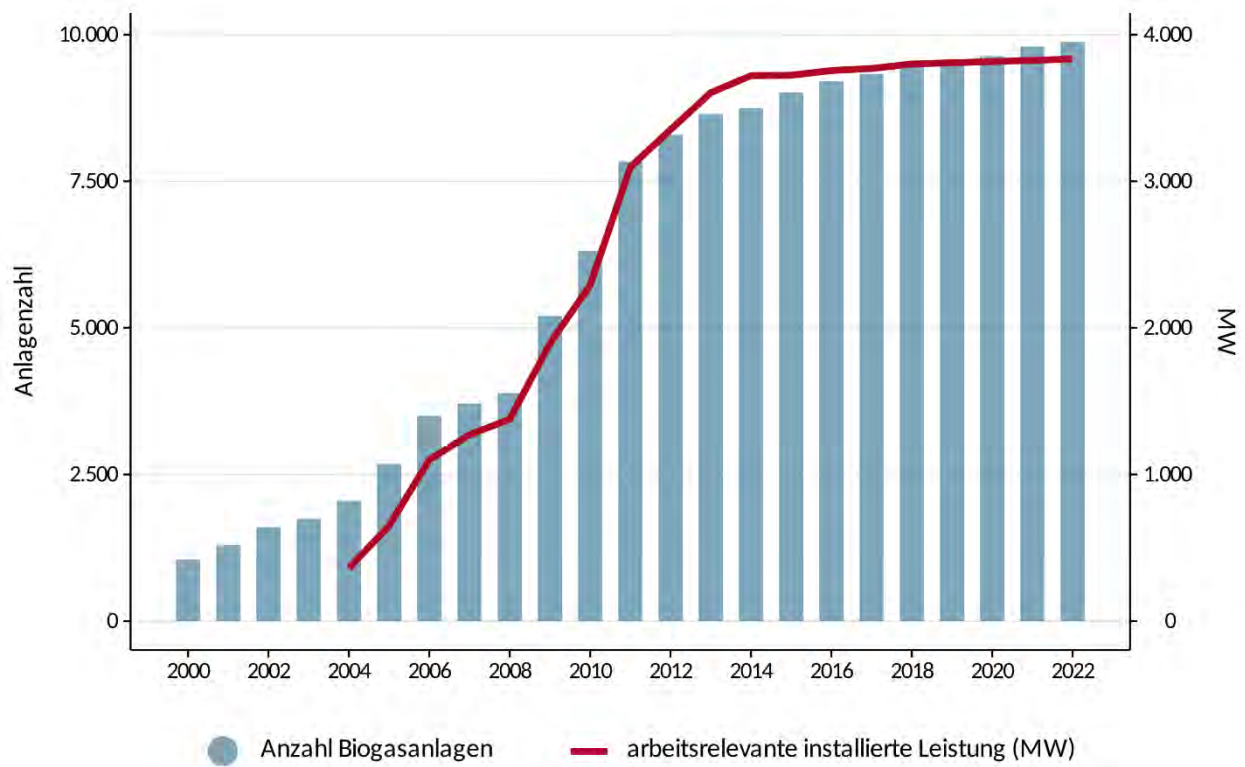


Abbildung 5: Entwicklung des Biogasanlagenbestandes und der installierten elektrischen Leistung (ohne Überbauung).

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Fachverband Biogas (2022).

Die gesamte installierte Leistung betrug im Jahr 2022 etwa 3.833 MW und ist gegenüber dem Vorjahr nur leicht gestiegen. Die Zahl der Anlagen ist 2022 im Vergleich zum Vorjahr um 77 Anlagen von 9.799 auf 9.876 Anlagen geringfügig gewachsen.

2.1.4 Sonstige Düngemittel

Unter „Sonstige Düngemittel“ wird über den Einsatz von Klärschlamm, Kompost und Gärresten aus biologischen Abfallbehandlungsanlagen, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln berichtet, soweit dazu Informationen vorliegen bzw. sofern eine nennenswerte Relevanz für landwirtschaftliche Emissionen gegeben ist. Sektoral sind diese Dünger von untergeordneter Bedeutung und per Definition teilweise „Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt“, ihr kumulierter Anteil an der Gesamtzufuhr an gedüngtem Stickstoff liegt deutlich unter 10 %.

2.1.4.1 Klärschlamm

Der Einsatz von Klärschlamm ist seit Mitte der 2000er-Jahre aufgrund strengerer gesetzlicher Vorgaben stark rückläufig. Klärschlämme sind vorwiegend als Phosphatdünger von ackerbaulichem Interesse, bergen aber das Risiko von Schadstoffeinträgen in den Boden (v. a. durch Schwermetalle) und in die Gewässer. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland rund 227.000 t Klärschlamm (Trockenmasse) landwirtschaftlich verwertet (Abbildung 6). Das sind rund 36.000 t weniger als im Vorjahr und weniger als die Hälfte der Menge von 2006 (ca. 612.000 t).

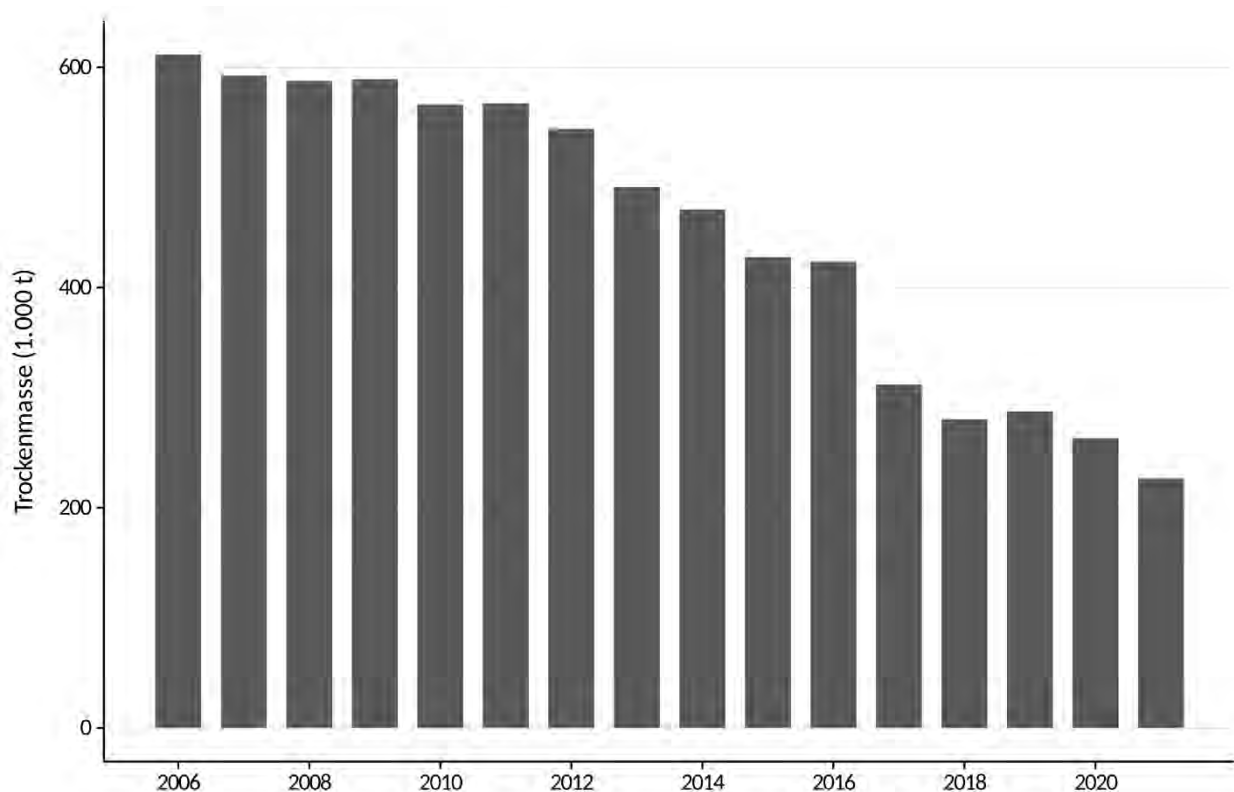


Abbildung 6: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm aus der öffentlichen Abwasserentsorgung.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 04.10.2023; Datenlizenz by-2-0.

2.1.4.2 Kompost und Gärreste aus biologischen Behandlungsanlagen

Kompost und Gärreste aus biologischen Behandlungsanlagen sind im ökologischen Landbau und, in Zeiten hoher Mineraldüngerpreise, auch in der konventionellen Landwirtschaft zunehmend gefragte Düngemittel. Neben seiner Düngewirkung ist Kompost aufgrund des hohen Anteils organischer Substanz aus pflanzenbaulicher Sicht positiv für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit zu bewerten. Die in der Landwirtschaft als Dünger verwertete Menge hat im Jahr 2021 im Vergleich zum

Vorjahr um etwa 150.000 t abgenommen (Abbildung 7) und blieb damit leicht unter dem Höchststand in 2020. Die Düngung mit Gärresten aus biologischen Behandlungsanlagen ist dagegen nach einem rückläufigen Trend wieder leicht angestiegen. Die Gesamtmenge betrug im Jahr 2021 rund 3,2 Mio. t, etwa 160.000 t mehr als im Vorjahr. Eine Trendumkehr lässt sich aus dem kurzen Betrachtungszeitraum jedoch nicht ableiten.

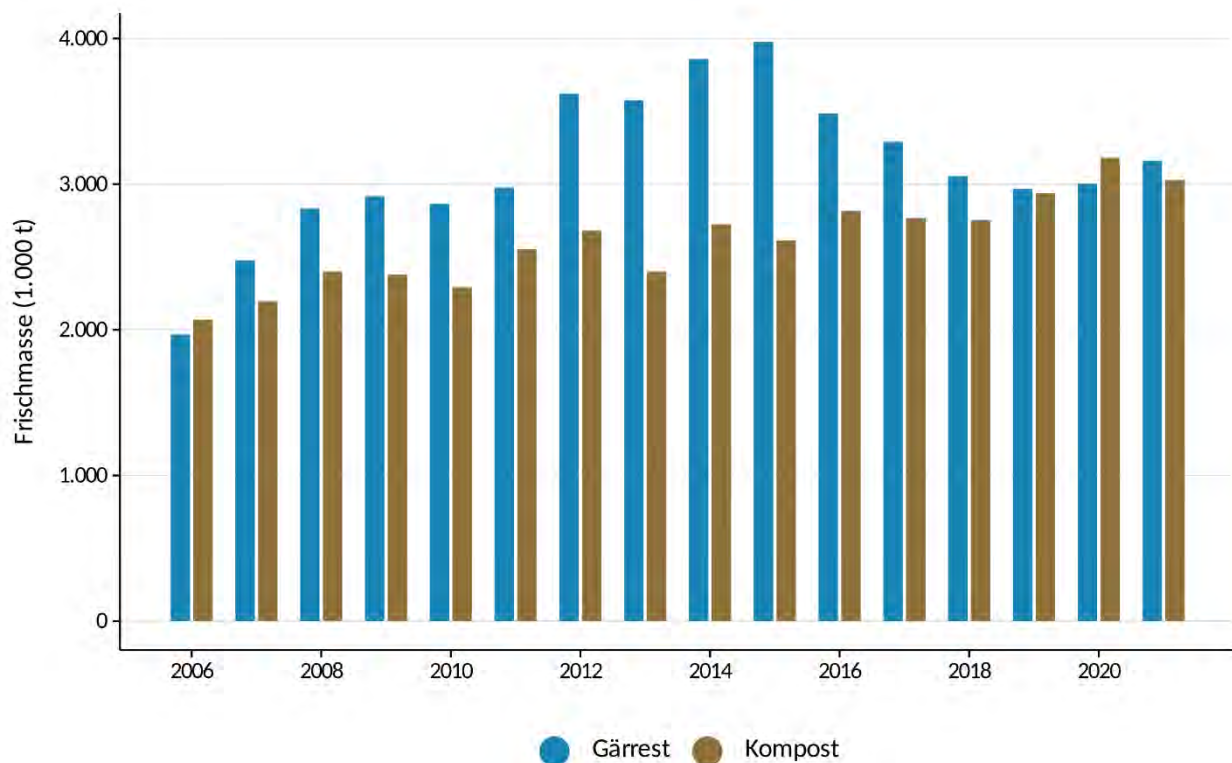


Abbildung 7: Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrest und Kompost aus biologischen Behandlungsanlagen.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online, letzter Zugriff am 07.10.2023; Datenlizenz by-2-0.

2.1.5 Ökologischer Landbau

Der ökologische Landbau gilt als ressourcenschonende Art der Landbewirtschaftung; der Öko-Flächenanteil ist ein Indikator der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Der ökologische Landbau zeichnet sich durch positive Umwelteffekte aus, die durch im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft niedrigere Bewirtschaftungsintensitäten erreicht werden. Mit dem Verzicht auf mineralische Düngemittel gehen in der Regel geringere Nährstoffzufuhren einher. Durch in der Regel geringere Erträge sind allerdings auch die Nährstoffabfuhr geringer. Insgesamt ist aber eine positive Wirkung des ökologischen Landbaus auf den Gewässerschutz zu erwarten, insbesondere bei der Verminderung von Einträgen von Nitrat (Sanders und Heß, 2019). Der Flächenanteil unter ökologischer Bewirtschaftung steigt seit Ende der 1990er-Jahre kontinuierlich an. Seit Mitte der 2010er-Jahre konnte der Zuwachs nochmals deutlich gesteigert werden (Abbildung 8). Im Jahr 2022 lag der Öko-

Flächenanteil bei 11,2 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche, das bedeutet einen Anstieg um 0,3 Prozentpunkte im Vergleich zum Vorjahr. Die Zunahme des Flächenanteils hat sich im Vergleich mit den Vorjahren etwas verringert. Von 2020 auf 2021 lag sie noch bei 0,6 Prozentpunkten.

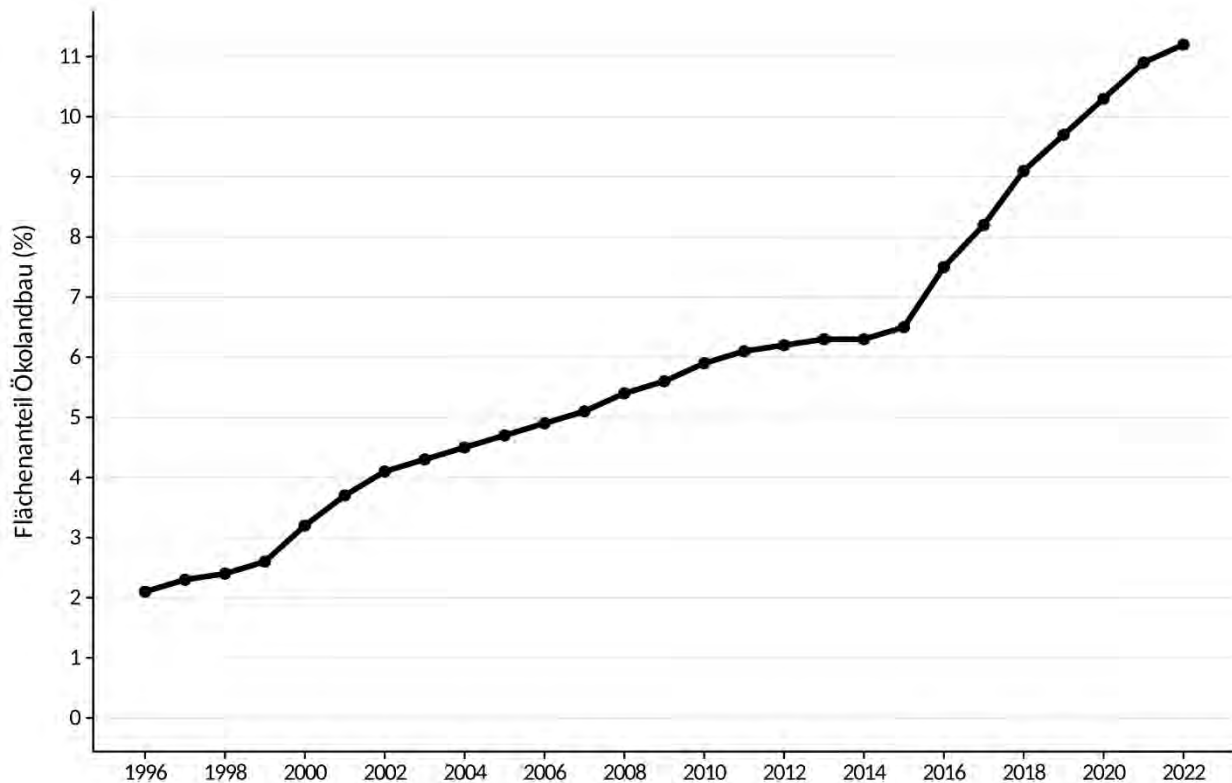


Abbildung 8: Flächenanteile des ökologischen Landbaus in Prozent der LF.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: UBA – Ökologischer Landbau (letzter Zugriff am 19.09.2023). Verwendet wird die Erfassung des BMEL.

2.2 Entwicklungen Stickstoff

Zur Darstellung von Entwicklungen der Stickstoffemissionen wird die Betrachtungsebene „Grundwasserkörper“ verwendet. In Deutschland werden Grundwasserkörper nach den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bewertet und entsprechend ihres chemischen Zustands für Nitrat als „gut“ oder „schlecht“ eingestuft. Die mit Nitrat belasteten Gebiete nach AVV GeA sind zu großen Teilen mit den Grundwasserkörpern in schlechtem chemischem Zustand für Nitrat kongruent, d. h., 76 % der als mit Nitrat belastet ausgewiesenen Gebiete liegen in Grundwasserkörpern in schlechtem chemischen Zustand. Ein Anteil von 24 % dagegen liegt in Grundwasserkörpern, deren chemischer Zustand nach WRRL für Nitrat gut ist. Die beiden Kulissen sind Abbildung 9 veranschaulicht.

Die unterschiedliche Ausprägung der beiden Flächen in Abbildung 9 ist darauf zurückzuführen, dass nach WRRL bzw. § 7 Grundwasserverordnung (GrwV) der prozentuale Anteil der ermittelten Belastungsfläche (>20 % des GWK) zu einem schlechten Zustand des gesamten GWK führt, während die belasteten Gebiete nach AVV GeA konkrete regionalisierte Flächen der Nitratbelastung darstellen. Weiterhin werden bei der Bewertung des chemischen Zustands nach WRRL (bzw. GrwV) Schwellenwertüberschreitungen zunächst unabhängig von deren Ursache ermittelt, während nach AVV GeA, Anlage 1 (4) nur Schwellenwertüberschreitungen an landwirtschaftlich beeinflussten Messstellen zu berücksichtigen sind.

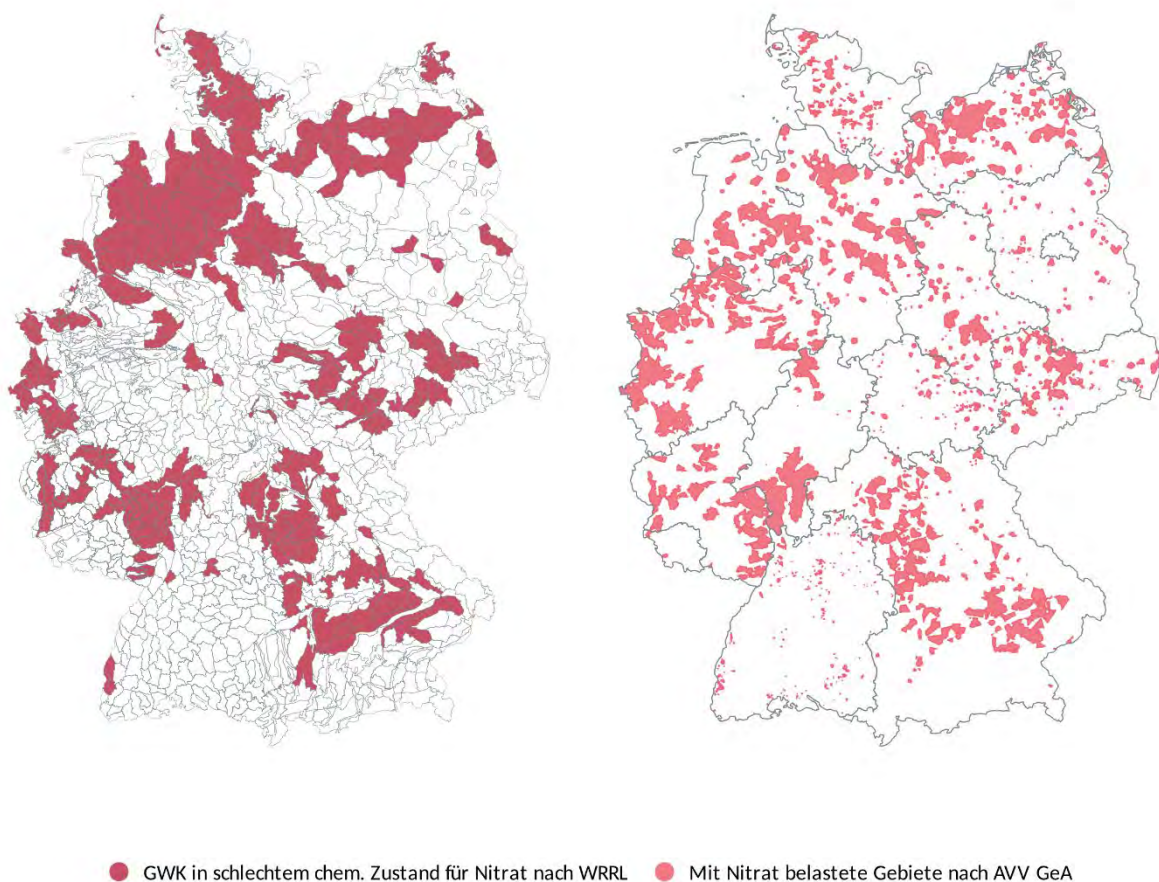


Abbildung 9: Grundwasserkörper in schlechtem chemischem Zustand für Nitrat nach WRRL (links) und mit Nitrat belastete Gebiete nach AVV GeA (rechts). Darstellung: Thünen-Institut.

Quelle: Daten der Bundesländer, bereitgestellt vom Umweltbundesamt. Stand der mit Nitrat belasteten Gebiete: November/Dezember 2022. Stand der Grundwasserkörper-Einstufung: Dezember 2019.

Um einerseits die Entwicklung der mit Nitrat belasteten Gebiete darstellen zu können, andererseits aber auch eine flächendeckende Betrachtung der Grundwasserkörper zu ermöglichen, werden für die regionalen Indikatoren der Stickstoffemissionen folgende Betrachtungsebenen gewählt:

- Flächen, die nach AVV GeA als mit Nitrat belastet eingestuft wurden und die in Grundwasserkörpern in schlechtem chemischem Zustand für Nitrat liegen
- Flächen, die nach AVV GeA nicht als mit Nitrat belastet eingestuft wurden und die in Grundwasserkörpern in schlechtem chemischem Zustand für Nitrat liegen
- Flächen, die nach AVV GeA als mit Nitrat belastet eingestuft wurden und die in Grundwasserkörpern in gutem chemischem Zustand für Nitrat liegen
- Flächen, die nach AVV GeA nicht als mit Nitrat belastet eingestuft wurden und die in Grundwasserkörpern in gutem chemischem Zustand für Nitrat liegen

2.2.1 Anteil mit Nitrat belasteter Gebiete an der landwirtschaftlich genutzten Fläche

In diesem Berichtsteil wird in Zukunft die Veränderung der als mit Nitrat belastet ausgewiesenen Flächen dargestellt. In den mit Nitrat belasteten Gebieten gelten strengere Düngevorschriften, als es die DüV für die nicht als mit Nitrat belastet ausgewiesenen Gebiete vorschreibt. Diese umfassen (vorbehaltlich Ausnahmetatbeständen):

- Reduzierung des Stickstoffdüngedarfs um 20 %
- Schlagbezogene Obergrenze für die Zufuhr organischen und organisch-mineralischen Stickstoffs bei 170 kg N/ha
- Beschränkung der Herstdüngung
- Verpflichtender Anbau von Zwischenfrüchten, wenn die folgenden Sommerungen gedüngt werden sollen
- Erweiterte Sperrfristen

Die Flächen, auf denen die strengeren Regeln gelten, sind nach Bundesländern in o. g. Klassifikation für das Jahr 2023 in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF) in mit Nitrat belasteten Gebieten. Auswertung auf Grundlage von ATKIS.

Bundesland	GWK Einstufung Nitrat nach WRRL für 2019	LF in mit Nitrat belasteten Gebieten (ha)	LF in nicht mit Nitrat belasteten Gebieten gemäß AVV GeA (ha)	Gesamt LF (ha)	Anteil mit Nitrat belasteter Gebiete an der LF (%)
Schleswig-Holstein	gut schlecht	5.800 99.300	637.000 358.000	1.099.000	10
Hamburg	gut schlecht	0 40	11.000 7.000	18.100	< 1
Niedersachsen	gut schlecht	87.400 517.000	1.132.000 1.150.000	2.886.000	21
Bremen	schlecht	250	11.000	11.300	2
	gut	174.000	962.000	1.689.000	32

Bundesland	GWK Einstufung Nitrat nach WRRL für 2019	LF in mit Nitrat belasteten Gebieten (ha)	LF in nicht mit Nitrat belasteten Gebieten gemäß AVV GeA (ha)	Gesamt LF (ha)	Anteil mit Nitrat belasteter Gebiete an der LF (%)
Nordrhein-Westfalen	schlecht	371.000	183.000		
Hessen	gut schlecht	22.600 161.000	717.000 17.500	919.000	20
Rheinland-Pfalz	gut schlecht	9.880 229.000	443.000 165.000	846.000	28
Baden-Württemberg	gut schlecht	19.700 10.400	1.544.000 53.700	1.628.000	2
Bayern	gut schlecht	138.000 468.000	2.201.000 739.000	3.547.000	17
Saarland	gut schlecht	1.830 1.730	88.500 40	92.100	4
Berlin	gut	0	3.240	3.250	0
Brandenburg	gut schlecht	40.000 26.000	1.270.000 86.700	1.422.000	5
Mecklenburg-Vorpommern	gut schlecht	137.000 286.000	531.000 513.000	1.466.000	29
Sachsen	gut schlecht	78.800 113.000	616.000 156.000	964.000	20
Sachsen-Anhalt	gut schlecht	53.000 91.600	927.000 208.000	1.279.000	11
Thüringen	gut schlecht	9.290 33.900	532.000 306.000	881.000	5
Deutschland gesamt	gut schlecht	776.000 2.409.000	11.613.000 3.952.000	18.750.000	17

Anmerkung: Auswertungen für alle Bundesländer wurden auf Grundlage von ATKIS vom Thünen-Institut vorgenommen. Der am Thünen-Institut vorliegende ATKIS-Datensatz kann sich von den in den Ländern vorliegenden Datensätzen unterscheiden. Aus diesem Grund können die hier dargestellten Zahlen von vorhergehenden Auswertungen abweichen. LF=landwirtschaftlich genutzte Fläche, GWK=Grundwasserkörper.

Quelle: Thünen-Institut.

2.2.2 Kulturartenspektrum (Hauptkulturen)

Mit dem Indikator Kulturartenspektrum wird die Entwicklung der Anbauumfänge der wichtigsten Ackerkulturen sowie der Grünlandflächen beschrieben (Abbildung 10). Durch die fruchtfolgebedingte Nährstoffausnutzung ist das Kulturartenspektrum, neben Standortfaktoren und dem Nährstoffmanagement, eine wichtige Einflussgröße auf die Gewässerqualität. Der Indikator wurde mit InVeKoS-Daten von zehn Bundesländern berechnet.

Im Gesamtbild ist die Zusammensetzung der landwirtschaftlichen Landnutzung über den mit Nitrat belasteten Grundwasserkörpern („GWK in schlechtem Zustand“) ähnlich der Nutzung über den übrigen Grundwasserkörpern („GWK in gutem Zustand“). Ebenso verhält es sich beim Vergleich zwischen den mit Nitrat belasteten Gebieten und den nicht mit Nitrat belasteten Gebieten. Beispielsweise dominieren Winterweizen und Mais die Fruchtfolgen, während Roggen und Winterraps eine untergeordnete Rolle spielen. Dennoch gibt es einige wesentliche Unterschiede. Erstens sind die Grünlandanteile an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in belasteten Gebieten deutlich geringer als in den übrigen Gebieten, wobei dieser Unterschied in belasteten Grundwasserkörpern geringer ist als in den übrigen. Zweitens ist der Hackfruchtanbau in den belasteten Gebieten stärker verbreitet. Drittens sind in „sonstigen“ Gebieten über Grundwasserkörpern in gutem Nitrat-Zustand die relativen Anbauumfänge von Winterweizen und Mais geringer als in den anderen Gebieten.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lassen die Daten noch keinen Rückschluss auf signifikante Entwicklungen bei der Landnutzung in den jeweiligen Gebieten zu, da noch zu wenige Jahre zur Verfügung stehen, um aussagekräftige Zeitreihen bilden zu können. Mittelfristig sollen, d. h., wenn ausreichend Jahre zur Trendermittlung zur Verfügung stehen, Aussagen zur Entwicklung der Landnutzung in belasteten Gebieten abgeleitet werden. Langfristig können außerdem Fruchtfolgen im Hinblick auf ihre Stickstoffaustragsgefährdung klassifiziert dargestellt werden.

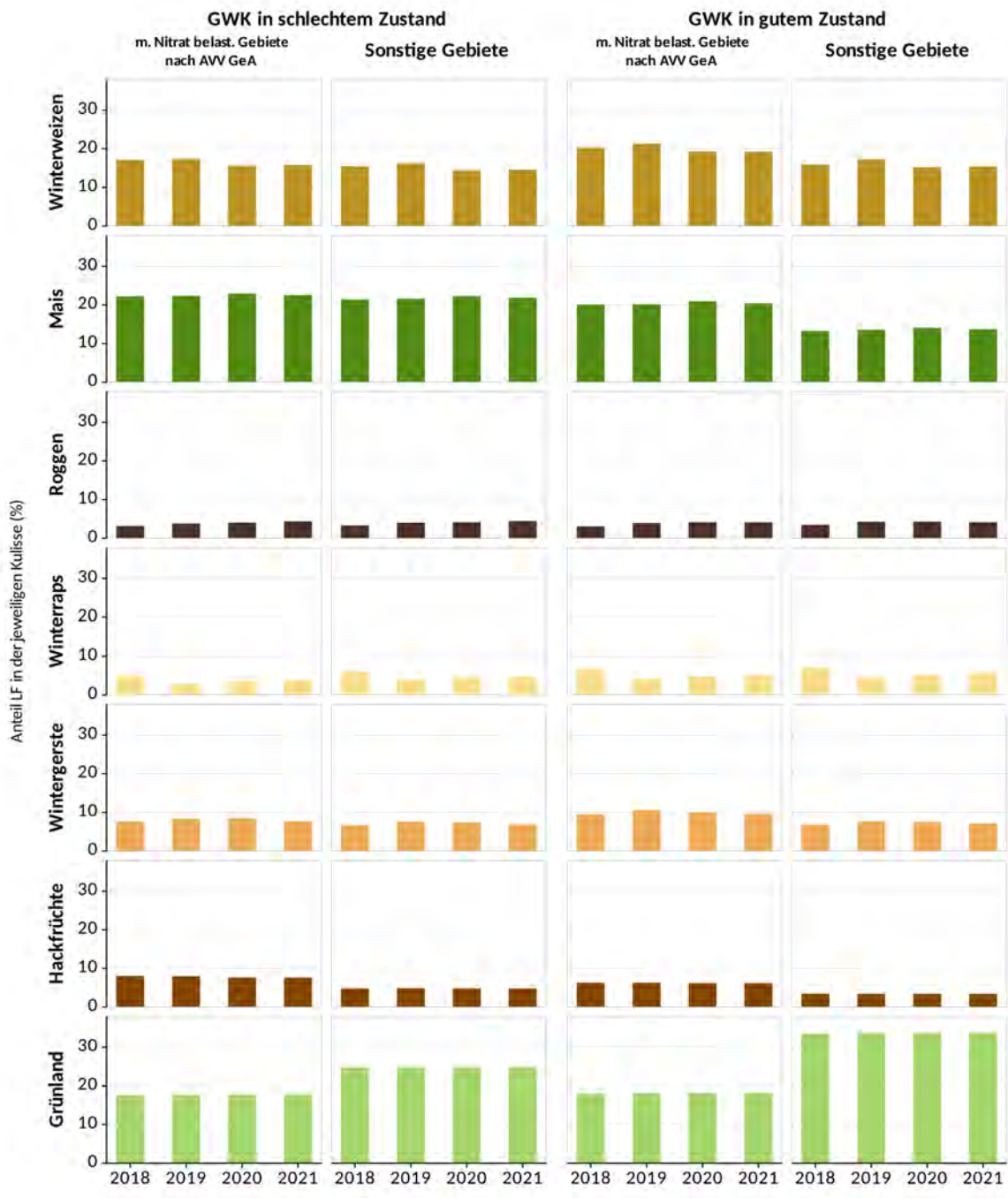


Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Hauptkulturarten an der LF der jeweiligen Kulisse.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquellen: Thünen-Institut auf Basis von InVeKoS-Daten. Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Saarland nicht enthalten. (LF = Landwirtschaftliche Fläche, GWK = Grundwasserkörper).

2.2.3 Ertragsentwicklung der Hauptkulturen

Zur Darstellung der Ertragsentwicklung wurden die Daten der Ernteberichterstattung auf der Kreisebene ausgewertet. Die dargestellten Kreiserträge sind die Daten mit der derzeit höchsten räumlichen Auflösung. Die erzielten Erträge der vergangenen Jahre sind gemäß DüV bei der Düngebedarfsermittlung für Stickstoff zur Ermittlung des voraussichtlichen Stickstoffbedarfs der Kulturen heranzuziehen. Damit hat das Ertragsniveau – neben dem kulturspezifischen N-Bedarf und der N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat – direkte Auswirkungen auf die Höhe der N-Düngung. Darüber hinaus werden Nährstoffe mit dem Erntegut von der Fläche abgefahren. Somit beeinflusst das Ertragsniveau auch die Stickstoffeffizienz und die Stickstoffüberschüsse.

Die Entwicklung der Kreiserträge der sieben flächenmäßig bedeutendsten Kulturen sind in Abbildung 11 dargestellt. Jahre mit flächendeckender Trockenheit, wie z. B. das Jahr 2018, führten zu erheblichen Ertragsausfällen über alle Kulturarten und den Großteil der Landkreise hinweg.

Im Jahr 2022 wurden bei Roggen (60 dt/ha), Wintergerste (74 dt/ha) und Winterraps (41 dt/ha) überdurchschnittliche Ernten erzielt, während Weizenerträge (76 dt/ha) im langjährigen Durchschnitt lagen (jeweils bezogen auf die Medianerträge). Erträge von Kartoffeln (-16 %), Silomais (-24 %) und Zuckerrüben (-13 %) brachen gegenüber der guten Ernte 2021 stark ein.

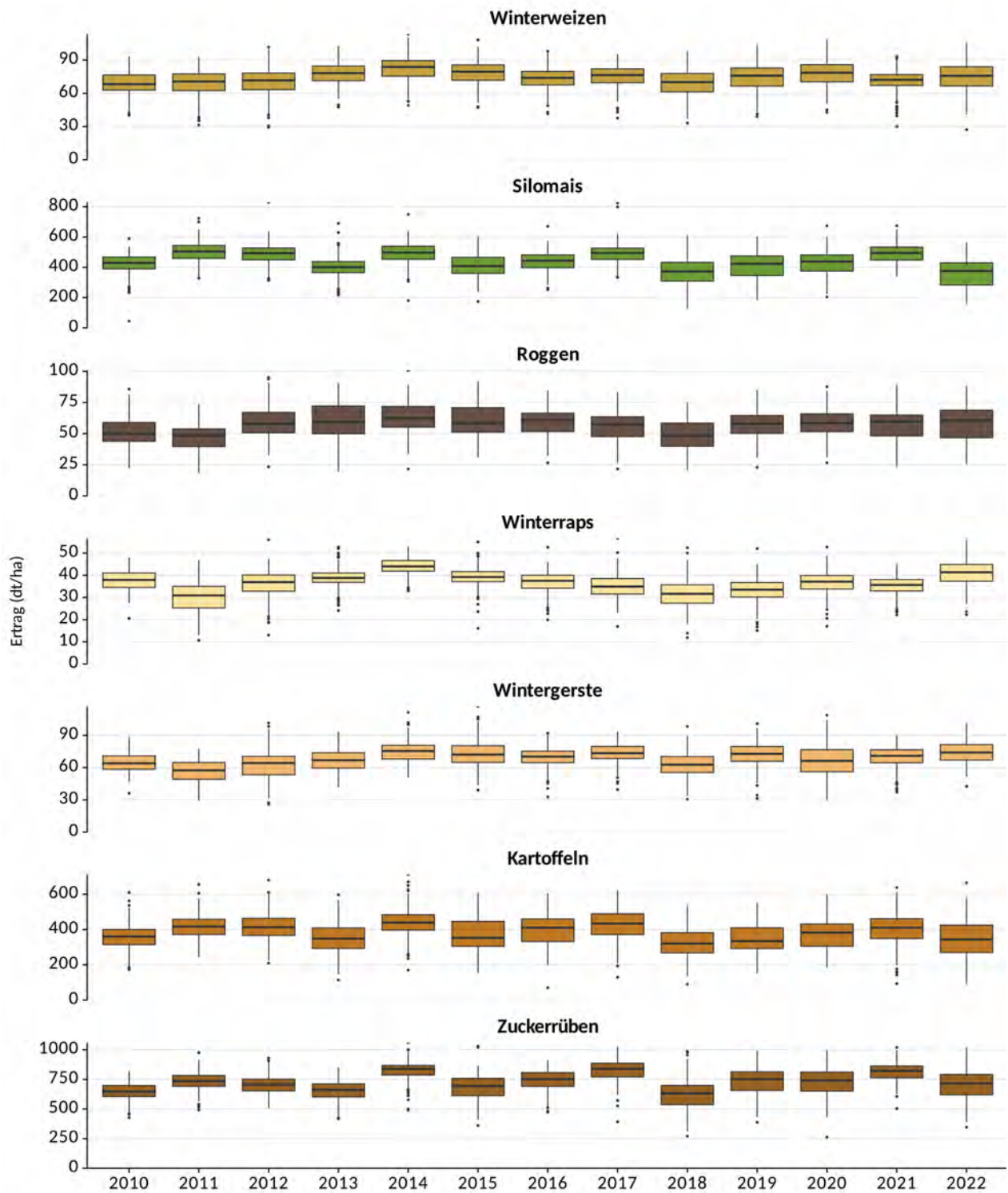


Abbildung 11: Ertragsentwicklung der Hauptkulturen seit 2010.

Anmerkung: Die Boxplots stellen die Verteilungen der erhobenen Kreiserträge dar. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Regionaldatenbank), letzter Zugriff am 06.10.2023; Datenlizenz by-2-0.

Räumlich dargestellt wird die regionale Heterogenität der Kreiserträge im Jahr 2022 deutlich (Abbildung 12, Karten auf der linken Seite). Es zeigt sich außerdem, dass die Erhebungsdaten, hier exemplarisch für Winterweizen und Silomais, teils weiträumige Lücken aufweisen (in den Karten in grau dargestellt). Die im rechten Teil der Abbildung 12 dargestellten relativen Abweichungen vom Mittelwert der vergangenen fünf Jahre bzw. der gesamten Zeitreihe ordnen die Erträge in das zeitliche Gesamtbild ein. Weizen und Silomais waren mit rund 3 Mio. ha bzw. 2 Mio. ha Anbauumfang 2022 die flächenmäßig bedeutendsten Ackerkulturen in Deutschland (DESTATIS, 2023). Die Winterweizenernte fiel im Jahr 2022 in weiten Teilen Deutschlands durchschnittlich bis gut aus, Ausnahmen bildeten Regionen in Mittel- und Ostdeutschland. Die Silomaisernte dagegen war bis auf wenige Ausnahmen im ganzen Bundesgebiet unterdurchschnittlich.

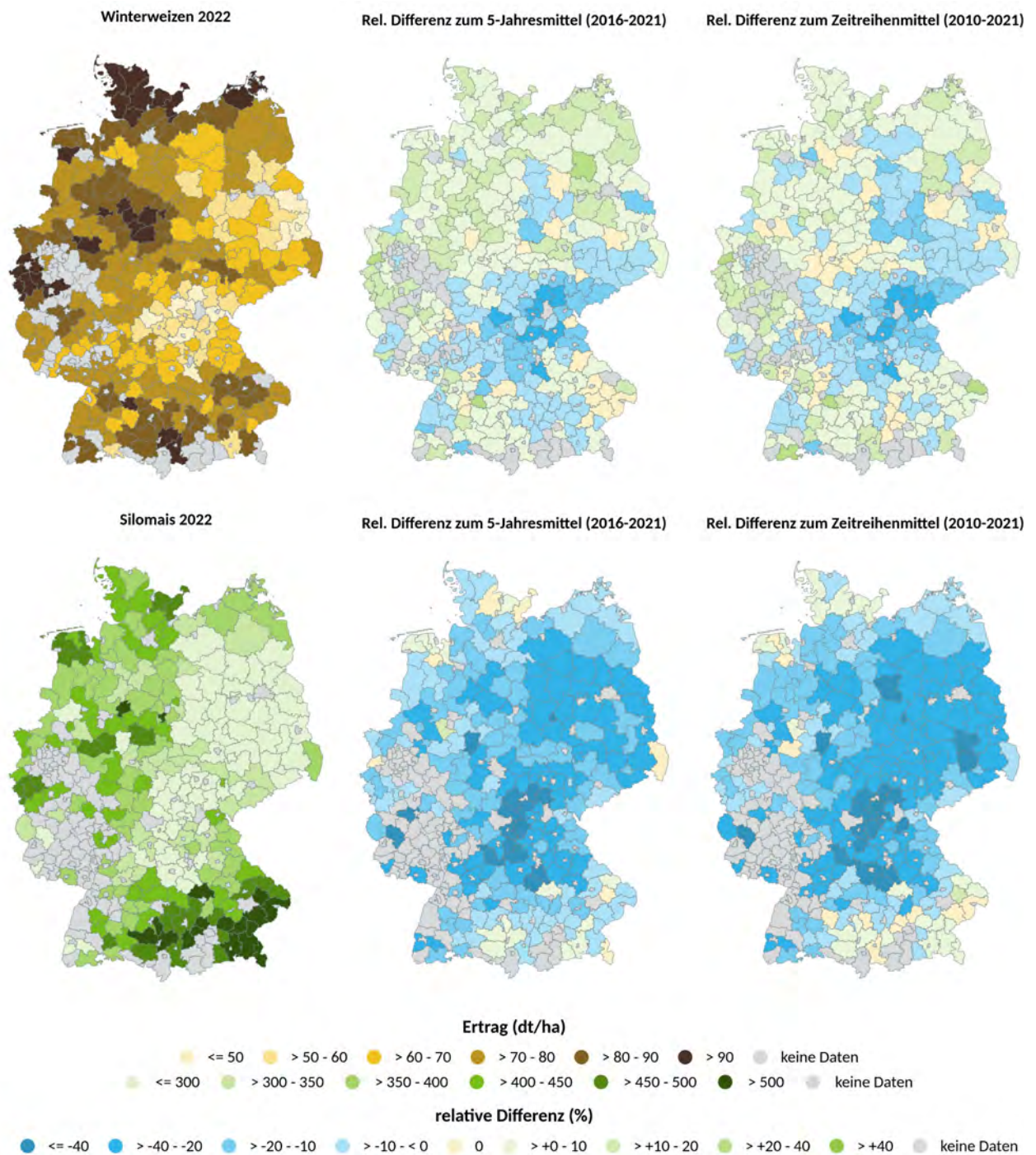


Abbildung 12: Kreiserträge für Winterweizen und Silomais mit prozentualer Abweichung zum Fünfjahresmittel und zum langjährigen Mittel.

Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Regionaldatenbank), letzter Zugriff am 06.10.2023; Datenlizenz by-2-0

2.3 Entwicklungen Phosphor

2.3.1 Flächenanteile eutrophierter (gelber) Gebiete

In diesem Berichtsteil wird in Zukunft die Veränderung der als eutrophiert ausgewiesenen Flächen dargestellt (Abbildung 13). In den eutrophierten Gebieten erlassen die Bundesländer Maßnahmen, die im Hinblick auf Phosphor über das Anforderungsniveau der übrigen Gebiete hinausgehen. So können beispielsweise die Düngung mit phosphorhaltigen Düngemitteln eingeschränkt oder Sperrfristen ausgedehnt werden. Die Flächenanteile der eutrophierten Gebiete sind nach Bundesländern in Tabelle 1 aufgeführt.



Abbildung 13: Eutrophierte Gebiete nach § 13a Düngeverordnung. Gebietsausweisung auf Grundlage der AVV GeA.

Anmerkung: In Bundesländern, die § 13a Absatz 5 Düngeverordnung anwenden, gelten die Anforderungen nach § 13a Absatz 3 Satz 3 Nummer 4 Düngeverordnung im gesamten Landesgebiet. NI hat neben der Anwendung von § 13a Absatz 5 Düngeverordnung für Fließgewässer eutrophierte Gebiete für Seen ausgewiesen. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquelle: Daten der Bundesländer, bereitgestellt durch Umweltbundesamt. Stand: März 2023.

Tabelle 2: Landwirtschaftlich genutzte Fläche in eutrophierten Gebieten nach Bundesländern. Auswertung auf Grundlage von ATKIS.

Bundesland	LF in eutrophierten Gebieten (ha)	LF gesamt (ha)	Anteil eutrophierter Gebiete an der LF (%)
Niedersachsen ¹	39.900	2.886.000	1
Nordrhein-Westfalen	261.000	1.689.000	15
Hessen	315.000	919.000	34
Rheinland-Pfalz	131.000	846.000	15
Baden-Württemberg	223.000	1.628.000	14
Bayern	1.016.000	3.547.000	29
Thüringen	313.000	881.000	36
Summe	2.300.000	18.750.000	12

Anmerkung: 1) nur für Seen. LF=Landwirtschaftlich genutzte Fläche. Quelle: Thünen-Institut.

In Deutschland wurden von den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Thüringen, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen (nur für Seen) eutrophierte Gebiete ausgewiesen. Demnach sind 12 % der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland als eutrophiertes Gebiet eingestuft. Die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein haben den § 13a Absatz 5 DüV in Anspruch genommen. In diesen Ländern gelten Anforderungen nach § 13a Absatz 3 Satz 4 Nummer 4 DüV für die gesamte Landesfläche. Niedersachsen nimmt für Fließgewässer ebenso den § 13a Absatz 5 DüV (2020) in Anspruch und hat zudem für Seen eutrophierte Gebiete für weitergehende Maßnahmen ausgewiesen. Die in den eutrophierten Gebieten geltenden Maßnahmen wurden im 1. Monitoringbericht vom Juni 2021 aufgeführt.

2.3.2 Bodenbedeckung

Die Bodenbedeckung ist, neben dem regionalen Niederschlagsgeschehen, der Hangneigung und -länge und der Bodenart, eine wichtige bewirtschaftungsabhängige Einflussgröße auf die potentiellen landwirtschaftlichen P-Einträge in die Oberflächengewässer. Als Maß für die Bedeckung des Bodens von Ackerland und Dauerkulturen wird der C-Faktor herangezogen. Der C-Faktor beschreibt das Bodenabtragspotenzial eines Bodens innerhalb der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) unter Berücksichtigung der Bodenbedeckung und der Bodenbearbeitung (Renard et al., 1997). Damit reflektiert der C-Faktor den bewirtschaftungsbedingten Beitrag der Landwirtschaft zum Erosionsgeschehen bzw. zur Erosionsminderung. Der C-Faktor wurde auf Grundlage der InVeKoS-Daten für diejenigen Bundesländer abgeleitet, für die Daten aus vier aufeinanderfolgenden Jahren in der Bundesdatenbank verfügbar sind (siehe Anhang / Kapitel 7.1.2). Die räumliche Verteilung ist in Abbildung 14 dargestellt. Erhöhte Bodenabtragspotenziale finden sich in Regionen mit hohem Anteil an Mais, Hackfrüchten (Kartoffeln, Zuckerrüben) oder Dauerkulturen (Hopfen, Wein). Daraus ergibt sich, dass große Teile Norddeutschlands und der Mittelrhein durch hohe C-Faktoren charakterisiert sind.

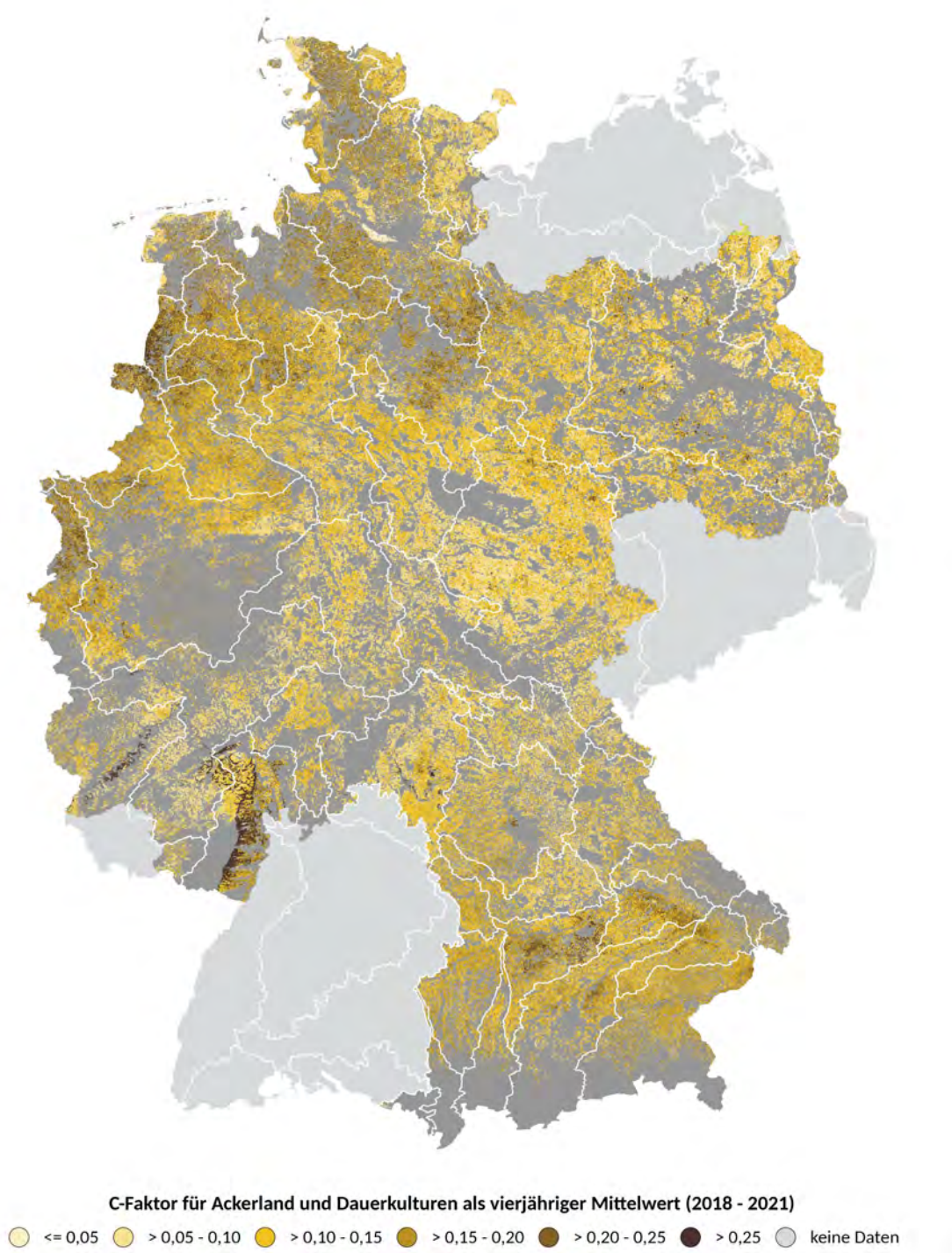


Abbildung 14: C-Faktor auf Rasterbasis ($100\text{ m} \times 100\text{ m}$) für Ackerland und Dauerkulturen, vierjähriges Mittel (2018–2021).

Anmerkung: Geringe C-Faktoren entsprechen einem geringen bewirtschaftungsbedingtem Erosionspotenzial. Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Saarland sind nicht enthalten. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquellen: Thünen-Institut auf Basis von InVeKoS-Daten.

Die Entwicklung der Bodenbedeckung in den eutrophierten und den sonstigen Gebieten ist in Abbildung 15 anhand von Häufigkeitsverteilungen des C-Faktors in Form von Violinen-Plots dargestellt (die Linien repräsentieren die Dichte der Verteilung; breitere Bereiche zeigen eine größere Häufung der Werte an). Die Mediane der C-Faktoren in den eutrophierten Gebieten unterscheiden sich nicht wesentlich von den restlichen Gebieten. Entwicklungstendenzen sind aufgrund der wenigen betrachteten Jahre noch nicht feststellbar. Es wird angestrebt, auf dieser Grundlage in Zukunft Trends und belastbare Aussagen zur Entwicklung der Bodenbedeckung abzuleiten.

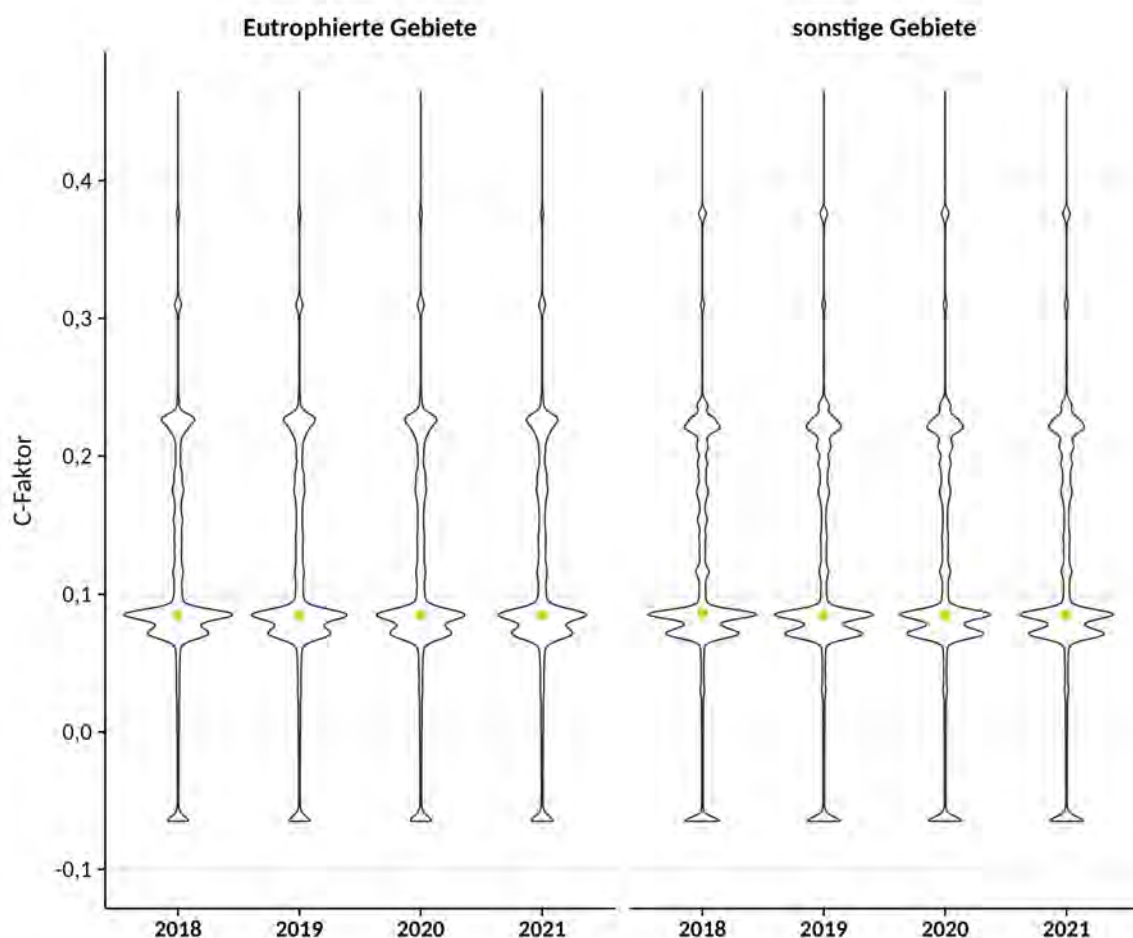


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der C-Faktorwerte auf Rasterbasis (100 m × 100 m) im Zeitverlauf nach eutrophierten und sonstigen Gebieten.

Anmerkung: Die gelben Punkte markieren die Mediane. Bundesländer, in denen § 13a Absatz 5 Düngeverordnung zur Anwendung kommt, sind in den sonstigen Gebieten enthalten. Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Saarland sind nicht enthalten. Darstellung: Thünen-Institut. Datenquellen: Thünen-Institut auf Basis von InVeKoS-Daten.

3 Zweite Monitoringebene: Immissionsdaten der Gewässer

3.1 Grundwasser

Im Rahmen der Umsetzung des Wirkungsmonitorings kommt der Dokumentation der Entwicklung des Grundwasserzustands eine zentrale Bedeutung zu. Ziel ist es, nicht nur die langfristige Entwicklung der Belastungssituation zu dokumentieren, sondern auch einen Zusammenhang zu den landwirtschaftlichen Emissionen herzustellen, um zielgerichtete Minderungsmaßnahmen vornehmen zu können. Dafür ist eine gute Datenbasis notwendig, wobei gemäß Feinkonzept zum Wirkungsmonitoring mindestens alle landwirtschaftlich beeinflussten Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes nach § 4 Abs 1, Nr. 1 bis 3 AVV-GeA zur Dokumentation des Grundwasserzustands berücksichtigt werden sollen. Gemäß Feinkonzept sollen die für die Berichterstattung zum Wirkungsmonitoring verwendeten Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes zusätzlich auch für die Berichterstattungen zur EU-Nitratrichtlinie verwendet werden. Im Rahmen des im Juni 2023 eingestellten Vertragsverletzungsverfahrens zur EU-Nitratrichtlinie hatte Deutschland gegenüber der EU-Kommission zugesagt, die für die Beschreibung der Nitratbelastung des Grundwassers für die Berichterstattung der EU-Nitratrichtlinie verwendeten Messstellen deutlich zu erweitern.

Zur Beschreibung der Nitratkonzentration des Grundwassers wurden für diesen Bericht Daten von zwei unterschiedlichen Messnetzen mit Stand März 2023 ausgewertet und in zwei separaten Abschnitten dargestellt: Erstens Daten von Messstellen des bisher verwendeten EU-Nitratmessnetzes (Kapitel 3.1.1). Das EU-Nitratmessnetz wurde bisher in den Berichten zum Wirkungsmonitoring und den Berichterstattungen Deutschlands zur EU-Nitratrichtlinie für die Auswertungen zur Nitratbelastung des Grundwassers herangezogen. Im hier vorliegenden Bericht erstreckt sich der Auswertungszeitraum für die Daten des EU-Nitratmessnetzes über die Jahre 2012–2022 und umfasste 620 Messstellen, für die mindestens jährliche Daten vorlagen (Tabelle 1). Die Auswertung des EU-Nitratmessnetzes wird hier letztmalig zu Vergleichszwecken und zur Trendermittlung nochmals aufgeführt und wird zukünftig nicht mehr betrachtet werden.

Zweitens wurden in Kapitel 3.1.2 Daten ausgewählter Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes nach § 4 Abs 1, Nr. 1 bis 3 AVV-GeA für den Zeitraum 2020–2022 ausgewertet. Das AVV-Ausweisungsmessnetz dient in erster Linie als Datengrundlage für die Ausweisung von mit Nitrat belasteten Gebieten (siehe Kapitel 3.1.3) und umfasst mehr als 10.000 Messstellen. Für die Dokumentation der Nitratbelastung des Grundwassers wurden in Kapitel 3.1.2 die Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes verwendet, für die staatlich erhobene Messdaten vorlagen. Damit standen für den betrachteten Zeitraum 2020–2022 mehr als 7.000 Messstellen zur Verfügung, für die jeweils mindestens ein gültiger Messwert pro Jahr vorlag. Für mehr als 90 % dieser Messstellen lagen zusätzlich auch Informationen zur Landnutzung (Kategorien: Landwirtschaft, Siedlung, Wald) vor (Tabelle 1). Diese Messstellen dienen – aufgrund der im Vergleich zum EU-Nitratmessnetz wesentlich größeren Messstellenanzahl – der Differenzierung der Belastungssituation innerhalb der mit Nitrat belasteten Grundwasserkörper.

In Kapitel 3.1.2 erfolgt ein erster Einblick in die Daten des AVV-Ausweisungsmessnetzes. Dabei ist zu beachten, dass die hier dargestellten Auswertungen keine Flächen- bzw. Nutzungsrepräsentativität anstreben, sondern dazu bestimmt sind, einen Überblick zur aktuellen Datenlage zu vermitteln. Die Messstellen des AVV-Messnetzes sind jedoch innerhalb der mit Nitrat belasteten GWK bzw. Teilgebiete repräsentativ, um die räumliche Differenzierung innerhalb der belasteten Gebiete abzubilden. Im Vergleich zum EU-Nitratmessnetz ist an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes im Mittel mit einer geringeren Nitratbelastung zu rechnen, da Messstellen mit Siedlungs- oder Waldeinfluss in der Regel geringere Nitratkonzentrationen aufweisen als solche mit landwirtschaftlichem Nutzungseinfluss. Darüber hinaus ist die Nitratkonzentration nicht nur durch den Nutzungseinfluss bedingt, sondern auch durch Denitrifikation, die mit der Tiefe der Filterstellung zunimmt.

Tabelle 3: Anzahl und Landnutzungsverteilung der für den vorliegenden Bericht in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 herangezogenen Messstellen des EU-Nitratmessnetzes (2012–2022) sowie Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes (2020–2022), für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.

Messnetz	Betrachteter Zeitraum	Anzahl Messstellen mit vollständiger Messreihe	Anteil Messstellen mit Landnutzungs-information [%]	Anteil Messstellen mit überwiegender Land-nutzung [%]		
				Landwirt-schaft	Siedlung	Wald
EU-Nitrat	2012–2022	620	100	100	0	0
Staatliche Messdaten AVV-Messnetz	2020–2022	7065	93.1	65.3	15.8	18.9

Quelle: Umweltbundesamt.

3.1.1 Analyse der Nitratbelastung an Messstellen des EU-Nitratmessnetzes

Die Auswertung der 620 Messstellen mit vollständiger Messreihe des EU-Nitratmessnetzes zeigt eine leichte aber kontinuierliche Verbesserung der Nitratbelastung des Grundwassers über die vergangenen elf Jahren (Abbildung 1). Wiesen 2012 noch 29,6 % aller Messstellen mittlere Nitratkonzentrationen von über 50 mg/L auf, so waren es 2022 noch 24,9 %. Entsprechend stieg der Anteil an Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat im Grundwasser einhielten, von 68,9 % im Jahr 2012 auf 72,9 % im Jahr 2022 an. Der Anteil an Messstellen mit einer Nitratkonzentration

zwischen 37,5 mg/L und 50 mg/L und einem steigenden Trend (Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0,1$) schwankte im betrachteten Zeitraum zwischen 1,4 und 2,2 %.

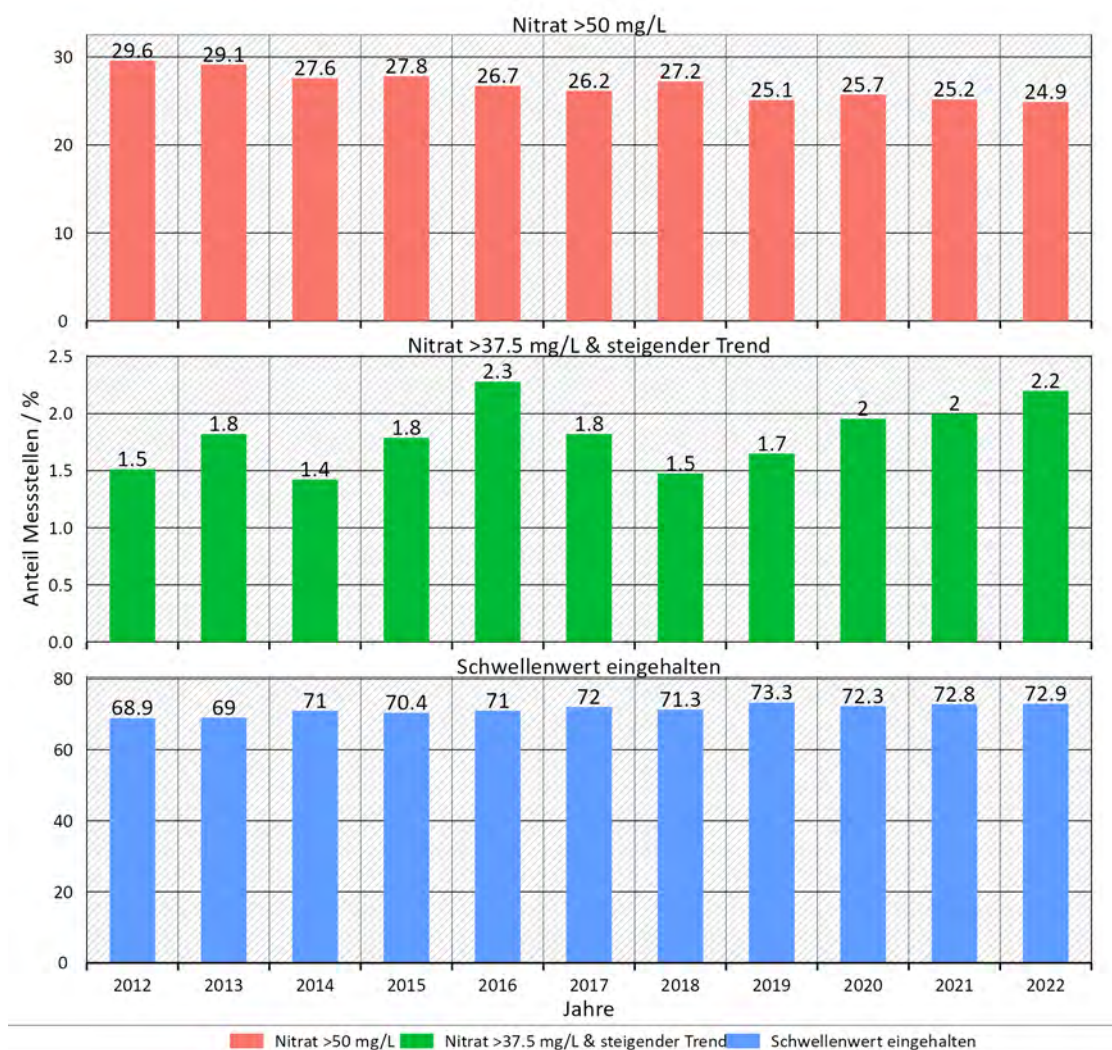


Abbildung 16: Nitratbelastung an den 620 Messstellen des EU-Nitratmessnetzes mit vollständiger Messreihe für den Zeitraum 2012 bis 2022.

Anmerkung: Dargestellt ist der relative Anteil Messstellen für drei verschiedene Konzentrationsklassen: 1) Nitratkonzentration > 50 mg/L (rot); 2) Nitratkonzentration > 37,5 mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigender Trend [Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0,1$] (grün); 3); alle übrigen Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat gemäß Grundwasser-Richtlinie einhalten (blau). Quelle: Umweltbundesamt.

Die seit 2012 beobachtete, leichte Verbesserung der Belastungssituation an den Messstellen des EU-Nitratmessnetzes mit vollständiger Messreihe (Abbildung 1) spiegelt sich nicht in den mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen an diesen Messstellen wider (Abbildung 16). Messstellen mit Nitratkonzentrationen > 50 mg/L wiesen im betrachteten Zeitraum mittlere Konzentrationen zwischen 94,7 mg/L und 103,2 mg/L auf. Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat im Grund-

wasser einhielten, wiesen Konzentrationen zwischen 14,6 mg/L und 16,6 mg/L auf. In beiden Fällen kann keine Tendenz der mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen im angegebenen Zeitraum beobachtet werden. Für Messstellen mit Nitratkonzentrationen $> 37,5$ mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigendem Trend ist aufgrund der engen Klassengrenzen von vornherein mit nur geringfügigen Änderungen der mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen zu rechnen.

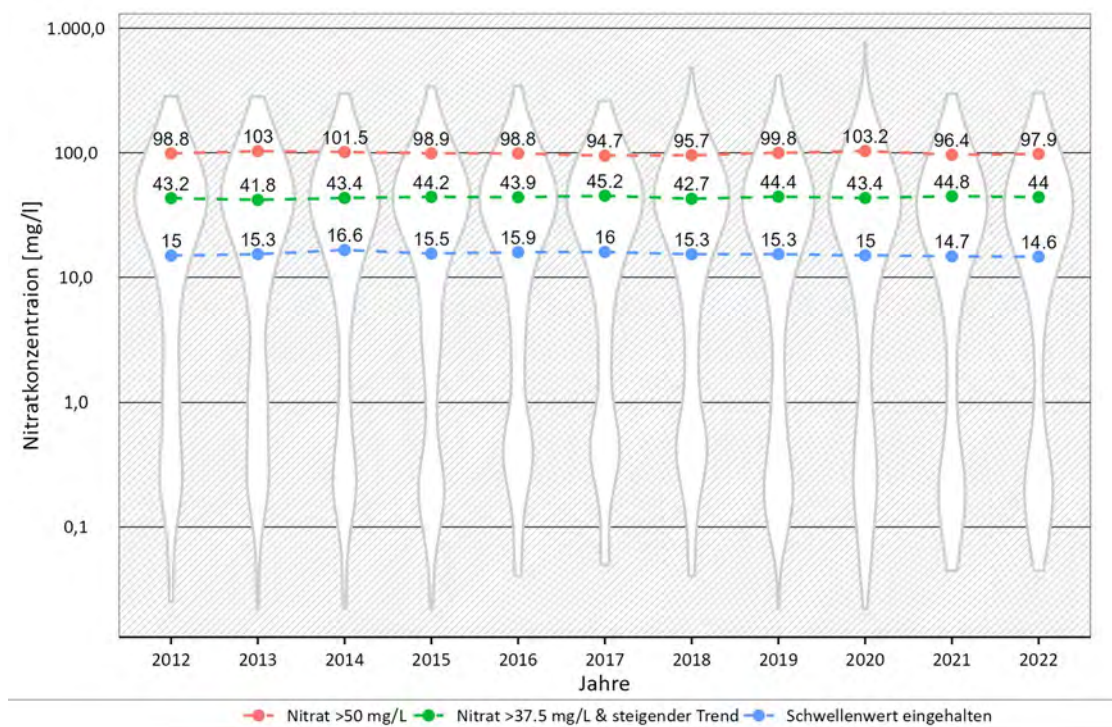


Abbildung 17: Nitratbelastung an den 620 Messstellen des EU-Nitratmessnetzes mit vollständiger Messreihe für den Zeitraum 2012 bis 2022.

Anmerkung: Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte und die mittleren Nitratkonzentrationen für drei verschiedene Konzentrationsklassen: 1) Nitratkonzentration > 50 mg/L (rot); 2) Nitratkonzentration > 37.5 mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigender Trend [Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0.1$] (grün); 3) alle übrigen Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat gemäß Grundwasser-Richtlinie einhalten (blau). Die mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen sind für jede Konzentrationsklasse gesondert angegeben. Die Verteilung der Messwerte eines jeden Jahres wird durch die weiß schraffierten Violinen dargestellt. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der y-Achse. Quelle: Umweltbundesamt.

3.1.2 Analyse der Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes

Im Folgenden werden die gemessenen Nitratkonzentrationen im Zeitraum 2020–2022 der Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes, für die staatliche Messdaten vorlagen, dargestellt. Dabei blieb die Denitrifikation im Grundwasser noch unberücksichtigt. In einigen Bundesländern lagen zu

diesem Zeitpunkt bereits Untersuchungen zur Denitrifikation an diesen Messstellen vor und wurden in die Gebietsausweisungen (Binnendifferenzierung in den belasteten Grundwasserkörpern) einbezogen. Da die AVV GeA 2022 die Berücksichtigung der Denitrifikation anfordert, müssen die bisherigen Angaben zu der anhand von Nitrat bestimmten Belastungssituation mit Vorsicht betrachtet werden. Zukünftig wird die Nitratbelastung unter Einbezug des denitrifizierten Anteils ermittelt und dargestellt werden. Dies wird perspektivisch zu einem vorläufigen Zuwachs an Schwellenwertüberschreitungen und einer Zunahme der ermittelten Konzentrationsniveaus (Nitrat + Exzess-N₂ – Nitrat) führen. Von 2020–2022 wurde an 84,5 % der hier ausgewerteten Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetz (Anzahl Messstellen: 7.065) der Schwellenwert für Nitrat eingehalten).

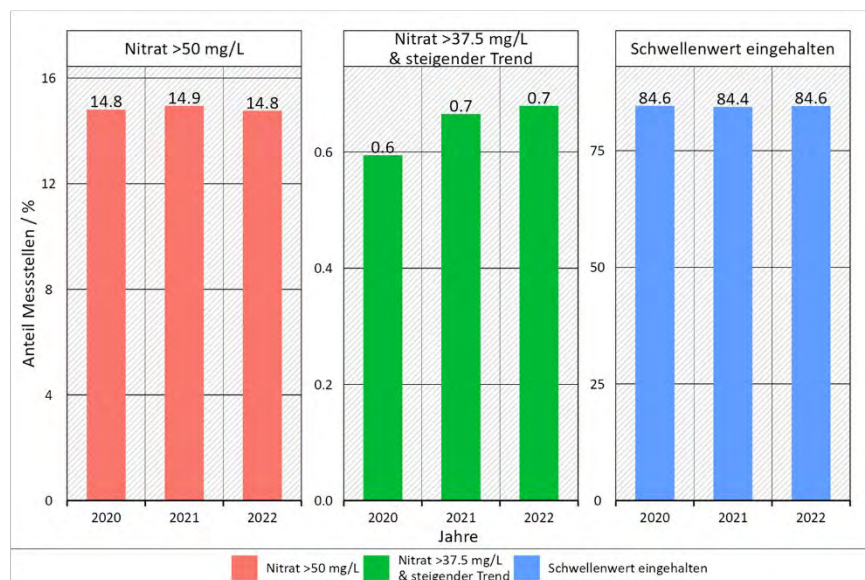
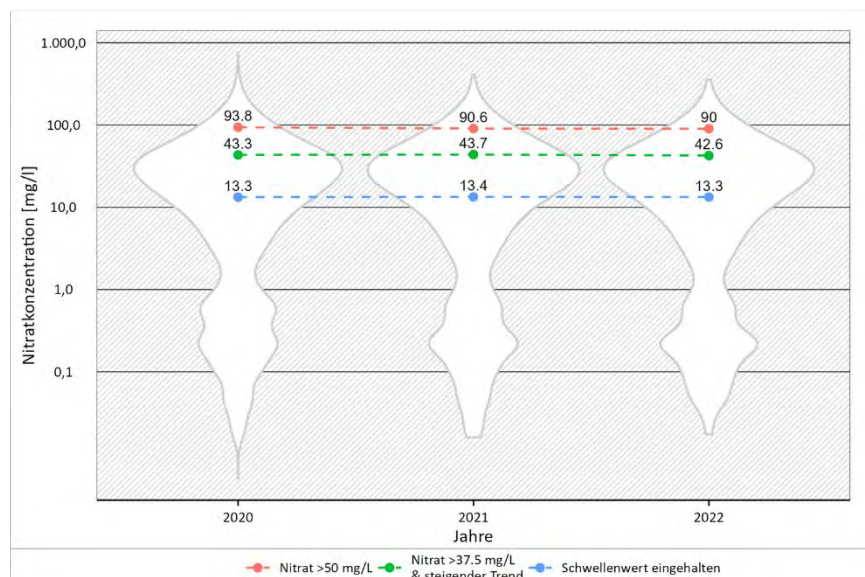
a**b**

Abbildung 18: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.

Anmerkung: Dargestellt sind relative Anteile Messstellen (a) sowie die Verteilung der Messwerte und die mittleren Nitratkonzentrationen (b) für drei verschiedene Konzentrationsklassen: 1) Nitratkonzentration > 50 mg/L (rot); 2) Nitratkonzentration $> 37,5$ mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigender Trend [Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0,1$] (grün); 3) alle übrigen Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat gemäß Grundwasser-Richtlinie einhalten (blau). Die mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen sind für jede Konzentrationsklasse gesondert angegeben. Die Verteilung der Messwerte eines jeden Jahres wird durch die weiß schraffierten Violinen dargestellt. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der y-Achse. Quelle: Umweltbundesamt.

An diesen Messstellen lag die mittlere Nitratkonzentration bei rund 13 mg/L (Abbildung 17b). An rund 15 % der Messstellen traten Nitratkonzentrationen größer 50 mg/l auf (Abbildung 17a). Im Mittel lag die Nitratkonzentration an diesen Messstellen bei rund 90 mg/L (Abbildung 17b). Der Anteil Messstellen mit mittleren Nitratkonzentrationen zwischen 37.5 mg/L und 50 mg/L mit steigendem Trend (Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0.1$) trat an weniger als 1 % der Messstellen auf (Abbildung 17a). Insgesamt konnte weder eine fallende noch eine steigende Tendenz der Nitratbelastung ausgemacht werden.

Werden die Landnutzungsinformationen der Messstellen in die Auswertung einbezogen (Abbildung 19), zeigt sich, dass Messstellen mit landwirtschaftlichem Nutzungseinfluss wesentlich häufiger Nitratkonzentrationen > 50 mg/L aufweisen als solche mit Siedlungs- oder Waldeinfluss. Der Anteil an Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat überschreiten, ist für Messstellen mit landwirtschaftlichem Nutzungseinfluss fast fünfmal höher als für solche mit Siedlungs- oder Waldeinfluss. 6,9 % aller gemeinsamen Messstellen, für die keine Landnutzungsinformation vorlag (Tabelle 1), weisen hohe Überschreitungshäufigkeiten für Nitrat auf.

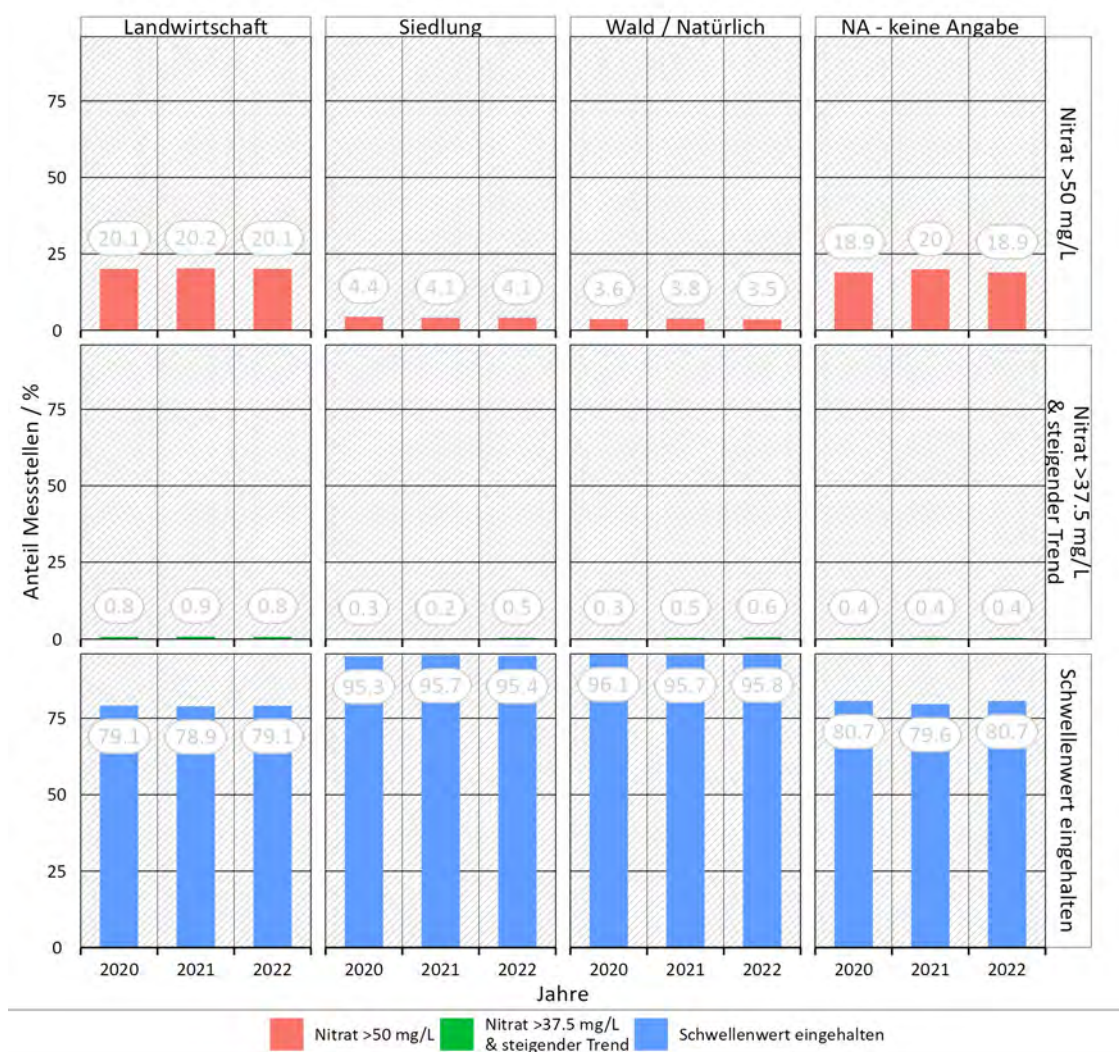


Abbildung 19: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen. Nur die Messstellen mit vollständiger Messreihe wurden berücksichtigt.

Anmerkung: Dargestellt ist der relative Anteil Messstellen in Abhängigkeit der Landnutzung (Landwirtschaft, Siedlung, Wald / Natürlich, NA – keine Angabe) für drei verschiedene Konzentrationsklassen: 1) Nitratkonzentration > 50 mg/L (rot); 2) Nitratkonzentration > 37.5 mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigender Trend [Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0.1$] (grün); 3) alle übrigen Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat gemäß Grundwasser-Richtlinie einhalten (blau).
 Quelle: Umweltbundesamt.

Bei einem Vergleich der Verteilung der Nitratkonzentrationen mit den durchschnittlichen Jahresmittelkonzentrationen zwischen den verschiedenen Landnutzungskategorien (Abbildung 19) bestätigt sich das zuvor gezeichnete Bild: Messstellen mit landwirtschaftlichem Nutzungseinfluss waren stärker mit Nitrat belastet als Messstellen mit Siedlungs- oder Waldeinfluss. Dies zeigte sich insbesondere an der Häufigkeit und Höhe der Schwellenwertüberschreitungen, wobei die durchschnittlichen Jahresmittelkonzentrationen an Messstellen mit Waldeinfluss (8,6–8,8 mg/L) nur halb so hoch

waren wie die an landwirtschaftlich beeinflussten Messstellen (15,1–15,2 mg/L). Insgesamt waren in dem betrachteten kurzen Zeitraum keine Trends der Nitratkonzentration in den einzelnen Landnutzungskategorien ableitbar. Bei Betrachtung der messstellenscharfen Darstellung der mittleren Nitratkonzentrationen im Zeitraum 2020–2022 (Abbildung 1) wird deutlich, dass die hier ausgewerteten Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes aufgrund der unterschiedlichen Dichte und Verteilung der mit Nitrat belasteten Gebiete, innerhalb derer eine immissionsbasierte Binnendifferenzierung geboten ist, sehr unterschiedlich dicht im Bundesgebiet verteilt sind.

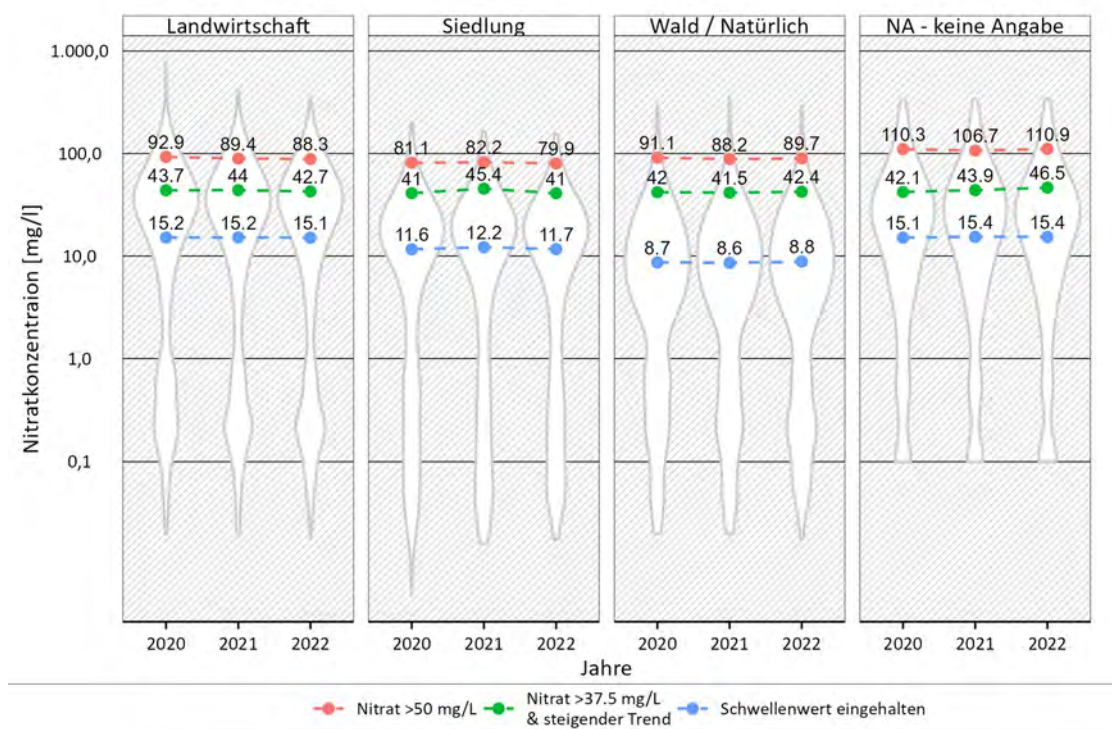


Abbildung 20: Nitratbelastung an Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022, für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.

Anmerkung: Dargestellt ist die Verteilung der Nitratkonzentration in Abhängigkeit der Landnutzung (Land-wirtschaft, Siedlung, Wald / Natürlich, NA – keine Angabe) für drei verschiedene Konzentrationsklassen: 1) Nitratkonzentration > 50 mg/L (rot); 2) Nitratkonzentration > 37.5 mg/L und ≤ 50 mg/L und signifikant steigender Trend [Mann-Kendall-Trendtest, einseitig, $p < 0.1$] (grün); 3) alle übrigen Messstellen, die den Schwellenwert für Nitrat gemäß Grundwasser-Richtlinie einhalten (blau). Die mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen sind für jede Konzentrationsklasse gesondert angegeben. Die Verteilung der Messwerte eines jeden Jahres wird durch die weiß schraffierten Violinen dargestellt. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der y-Achse. Quelle: Umweltbundesamt.

Die Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetz zeigen folgende räumliche Muster:

- Nitratkonzentrationen > 50 mg/l waren in fast allen Regionen Deutschlands anzutreffen. Eine Ausnahme bilden die Alpen und das Alpenvorland sowie der Schwarzwald. Diese Regionen weisen hohe Grünlandanteile an den landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie hohe Rinderbestände (siehe Abbildung 4) auf, aber werden nur in geringem Umfang ackerbaulich genutzt. Sie sind darüber hinaus durch hohe Niederschläge gekennzeichnet. Der hohe Grünlandanteil, die hohen Niederschläge und die geringe ackerbauliche Nutzung tragen zu einer geringeren Nitratbelastung bei.
- Niedrige Nitratkonzentrationen traten besonders häufig im Norddeutschen Tiefland auf. Dieses generelle Muster wird unter anderem durch die vorliegenden Redoxbedingungen im Aquifer gesteuert: Im Norddeutschen Tiefland liegen häufig reduzierende Bedingungen im Boden und im Grundwasserleiter vor, die Voraussetzung für einen Nitratabbau mittels Denitrifikation sind – und in der Folge zu niedrigen Nitratkonzentrationen führen können. Dieser Aspekt wird sich künftig klarer belegen lassen und gegebenenfalls zu einer anderen Einstufung der Nitratbelastung führen, sobald Daten zur Denitrifikation vorliegen und in die Darstellungen einbezogen werden.
- Grenzwertüberschreitungen traten vermehrt in solchen Regionen auf, die durch intensive landwirtschaftliche Nutzung, z. B. Ackerbau in Verbindung mit intensiver Viehhaltung, Biogas oder Gemüseanbau, gekennzeichnet sind.

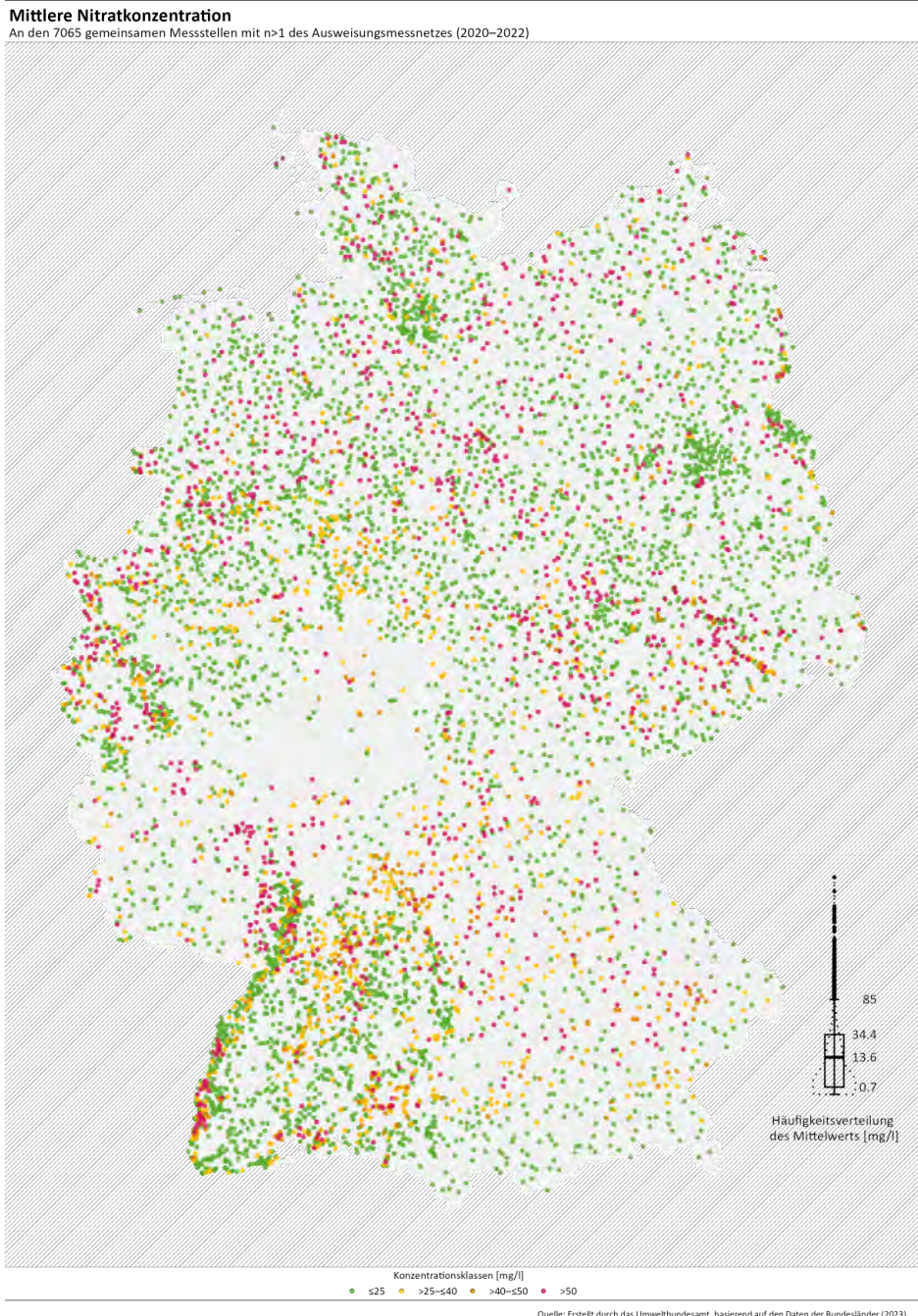


Abbildung 21: Karte der mittleren Nitratkonzentrationen für die 7.065 Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes für die Jahre 2020–2022 für die staatliche Messdaten und eine vollständige Messreihe vorlagen.

Anmerkung: Daten klassifiziert nach vier Konzentrationsklassen: (1) NO_3 -Konzentration $\leq 25 \text{ mg/l}$, (2) NO_3 -Konzentration $> 25 \text{ mg/l} - \leq 40 \text{ mg/l}$, (3) NO_3 -Konzentration $> 40 \text{ mg/l} - \leq 50 \text{ mg/l}$, (4) NO_3 -Konzentration $> 50 \text{ mg/l}$. Angegeben ist auch die Häufigkeitsverteilung der mittleren Nitratkonzentrationen aller Messstellen sowie die Äquivalentkonzentration der oberen und unteren Quartilgrenzen, des Medians sowie der oberen Antenne (oberes Quartil + $1.5 \cdot$ Interquartilabstand) für den Zeitraum 2020–2022. Quelle: Umweltbundesamt.

3.1.3 Ausweisung von mit Nitrat belasteten Gebieten

Die Ausweisung von Gebieten nach Nitratrichtlinie („Nitrate Vulnerable Zones – NVZ“) hat zum Ziel, Regionen mit besonders hohen Nitratkonzentrationen im Grundwasser von weniger stark belasteten Regionen abzugrenzen und eine Verringerung der Nitratbelastung zu erreichen. Deutschland hatte bisher gem. Artikel 3 Absatz 5 Nitratrichtlinie keine NVZ ausgewiesen, da das Aktionsprogramm gem. Artikel 5 Nitratrichtlinie auf dem gesamten Bundesgebiet angewendet wird. Umfangreiche Änderungen des Düngerechts seit 2020 erlauben in Deutschland die Ausweisung von mit Nitrat belasteten Gebieten, verbunden mit strengeren Bewirtschaftungsauflagen für landwirtschaftlich genutzte Flächen im Vergleich zu übrigen Gebieten. Die erhöhten Auflagen sind in § 13a der Düngeverordnung und in den Länderverordnungen festgeschrieben (siehe Kapitel 2.2.1). Grundlage für die Ausweisung der Gebiete bildet die AVV GeA vom 10.08.2022. Demnach hat in Deutschland für das Grundwasser eine immissionsbasierte Abgrenzung von belasteten und unbelasteten Gebieten auf Basis der gemessenen Nitratkonzentration unter Verwendung eines deterministischen (übergangsweise) bzw. geostatistischen Regionalisierungsverfahrens zu erfolgen. Die AVV GeA legt zudem an die für die Ausweisung zu verwendenden Messstellen und die an sie gestellten Anforderungen fest. Danach umfasst das AVV-Ausweisungsmessnetz mindestens alle landwirtschaftlich beeinflussten Messstellen des Wasserrahmenrichtlinien-Messnetzes, des EUA-Messnetzes sowie des EU-Nitratmessnetzes (vgl. § 4 Abs 1, Nr. 1 bis 3 AVV-GeA vom 10.08.2022). Die aktuell gültigen, mit Nitrat belasteten Gebiete sind in Kapitel 2.2, Abbildung 1 dargestellt.

3.2 Fließgewässer

Dieses Kapitel umfasst die Beurteilung der Entwicklung von Phosphorkonzentrationen und der biologischen Qualitätskomponenten Makrophyten und Phytobenthos sowie – falls relevant – Phytoplankton in Fließgewässern getrennt für zwei Messnetze.

Messnetzkonzeption

Neben den Messstellen des bisherigen Messnetzes des Nitratberichts (repräsentatives Messnetz, überblicksweise Überwachung) werden zukünftig die Untersuchungsergebnisse zusätzlicher Messstellen für den Bericht zum Wirkungsmonitoring berücksichtigt. Durch Einbindung dieser Messstellen, die in der Regel für die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie eingerichtet worden sind, werden Synergien genutzt. Das entspricht den Bestrebungen der EU-Kommission, ihre Richtlinien stärker zu verknüpfen (vgl. EU Action Plan: „Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil“). Für eine detailliertere Beschreibung wird auf den 3. Monitoringbericht 2022 verwiesen.

Indikatoren

Beurteilt werden Monitoringergebnisse der überwachten Messstellen. Diese spiegeln die örtliche Situation wider. Der Indikator gibt die Gewässersituation wider und ist noch kein Hinweis auf die Belastungsursache. Eine Eutrophierung kann also durch landwirtschaftliche Belastungen, aber auch

durch andere Quellen verursacht sein. Eine als eutroph eingestufte Messstelle des repräsentativen Messnetzes muss daher nicht zwangsläufig in einem eutrophierten Gebiet nach § 13a DüV liegen. Für die Ausweisung eutrophierter Gebiete werden zudem nicht nur Monitoringergebnisse an Messstellen, sondern auch die Situation in Einzugsgebieten von Wasserkörpern betrachtet. Wenn die Landwirtschaft eine wesentliche Ursache für die Nährstoffbelastung darstellt, kann das (Teil-)Einzugsgebiet als eutrophiertes Gebiet im Sinne der DüV ausgewiesen werden (siehe Kapitel 2.3.1).

Für die beiden Messnetze (repräsentative und zusätzliche Messstellen) erfolgt jeweils eine getrennte Darstellung der Ergebnisse.

3.2.1 Phosphorkonzentration in Fließgewässern

Für die Messstellen des repräsentativen Messnetzes werden die Phosphorkonzentrationen der Messstellen im gleitenden Mittel entsprechend den Anforderungen der Anlage 7 OGewV eingestuft (Tabelle 1).

Tabelle 4: Einstufung der mittleren Phosphorkonzentrationen nach Anlage 7 OGewV

Farbe	Einstufung	Kriterium
	sehr gut	Anforderungen an den sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial erreicht (Absatz 1.1.2)
	gut	Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial erreicht (Absatz 2.1.2)
	schlechter als gut	Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial nicht erreicht

Quelle: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).

Der Indikator „Phosphor-Konzentration in Fließgewässern“ für die Berichterstattung nach Nitratrichtlinie wird jährlich berechnet (Abbildung 1). An 14 % der repräsentativen Messstellen wird 2019–2021 die Klasse „sehr gut“ erreicht, 39 % sind als „gut“ einzustufen und 47 % als „schlechter als gut“.

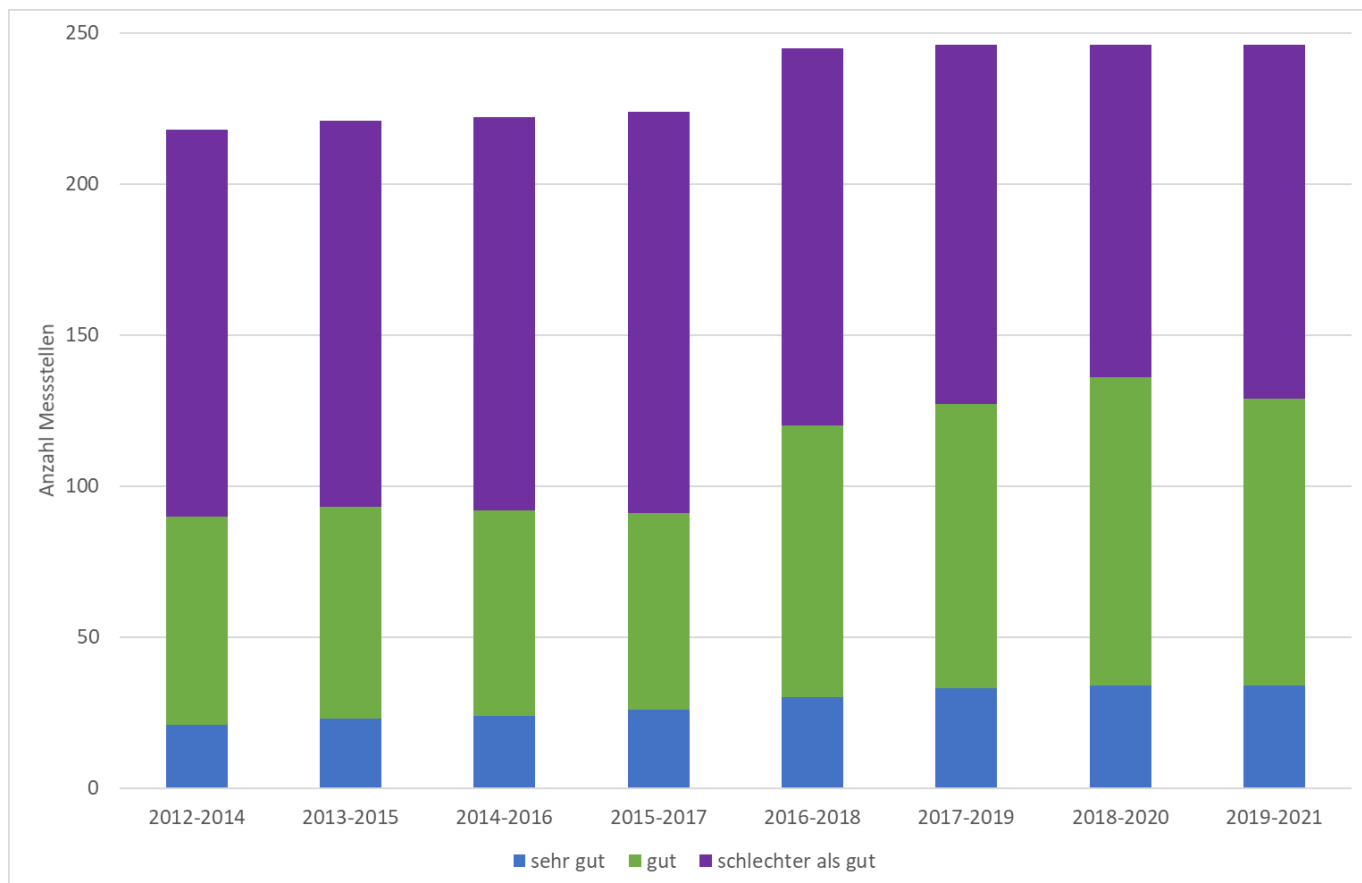


Abbildung 22: Auswertung des Indikators Phosphorkonzentration in Fließgewässern für die Messstellen des repräsentativen Messnetzes.

Quelle: Umweltbundesamt nach Angaben der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).

3.2.2 Eutrophierungseinstufung

Entsprechend der Festlegungen in der OGewV und zum Wirkungsmonitoring (siehe vorherige Monitoringberichte) werden die Untersuchungen der biologischen Qualitätskomponenten und somit auch die Eutrophierungseinstufung alle drei Jahre durchgeführt.

Für den Indikator „Eutrophierungseinstufung“ werden zur Beurteilung der Monitoringergebnisse die Forderungen der Reporting Guidelines 2020 zur Beurteilung der Eutrophierung umgesetzt. Danach wird eine Einstufung in „non-eutrophic“, „eutrophic“ und „in the near future may become eutrophic“ gefordert. Um diese Einstufung mit den Bewertungsmaßstäben nach Wasserrahmenrichtlinie zu harmonisieren, wurde folgende Zuordnung getroffen (Tabelle 1):

Tabelle 5: Einstufung in die Eutrophierungsklassen der Berichterstattung zum Nitratbericht

		Biologische Qualitätskomponenten i. d. R. Makrophyten/Phytobenthos		
		ÖZK 1 oder 2 (Bewertung „sehr gut“ oder „gut“)	ÖZK 3–5 (Bewertung schlechter als gut)	Nicht bestimmt
Orientierungswerte ¹⁾	eingehalten	„Non-eutrophic“	wenn Phytoplankton relevant und Zustand „gut“ oder „sehr gut“, dann i. d. R. „non-eutrophic“	Wenn WRRL Impact „Nutrient“, dann „in the near future may become eutrophic“
			wenn Phytoplankton nicht relevant und Hinweise vorliegen, dass Zielverfehlung von Makrophyten/Phytobenthos nicht aufgrund zu hoher Nährstoffeinträge vorliegen (= bei WRRL keine Angabe Impact Nutrient), dann „non-eutrophic“	
			Ansonsten „in the near future may become eutrophic“	Ansonsten „non-eutrophic“
	nicht eingehalten	„in the near future may become eutrophic“	„eutrophic“	„in the near future may become eutrophic“
nicht bestimmt	kann nicht vorkommen			
¹⁾ Anforderungen nach OGewV, Anlage 7: für Orthophosphat-Phosphor für alle Fließgewässermessstellen der Bundesländer, die eutrophierte Gebiete nach § 13 AVV GeA ausweisen, für Gesamt-Phosphor für alle anderen Fließgewässermessstellen				

Anmerkung: ÖZK: Ökologische Zustandsklasse

Quelle: Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.

Die Untersuchungen an den repräsentativen Messstellen für die Berichterstattung nach Nitratrichtlinie ergeben für den Indikator „Eutrophierungseinstufung“ (Abbildung 1, siehe auch Nitratberichterstattung 2020):

- 20 % der Messstellen werden als „non-eutrophic“,
- 28 % der Messstellen sind als „in the near future may become eutrophic“ und
- 52 % der Messstellen mit „eutrophic“ eingestuft.

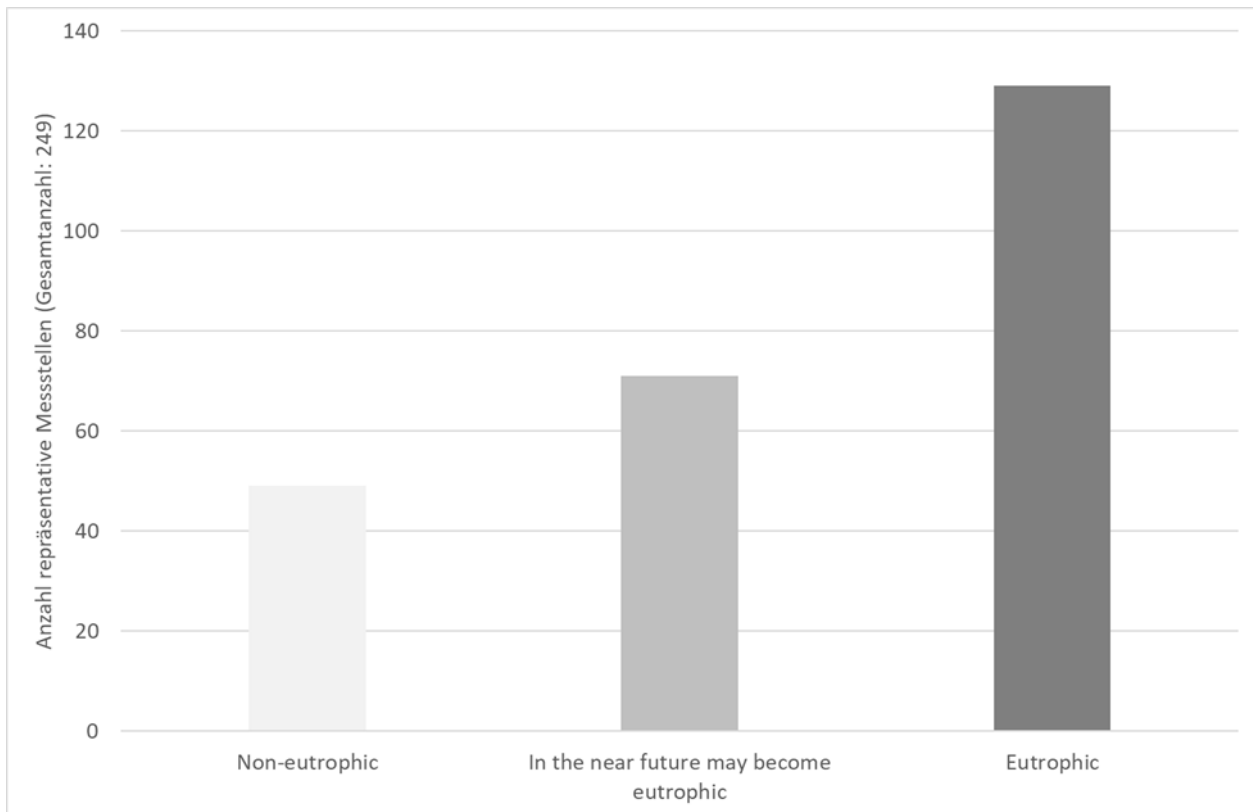


Abbildung 23: Auswertung des Indikators Eutrophierungseinstufung für die Messstellen des repräsentativen Messnetzes (Stand: 2020).

Quelle: Umweltbundesamt nach Angaben der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).

4 Dritte Monitoringebene: Teilbereich Modellierung der regionalen Nährstoffsituation

Für den Aufbau der Datenerfassung und die Weiterentwicklung der Modellierung in der Umsetzungsphase ist das Verbundprojekt RELAS initiiert worden, das von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung gefördert wird. Der Förderbeginn war der 01.09.2022. Damit ist die Finanzierung für den Aufbau des Monitoringsystems bis 31.08.2025 sichergestellt; beteiligt sind das Thünen-Institut, das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und das Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei Berlin (IGB). Für dessen Vorgängerprojekt AGRUM Deutschland (AGRUM-DE) wurde 2023 der Abschlussbericht veröffentlicht (Zinnbauer et al., 2023).

BMEL und BMUV werden in Abstimmung mit den Ländern zeitnah über die Verstetigung des Monitoringvorhabens entscheiden.

4.1 Landwirtschaftliche Modellierung: Arbeiten am Thünen-Institut

Zentral für die Weiterentwicklung der landwirtschaftlichen Modellierung ist die Verbesserung der Datengrundlage. Das betrifft zum einen die Aktualisierung der Daten zur Agrarstruktur (z. B. Landnutzungsdaten aus dem InVeKoS, Tierbestandsdaten der Tierseuchenkassen, Wirtschaftsdüngers-transportdaten etc.), zum anderen die Erschließung und Integration der betrieblichen Düngedaten. Die düngerechtliche Überwachung und der Vollzug sind in Deutschland – ebenso wie die Errichtung und Beprobung der Gewässermessstellen – Sache der Bundesländer. Zwischen den Ländern wiederum sind die Voraussetzungen zur Bedienung des Datenbedarfs für das Monitoring sehr unterschiedlich. Das betrifft einerseits die Ressourcenausstattung der zuständigen Behörden, andererseits aber auch den Grad der Digitalisierung und folglich die Möglichkeit, kurzfristig Daten bei den Betrieben digital abzufragen, zu prüfen, zu harmonisieren und an den Bund zu übermitteln. Darüber hinaus werden derzeit noch nicht alle erforderlichen Daten in allen Ländern bei den Betrieben erhoben, da die erforderliche Rechtsgrundlage mit der Novellierung des Düngegesetzes und der nachgeordneten Monitoringverordnung erst geschaffen werden muss. Insgesamt stellt die geplante Erfassung der umfangreichen Daten einschließlich des Aufbaus von digitalen Datenerfassungssystemen in den Ländern, beim Bund und nicht zuletzt auch für die landwirtschaftlichen Betriebe selbst eine große Herausforderung dar, welche jedoch schrittweise angegangen wird.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurden im Frühjahr 2022 Datenschnittstellen mit den Bundesländern abgestimmt. Ende 2022 wurde mit der Datenbereitstellung durch die Landwirtschaftsverwaltungen an das Thünen-Institut begonnen. Es wurden Daten von mehreren Bundesländern bereitgestellt, zum überwiegenden Teil InVeKoS-Daten sowie Daten der Wirtschaftsdüngermeldedatenbanken und der Klärschlammkataster. Die Datenbereitstellung soll, entsprechend dem Feinkonzept des 2. Monitoringberichts 2021, jährlich über die abgestimmten Schnittstellen erfolgen. Voraussetzung hierfür ist der Erlass einer Monitoringverordnung durch den Bund. Deren rechtliche Grundlage wird mit dem Zweiten Gesetz zur Änderung des Düngegesetzes seit Herbst 2023 im Bundestag verhandelt.

Die Daten wurden aufbereitet, systematisiert und in einer ersten Version der Bundesdatenbank gespeichert. Die Bundesdatenbank wurde im Berichtsjahr technisch konzipiert und zu großen Teilen aufgebaut. Darüber hinaus wurden Auswertungsalgorithmen erstellt, die in Zukunft einen hohen Automatisierungsgrad bei der Indikatorenberechnung erlauben werden. Außerdem wurde damit begonnen, das Nährstoffbilanzmodell des Regionalisierten Agrar- und Umweltinformationssystems für Deutschland (RAUMIS) in die Programmiersprache R zu überführen. Dieser Schritt wurde notwendig, um eine jährliche Bilanzierung unter flexibler Handhabung der Datenquellen leisten zu können. Erste Ergebnisse der Nährstoffbilanzierung werden voraussichtlich Ende März 2024 vorliegen. Eine Abstimmung mit den Bundesländern ist für das Frühjahr 2024 vorgesehen.

4.2 Hydrologische Modellierung: Arbeiten am Forschungszentrum Jülich (FZJ)

Mit dem Projektbeginn von RELAS am 01.09.2022 wurde mit der Implementierung von Datengrundlagen und deren Aufbereitung für die bundesweite Modellierung begonnen. Entsprechend des Projektzeitplans konzentrierten sich die Arbeiten auf die Datengrundlagen für die deutschlandweite Umsetzung des Wasserhaushaltsmodells mGROWA. Eine räumlich hochaufgelöste Ermittlung der Abflusskomponenten ist eine Grundvoraussetzung für die nach Eintragspfaden differenzierende Modellierung der Nährstoffeinträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer. Mit dem Modell mGROWA wird hierzu zunächst der Gesamtabfluss modelliert, welcher dann in die Komponenten des Direktabflusses (Oberflächenabfluss, Abfluss aus urbanen Flächen, natürlicher Zwischenabfluss und Dränabfluss) und die Grundwasserneubildung (Basisabfluss, Grundwasserabfluss) separiert wird. Gekoppelt an diese Abflusskomponenten gelangen die Nährstoffe in die Oberflächengewässer. Für Details zum mGROWA-Modell sei an dieser Stelle auf den 2. Monitoringbericht von 2021, Kapitel B.5.1.2.6, verwiesen.

Auf der 11. Sitzung des Begleitarbeitskreises am 15.03.2023 wurde vereinbart, deutschlandübergreifend auf eine Reihe von Datengrundlagen zurückzugreifen, die bundesweit konsistent in so hoher Qualität zur Verfügung stehen (Abbildung 1, linker Teil), dass sie für das Wirkungsmonitoring geeignet sind. Hierbei handelt es sich um klimatische und topografische Daten sowie Daten zur Versiegelung und Landnutzung. Bei Letzteren handelt es sich um einen vom Thünen-Institut durch eine Verschneidung des Basis-DLM mit den (aktuellen) landwirtschaftlichen Flächen nach InVe-KoS erstellten Datensatz.

In Abbildung 1, rechter Teil, sind die länderspezifischen Datengrundlagen für die mGROWA-Modellierung aufgeführt. Hierbei handelt es sich vor allem um Bodendaten sowie Datengrundlagen zu dränierten Gebieten und BFI-Werten. Im FZJ bereits vorhandene Geodaten aus dem AGRUM-DE-Projekt wurden den zuständigen Fachleuten in den Bundesländern zu diesem Zweck übermittelt. Die Länder haben diese Daten geprüft und ggf. durch genauere oder aktuellere Daten ersetzt.

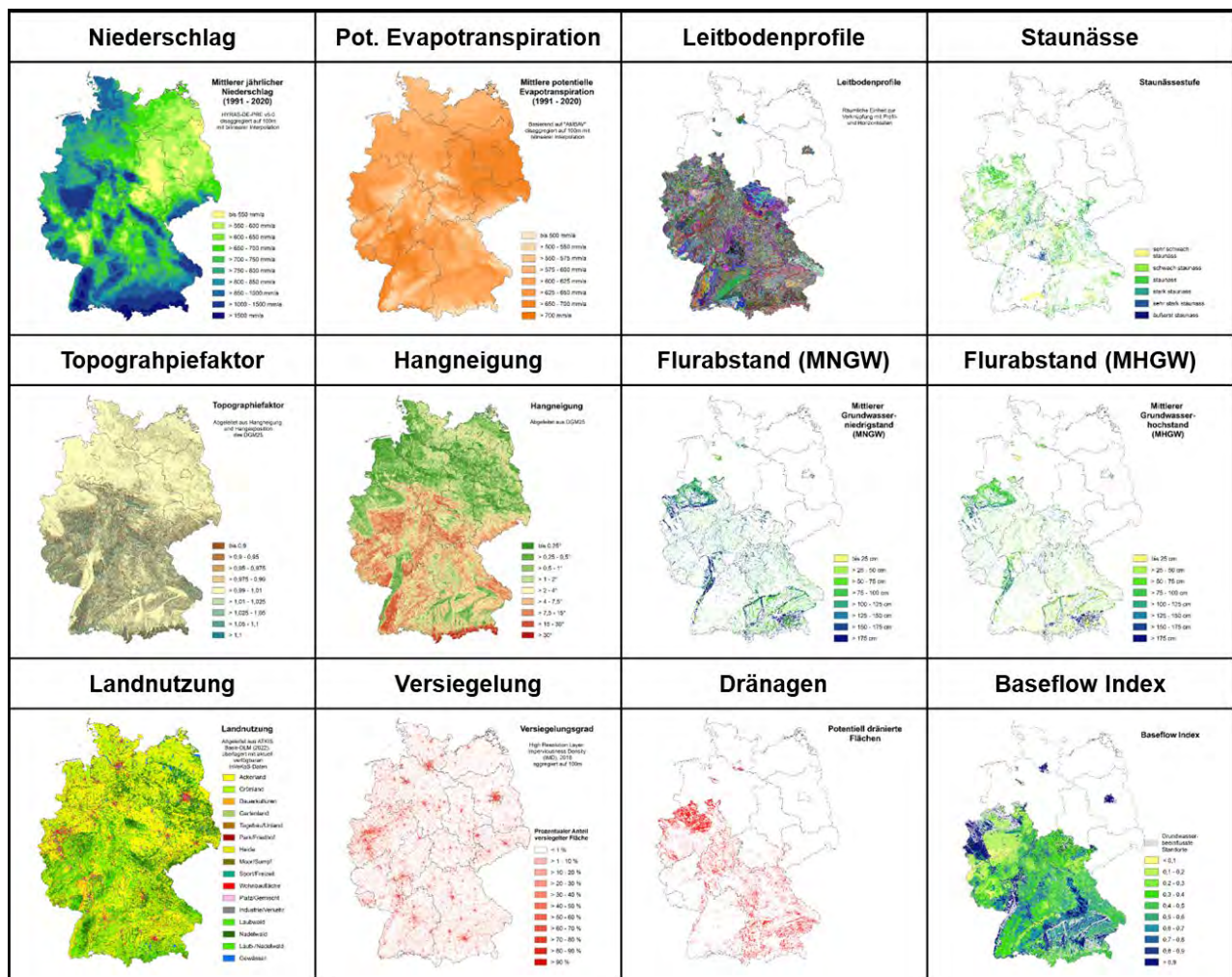


Abbildung 24: Deutschlandweite und länderspezifische Datengrundlagen für die Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell mGROWA

Quelle: Forschungszentrum Jülich.

Alle für die Wasserhaushaltsmodellierung relevanten Datengrundlagen wurden dem FZJ von den Bundesländern termingerecht zur Verfügung gestellt, sodass das FZJ im April 2023 damit begonnen hat, mGROWA-Modellierungen für die hydrologische Periode 1991–2020 durchzuführen. Aus pragmatischen und organisatorischen Gründen erfolgen die Modellierungen sukzessive und länderspezifisch. Ermittelt werden der Gesamtabfluss und die fünf Abflusskomponenten mit Relevanz für den Nährstoffeintrag ins Grundwasser und die Oberflächengewässer: Oberflächenabfluss, urbaner Direktabfluss, Dränabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung. Darüber hinaus wird die Sickerwasserhöhe vom Modell ermittelt.

Die Modellierung des Wasserhaushalts erfolgt landesweise. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der ersten Modellierungen für die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der dazugehörigen Modellevaluierungen für den Gesamtabfluss und die Grundwasserneubildung für die pegelbezogenen Einzugsgebiete, die ausschließlich innerhalb des jeweiligen Bundeslands liegen.

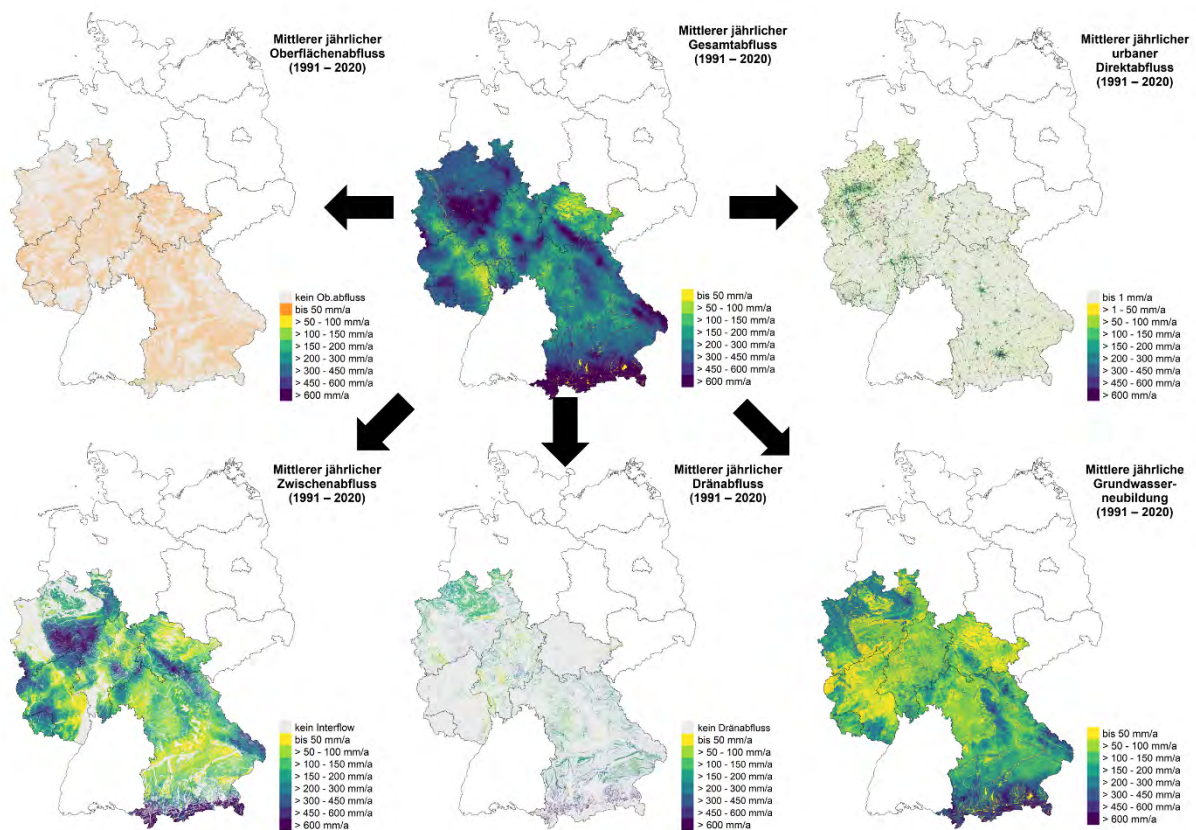


Abbildung 25: Ergebnisse der ersten Modellierungen für die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen.

Quelle: Eigene Darstellung (FZJ).

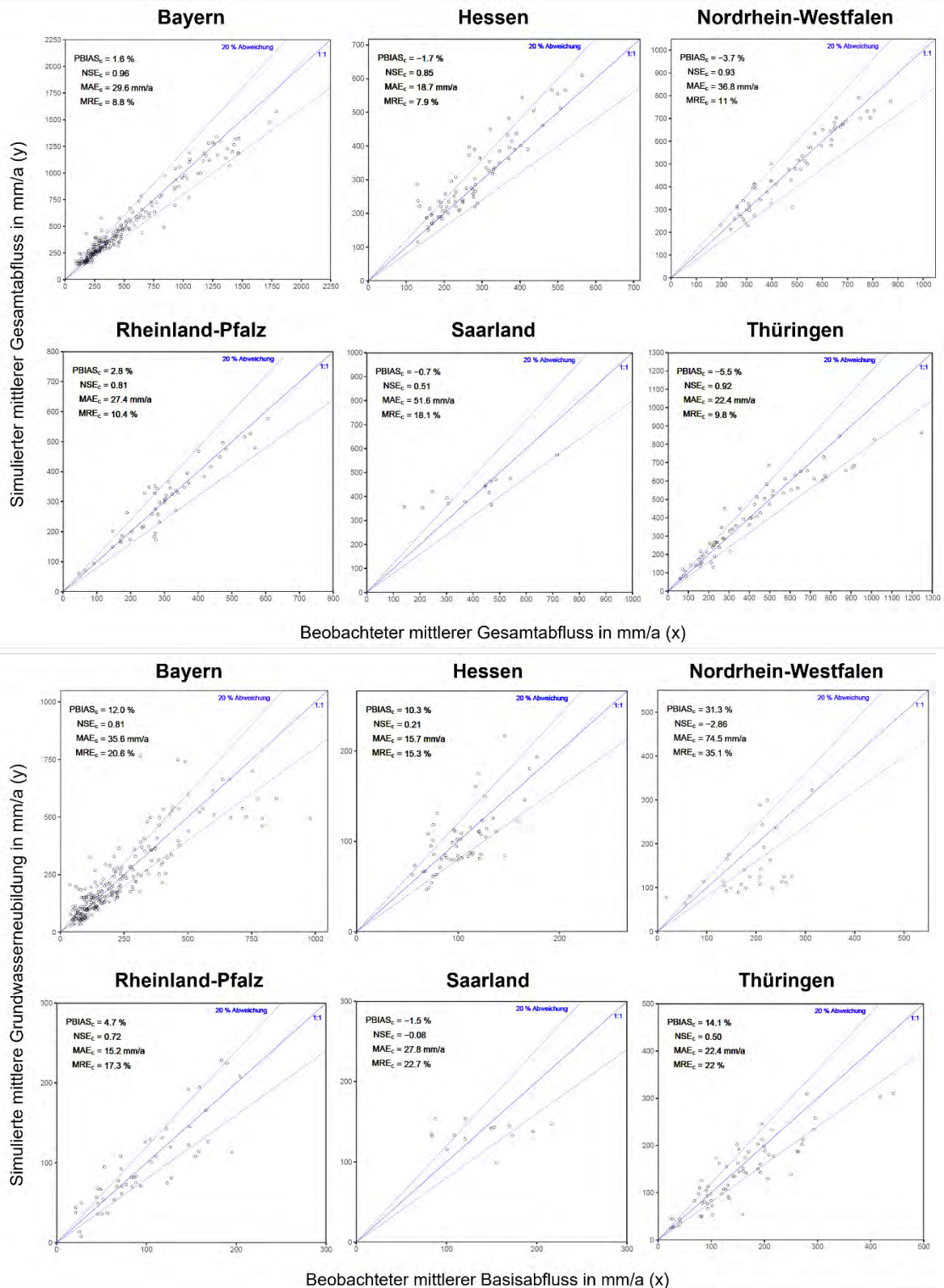


Abbildung 26: Ergebnisse der Modellevaluierungen für den Gesamtabfluss (jeweils obere Reihe) und für die Grundwasserneubildung (jeweils untere Reihe) für die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen.

Quelle: Eigene Darstellung (FZJ).

Der sukzessive länderweise Aufbau des Wasserhaushaltsmodells mGROWA inklusive Modellevaluationen wird voraussichtlich bis Dezember 2023 abgeschlossen werden können. Ebenso sukzessive erfolgt die länderweise Bereitstellung von Ergebnissen der Wasserhaushaltsmodellierung vom FZJ an die Bundesländer. Der Abschluss der Wasserhaushaltsmodellierung und dementsprechend der Identifikation der fünf Abflusskomponenten mit Relevanz für den Nährstoffeintrag ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer wird dann im 1. Quartal 2024 erfolgen. Parallel wurde mit der Bereitstellung und dem Pre-Processing der Datengrundlagen für die N- und P-Modellierung begonnen.

Für den nächsten Berichtszeitraum ist dann beabsichtigt, die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung aller Bundesländer darzustellen und erste Ergebnisse zu den modellierten diffusen Nährstoffeinträgen zu präsentieren.

4.3 Hydrologische Modellierung: Arbeiten am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)

Die Arbeiten am IGB umfassen vier maßgebliche inhaltliche Schwerpunkte:

- (1) Modellierung von Stickstoff- und Phosphor-Einträgen aus urbanen Systemen und Punktquellen
- (2) Modellierung der Gewässerinternen Retention und resultierenden Frachten
- (3) Frachtvergleich und Ergebnisvalidierung
- (4) Bereitstellung von Frachten aus hydrologisch angeschlossenen ausländischen Oberliegergebieten

Die ersten Monate der Projektlaufzeit wurden vornehmlich auf die Beschaffung und Aufbereitung von Eingangsdaten in den Oberliegergebieten verwendet. Zudem erfolgte eine Überführung des Modells MONERIS in die Programmiersprache R mit einer vollständigen Umgestaltung der Eingangsdatenstruktur, um eine effizientere und höher aufgelöste Modellierung zu ermöglichen. Die eigentlichen Berechnungsansätze, wie im 2. Monitoringbericht von 2021, Kapitel B.5.1.3 beschrieben, blieben dabei weitestgehend unverändert.

- (1) Modellierung von N- und P-Einträgen aus urbanen Systemen und Punktquellen

Die Einträge aus urbanen Systemen beinhalten verschiedene Teileintragspfade: Trennkanalisation, Mischkanalisationsüberläufe, Kleinkläranlagen (< 50 EGW, mit verschiedenen Einleitoptionen), kleine Kläranlagen (50–2.000 EGW), kommunale Kläranlagen (> 2.000 EGW) sowie nicht an die Kanalisation angeschlossene Flächen und Kanalleckagen (weiterführende Details im 2. Monitoringbericht von 2021, Kapitel B.5.1.3.1). Die Berechnung der Einträge bedarf einer Reihe von Eingangsdaten. Der Stand der Datenabfrage und -aufbereitung wird im Folgenden kurz dargestellt.

Landnutzung

Die bebauten urbanen Flächen wurden als Raster mit einer Auflösung von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ aufbereitet und liegen zur weiteren Verwendung bereit (identisch zur Karte „Versiegelung“ in Abbildung 1). Eine Harmonisierung der Landnutzungsdaten mit den anderen Modellen wird derzeit geprüft.

Versiegelungsgrad

Die Karte zum Versiegelungsgrad liegt bei IGB fertig aufbereitet vor (identisch zur Karte „Versiegelung“ in Abbildung 1).

Niederschlag

Die durch den Deutschen Wetterdienst erstellten und mit einer räumlichen Auflösung von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ bereitgestellten Daten zu täglichen Niederschlägen (Deutscher Wetterdienst, 2023) wurden aufbereitet.

Bevölkerung

Die Angaben zu Bevölkerungsverteilung und -dichten auf Gemeindeebene basieren auf Angaben der statistischen Landesämter. Zur besseren Binnendifferenzierung der Bevölkerungsverteilung, insbesondere den Stadtstaaten oder in Gemeinden mit großen Unterschieden in der Bevölkerungsdichte, ist die Verwendung von höher aufgelösten Daten vorgesehen. Eine genaue, jedoch nicht mehr ganz aktuelle Grundlage ist das Raster der Bevölkerungsdichte mit einer Auflösung von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ auf Basis der Zensuserhebung für das Jahr 2011 (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015). Wenn die Daten des Forschungsdatenzentrums (FDZ) bzw. der Statistischen Landesämter vorliegen, wird die räumliche Verteilung der Bevölkerung über das Raster des Zensus 2011 abgebildet und mit den Bevölkerungszahlen auf Gemeindeebene korrigiert. Falls innerhalb des Projektzeitraums die Ergebnisse des Zensus 2021 verfügbar sind, wird diese Datengrundlage verwendet werden.

Anschluss an Abwassersammlung und -behandlung, Trenn- und Mischkanalisation, Speichervolumen

Die Datenbereitstellung für das Jahr 2019 erfolgte bereits für einen großen Teil der Bundesländer über eine Abfrage bei den Statistischen Landesämtern. Für diejenigen Bundesländer, für die über diesen Weg keine Daten bereitgestellt werden können, werden Daten des FDZ aus dem Jahr 2016 herangezogen.

Personenspezifischer Wasserverbrauch

Der personenspezifische Wasserverbrauch wird für die Berechnung von Einleitungen, z. B. während Mischkanalisationsüberlaufereignissen oder durch Kleinkläranlagen, benötigt. Die Angaben dazu liegen als Wasserbereitstellung bei der Trinkwasserversorgung vor und werden vom Statistischen Bundesamt im Dreijahreszyklus auf Kreisebene bereitgestellt. Für die deutschlandweite Berechnung werden die Werte des Jahres 2019 verwendet.

Hydrogeologie

Informationen zur Hydrogeologie werden für die Unterscheidung der Einleitung von behandeltem Abwasser aus Kleinkläranlagen über ein Rohr-/Grabensystem bzw. eine Boden-Grundwasserpas-sage herangezogen. Für das Wirkungsmonitoring/RELAS wird die HÜK250 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2022) als Datengrundlage verwendet. Die vollständige Datengrundlage zur Hydrogeologie liegt fertig aufbereitet vor und wird den Bundesländern zusammen mit den anderen Eingangsdaten fristgerecht zur Prüfung vorgelegt.

Punktquellen

Einleitungen von Stickstoff- und Phosphoreinleitungen aus Punktquellen entstammen dem Kläranlagen-Inventar und dem EPRT-Register des UBA für das Jahr 2020. Kläranlagen werden nach den angeschlossenen Einwohnergleichwerten (EGW) in kommunale Kläranlagen (> 2.000 EGW) und kleine Kläranlagen (50–2.000 EGW) unterschieden. Die Einleitungen aus kleinen Kläranlagen werden erstmalig anlagenscharf berücksichtigt. Bei industriellen Direkteinleitern werden nur Freiset-zungen berücksichtigt, die nicht in den Angaben des Kläranlageninventars enthalten sind. Die Er-gebnisse wurden den Bundesländern zunächst fristgerecht zur Prüfung vorgelegt und anschließend quantitativ ausgewertet und dargestellt.

Zur Modellierung der Einträge über Mischkanalisationsüberläufe ist die Identifikation von Starkniederschlagstagen (SNT) und die an diesen Tagen erzeugte Wassermenge ein zentrales Maß. Mit-tels einer Auswertung von täglichen Niederschlagssummen im Zeitraum 1991–2010 von 1.190 Sta-tionen des DWD (CDC, 2023), wurde festgelegt, Tage ab einer Tagesniederschlagssumme von > 10 mm als SNT zu werten.

(2) Modellierung der gewässerinternen Retention und resultierenden Frachten

Die Modellierung der gewässerinternen Retention erfolgt grundsätzlich nach den im Modell MO-NERIS implementierten Berechnungsansätzen (weiterführende Details im 2. Monitoringbericht von 2021, Kapitel B.5.1.3.2) auf Basis der WRRL-Wasserkörper. Da kein flächendeckendes Shape der Wasserkörpereinzugsgebiete für Deutschland vorliegt, wurden diese unter Berücksichtigung der in Wasserblick verfügbaren Grundlagen und den von der BfG bereitgestellten Drain-Basins abgeleitet. Die so erzeugten hydrologischen Wasserkörpereinzugsgebiete (HY-WK-EZG) befinden sich derzeit in Abstimmung mit den Bundesländern. Entsprechend des Vorschlags des Begleitarbeitskreises sol-len die Sub-Basins als Aggregationsebene bei der kartenmäßigen und tabellarischen Darstellung von Ergebnissen in den Monitoringberichten verwendet werden. Diese werden derzeit ebenfalls mit den Bundesländern abgestimmt.

(3) Frachtvergleich und Ergebnisvalidierung

Zur Validierung der aus den Gesamteinträgen von FZJ und IGB modellierten Frachten wurden Gü-tedaten der Bundesländer für die Jahre 2010–2020 abgefragt und die Pegel-daten für 1991–2020 vom FZJ an das IGB weitergeleitet. Nach Möglichkeit sollten vorhandene Zuordnungen zwischen Güte-messstelle und geeigneten Abflusspegeln bereitgestellt werden. Fehlende Zuordnung wurde durch eine automatisierte Zuordnung von Gütemessstellen und Pegel innerhalb eines 2 km-Radius Luftli-nie ergänzt, sofern diese im selben bzw. unmittelbar benachbarten Teileinzugsgebiet (HY-WK-

EZG) liegen. Die endgültige Zuweisung der Pegel und Gütemessstellen kann erst nach Fertigstellung der HY-WK-EZGs erfolgen und wird den Bundesländern anschließend zur Kontrolle vorgelegt. Die Ergebnisvalidierung ist erst möglich, wenn die Einträge über alle Pfade vorliegen.

(4) Bereitstellung von Frachten aus hydrologisch angeschlossenen ausländischen Oberliegergebieten

Für die Abschätzung der Frachten aus ausländischen Oberliegergebieten wurden die Datengrundlagen umfangreich aktualisiert und neu strukturiert. Unter anderem wird eine deutliche höhere räumliche Auflösung der Eintragsmodellierung vorbereitet. Wie in AGRUM-DE werden die gesamten Einträge, die gewässerinterne Retention und die resultierenden Frachten, mit MONERIS berechnet. Zudem wird, über die eigentliche Modellkalibrierung hinaus, eine Feinanpassung der Ergebnisse an die beobachteten Frachten grenznaher Güte- und Abflussmessstellen vorgenommen. Um eine realistische Abbildung von Frachten aus nicht beprobten grenzüberschreitenden Gewässern zu gewährleisten, wurde eine aktualisierte und verbesserte Eintragsmodellierung durchgeführt. Da diese Modellierungen und Ergebnisse zwar notwendig sind, um die Frachtabschätzungen fast aller großen Ströme Deutschlands durchzuführen, jedoch nur indirekter Bestandteil des Wirkungsmonitoring sind, wird an dieser Stelle nur auf diese Arbeiten verwiesen. Eine Darstellung der Eingangsdaten, Methoden und Ergebnisse erfolgt zusammen mit der Frachtberechnung zur Validierung der Gesamtergebnisse der deutschlandweiten Modellierungen.

5 Dritte Monitoringebene: Teilbereich Modellregionen

In den Modellregionen sollen Maßnahmenwirkungen der DüV auf Betriebs- und Schlagebene abgebildet werden. Dazu wird ein System von Frühindikatoren angewendet, welches bewirtschaftungsbedingte Änderungen von Nitratfrachten unter Berücksichtigung der spezifischen Standortbedingungen zeitnah anzeigt. Zudem soll in kleineren Wassereinzugsgebieten innerhalb der Modellregionen eine räumliche und zeitliche Verknüpfung der Emissionen und Immissionen entlang der hydrologischen Pfade erfolgen.

Der Teilbereich Modellregionen befindet sich weiterhin im Aufbau. Die Modellgebiete aus dem noch bis Ende des Jahres 2023 geförderten Demonstrationsvorhaben des Bundes „Multiparametrisches Monitoring von Nitratfrachten aus der Landwirtschaft (MoNi)“ werden in einem Folgeprojekt „MoNi2“ bis Ende des Jahres 2026 fortgeführt. Für die Einrichtung von Kleineinzugsgebieten für Nitrat und Phosphat werden am Julius Kühn-Institut derzeit Kriterien erarbeitet, die noch zwischen den beteiligten Bundesländern abgestimmt werden. Ziel ist eine weitgehende Harmonisierung bei der Verortung der Kleineinzugsgebiete sowie des Messprogramms. Die Einrichtung der Kleineinzugsgebiete für Nitrat soll innerhalb der Modellregionen erfolgen.

Aktuelle Ergebnisse aus den Modellregionen

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den seit dem Jahr 2017 untersuchten fünf Modellregionen mit Schwerpunkt „Ackerbau“ hinsichtlich der Entwicklung der Indikatoren aggregiert vorgestellt (Abbildung 1). Die Modellregionen mit den Betriebsschwerpunkten „Tierhaltung mit Futterbau“ sowie „Gemüsebau“ werden im nächsten Bericht hinzukommen. Eine detaillierte Übersicht und Charakterisierung der nachfolgend behandelten Ackerbauregionen kann dem Abschlussbericht des Demonstrationsvorhabens „Indikatoren zur Früherkennung von Nitratfrachten im Ackerbau“ (Mielenz et al., 2021) entnommen werden.

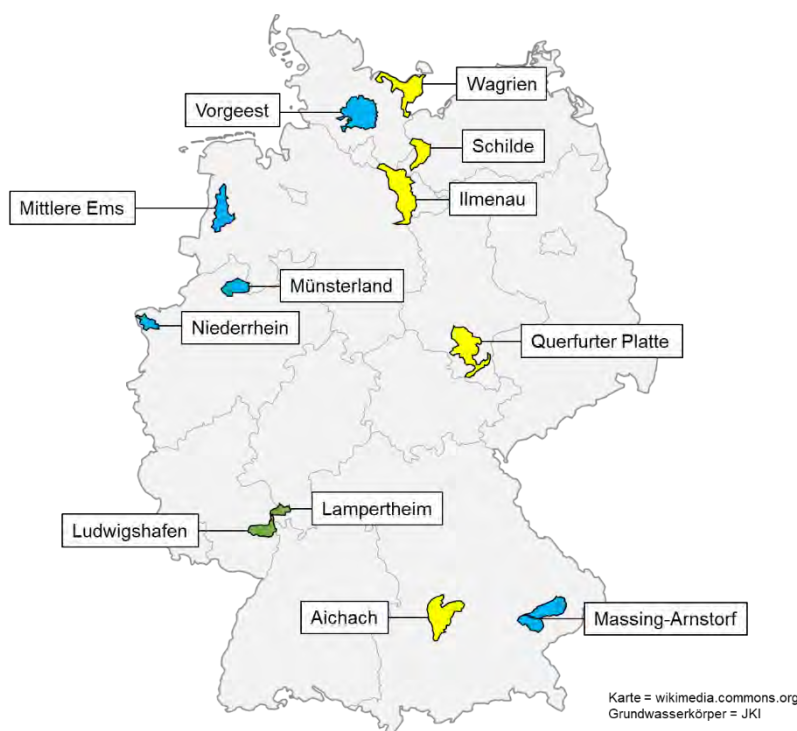


Abbildung 27: Modellregionen aus dem Demonstrationsvorhaben MoNi.

Anmerkung: Die markierten Gebiete repräsentieren mit Ausnahme von Wagrien Grundwasserkörper, die als mit Nitrat belastet oder belastungsgefährdet eingestuft wurden. Die gelben Modellregionen wurden 2016 eingerichtet und sind durch Ackerbaubetriebe charakterisiert. Die blauen Modellregionen wurden im Frühjahr 2021 eingerichtet und repräsentieren überwiegend Gebiete mit intensiver Tierhaltung. Die Modellregionen in den Ländern Hessen und Rheinland-Pfalz (grün) dienen der Betrachtung des Gemüsebaus. Quelle: JKI

Die Stickstoffzufuhr ist im Mittel der 576 Testflächen von 48 Betrieben in den Ackerbauregionen seit dem Jahr 2017 von 207 kg N ha^{-1} auf 179 kg N ha^{-1} im Jahr 2022 zurückgegangen (Abbildung 1a). Dabei hat sich der Einsatz von Mineraldüngern im selben Zeitraum bei Betrachtung des dreijährigen Mittelwertes um rund 33 kg N ha^{-1} reduziert (Abbildung 1d). Die Mineraldünger wurden in den Ackerbaubetrieben zum Teil durch einen gesteigerten Einsatz von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Gärresten substituiert (Abbildung 1e). Die Reduktion der Gesamt-Stickstoffzufuhr ist unter anderem auch auf eine Einschränkung von Herbstdüngungsmaßnahmen ab dem Jahr 2017 zurückzuführen (Abbildung 1f). Die Stickstoffabfuhr blieb bei Betrachtung des gleitenden Mittelwertes hingegen nahezu konstant (Abbildung 1b). Reduzierte Erntemengen sind vorwiegend auf wiederholte Wassermangelsituationen, insbesondere in den Jahren 2018 und 2019, und den vorliegenden Ergebnissen zufolge nicht auf eine Stickstoffunterversorgung zurückzuführen. Durch die verminderte Stickstoffzufuhr bei nahezu gleichbleibenden Abfuhr hat sich das Schlagbilanzsaldo im Mittel der Testflächen von 50 kg N ha^{-1} im Jahr 2017 auf 30 kg N ha^{-1} im Jahr 2022 verringert (Abbildung 1c). Dieser Trend schlägt sich in den Ernte- $N_{\min}$ -Werten bislang noch nicht eindeutig nieder. So befanden sich nach der Ernte im Jahr 2022 aufgrund einer witterungsbedingt verminderten Abfuhr erneut etwas höhere residuale Stickstoffmengen in den Böden (Abbildung 1a).

Die seit 2017 erhobenen Herbst- $N_{\min}$ -Werte zeigten witterungsbedingt deutliche Schwankungen zwischen den Jahren (Abbildung 1b), wobei das Trockenjahr 2018 hier mit besonders hohen Werten heraussticht. Im Vergleich zum Ernte- $N_{\min}$ wird deutlich, dass die mineralischen Stickstoffgehalte im Boden zum Herbst zumeist nochmal anstiegen. Dies ist in der Regel nicht nur auf Düngungsmaßnahmen zurückzuführen, sondern auf eine Stickstoffmineralisation aus Ernteresten sowie dem Bodenvorrat infolge von Bodenbearbeitung und Aussaat. Ein klarer Trend ist beim Herbst- $N_{\min}$ bislang noch nicht zu erkennen. Dementsprechend zeigen die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser der ungesättigten Bodenzone im Tiefenbereich 90 bis 300 cm ebenfalls keinen klaren Trend auf (Abbildung 1). Die Schwankungen zwischen den Jahren lassen sich qualitativ den vorjährigen Herbst- $N_{\min}$ -Werten zuordnen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich die Stickstoffeffizienz in den Ackerbaugebieten seit dem Jahr 2017 deutlich verbessert hat und zukünftig mit verminderten Nitratausträgen zu rechnen ist.

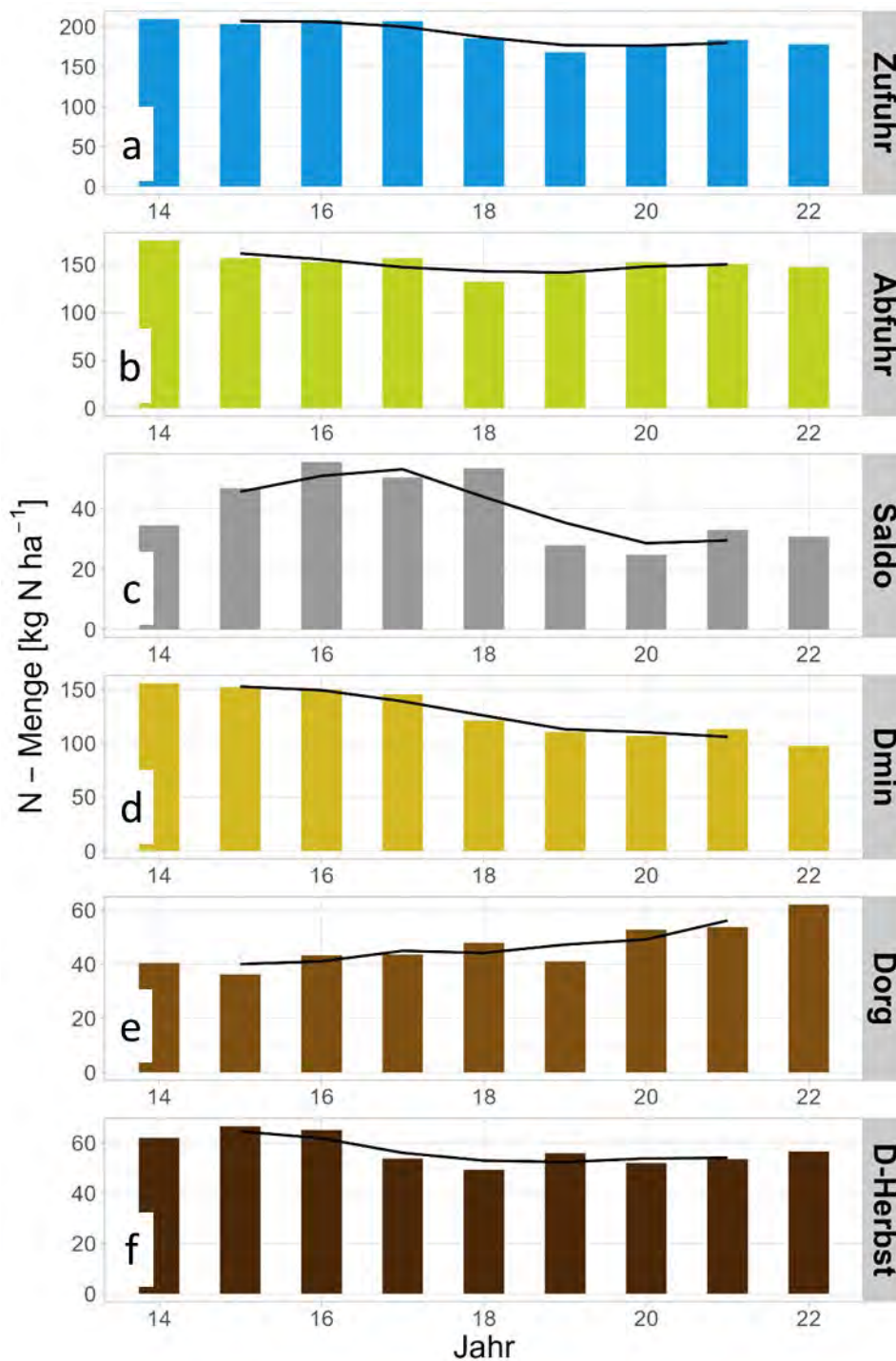


Abbildung 28: Stickstoffzufuhr, -abfuhr und -bilanzsaldo, Stickstoffzufuhr über mineralische (Dmin) und flüssige organische Düngemittel (Dorg) sowie Stickstoffzufuhr im Herbst (D-Herbst; im Mittel der im Herbst gedüngten Flächen) im Mittel der Testschläge (n=576) für die Jahre 2014–2022.

Anmerkung: Die schwarzen Linien kennzeichnen jeweils den dreijährigen Mittelwert. Quelle: JKI.

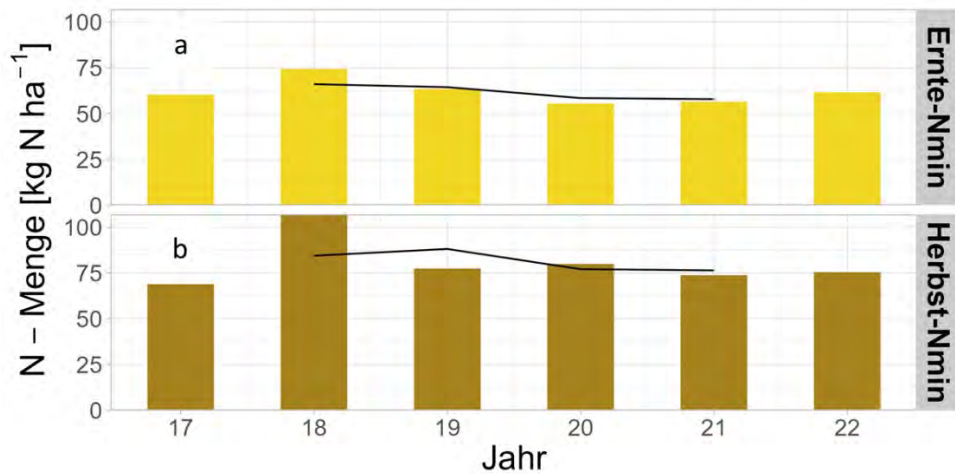


Abbildung 29: Ernte- und Herbst-N_{min}-Werte im Mittel der Testschläge (n=576) für die Jahre 2017–2022.

Anmerkung: Die schwarze Linie kennzeichnet jeweils den dreijährigen Mittelwert. Quelle: JKI.

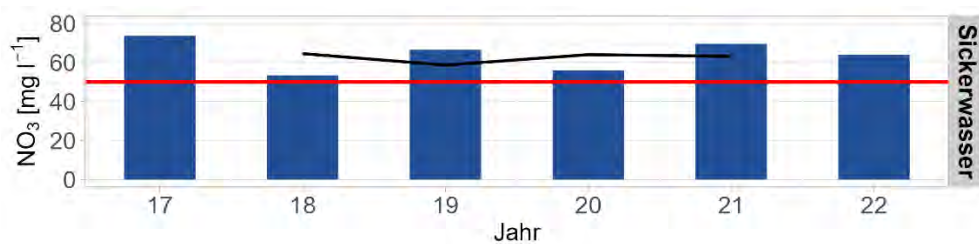


Abbildung 30: Nitrat-Sickerwasserkonzentration im Boden von 90 bis 300 cm Tiefe im Mittel der untersuchten Testschläge (n=144) für die Jahre 2017–2022.

Anmerkung: Die schwarze Linie kennzeichnet jeweils den dreijährigen Mittelwert. Quelle: JKI.

6 Synthese und Ausblick

Aufbau des Systems

Im Berichtszeitraum 2023 konnte das Monitoringsystem wie beabsichtigt weiter aufgebaut werden.

- Erste Monitoringebene: Emissionen

In der Monitoringebene Emissionen konnten erstmals regionale Indikatoren für einige Bundesländer berichtet werden. Eine Grundlage hierfür sind die erstmals für das Monitoring zur Verfügung stehenden InVeKoS-Daten der Länder. Außerdem wurde die Bundesdatenbank technisch konzipiert und zu großen Teilen umgesetzt.

- Zweite Monitoringebene: Immissionen

In der Monitoringebene Immissionen ermöglicht die zusätzliche Auswertung des Messstellennetzes der AVV GeA ein deutlich differenzierteres Bild im Hinblick auf die räumliche Belastungssituation des Grundwassers. Aufgrund der kurzen Zeitreihe sind keine zeitlichen Trends ableitbar. Es ist darüber hinaus zu beachten, dass die hier gezeigten Auswertungen des AVV-Ausweisungsmessnetzes dazu bestimmt sind, einen ersten Überblick zu der erweiterten Datengrundlage zu vermitteln. Das AVV-Ausweisungsmessnetz wird aktuell in vielen Bundesländern weiter ausgebaut.

- Dritte Monitoringebene: Modellierung und Modellregionen

- Der Teilbereich Modellierung wurde zeitplangemäß weiter aufgebaut. Wie beabsichtigt konnten die Datengrundlagen im Vergleich zu AGRUM-DE deutlich verbessert werden. Der Teilbereich Modellregionen konnte erstmals Erkenntnisse aus fünf Ackerbauregionen einfließen lassen.

Indikatoren

- Erste Monitoringebene: Emissionen

Die sektoralen Indikatoren zeigen, dass der Emissionsdruck durch agrarstrukturelle Veränderungen seit einigen Jahren rückläufig ist. Die Tierhaltung steht seit mehreren Jahren unter gesellschaftlichem und finanziellem Druck, was zu einem deutlichen Rückgang der Viehhaltung und des damit verbundenen Nährstoffanfalls geführt hat. Sowohl die jüngsten Dürrejahre als auch die stark angestiegenen Mineraldüngerpreise haben zu einem Rückgang beim Mineraldüngerabsatz geführt. Derzeit können noch keine regionalen Trends abgeleitet und statistisch abgesichert werden, sodass eine Aussage zur Emissionsentwicklung innerhalb der einzelnen belasteten Gebiete noch nicht möglich ist.

- Zweite Monitoringebene: Immissionen

Die Datenauswertung der Grundwassermessstellen des EU-Nitratmessnetzes zeigt, dass die Nitratbelastung in den vergangenen elf Jahren rückläufig war. Diese positive Entwicklung ist jedoch nicht auf die o. g. agrarstrukturellen Veränderungen der vergangenen Jahre zurückzuführen, sondern Ausdruck langfristiger Veränderungen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung in

Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten. Bewirtschaftungsbedingte Änderungen der Emissionen werden erst mit Verzögerung und nicht an allen Standorten gleichermaßen in Form sinkender Nitratkonzentrationen im Grundwasser sichtbar. Dementsprechend bleibt abzuwarten, wann und wie stark sich der deutliche Rückgang des Emissionsdrucks der vergangenen Jahre in den Nitratkonzentrationen des Grundwassers widerspiegeln wird. Die Auswertungen zeigen auch, dass insbesondere Grundwassermessstellen mit einer überwiegenden landwirtschaftlichen Beeinflussung überproportional stark mit Nitrat belastet sind.

- Dritte Monitoringebene: Modellierung und Modellregionen

Die Weiterentwicklung und Anwendung der hydrologischen Modelle wurde begonnen. Erste Ergebnisse zum Wasserhaushalt und den für die Nährstoffmodellierung relevanten Komponenten des Abflusses liegen vor. Nach Abschluss dieser Arbeiten wird ab Anfang 2024 die Stofftransportmodellierung zu Einträgen von Stickstoff und Phosphor in Grundwasser und Oberflächengewässer vorgenommen.

In den Ackerbaubetrieben der Modellregionen zeigt sich seit dem Jahr 2017 ein Rückgang der Stickstoffzufuhren. Dies ist auf Einschränkungen bei der Herstdüngung sowie einer verminderten Stickstoffzufuhr im Frühjahr gemäß DüV 2017 zurückzuführen. Die Betriebe haben dabei vorwiegend die Verwendung von Mineraldüngern reduziert. Die Stickstoffabfuhr von den Flächen ist hingegen – abgesehen von Witterungseffekten – weitgehend unverändert geblieben. Trotz der dadurch verbesserten Stickstoffeffizienz sind Effekte auf die gemessenen Indikatoren im durchwurzelten Boden sowie im Sickerwasser bislang lediglich schwach oder noch gar nicht zu erkennen.

Ausblick

- Erste Monitoringebene: Emissionen

Die Berichterstattung der Emissionsindikatoren wird im kommenden Jahr weiter ausgebaut. Die Datenschnittstellen zu den Ländern werden weiter erprobt und etabliert. Damit werden im kommenden Jahr voraussichtlich weitere Indikatoren berichtet werden können bzw. bereits berichtete Indikatoren vervollständigt werden. Damit wird die Erstellung von Zeitreihen möglich, welche Aussagen zu regionalen Entwicklungen erlauben wird.

- Zweite Monitoringebene: Immissionen

In den kommenden Jahren wird das AVV-Ausweisungsmessnetz weiter konsolidiert bzw. weiter verdichtet. Es stehen damit in den nächsten Jahren weitere Messstellen zur Verfügung, die für die Ausweisung belasteter Gebiete herangezogen und darüber hinaus auch für die Beschreibung der Belastungssituation des Grundwassers mit Nitrat berücksichtigt werden können. Die Messstellen des AVV-Ausweisungsmessnetzes werden in die Berichterstattungen zum Wirkungsmonitoring und Nitratbericht eingehen. Entsprechende Arbeiten sollen durch den LAWA-Ausschuss Grundwasser koordiniert werden. Des Weiteren werden für Fließgewässer erste Daten des erweiterten Messnetzes vorliegen.

- Dritte Monitoringebene: Modellierung und Modellregionen

Der Teilbereich Modellierung wird dem Projektzeitplan von RELAS entsprechend weiter fortgesetzt. Im kommenden Jahr sollen erste Ergebnisse aus RELAS im Monitoringbericht dargestellt werden, z. B. zur Wasserhaushaltsmodellierung. Darüber hinaus werden erstmals regionale Nährstoffbilanzen vorliegen, die dem FZJ zur Stoffeintragsmodellierung übergeben werden. Im Teilbereich Modellregionen wird das Messprogramm in den zwölf Gebieten ab dem Jahr 2024 im Rahmen des Demonstrationsvorhabens „Monitoring von Stickstoffemissionen im Pflanzenbau (MoNi 2)“, finanziert durch Mittel des Bundes, bis Ende 2026 fortgeführt. Die Einrichtung von Kleineinzugsgebieten wird weiter konkretisiert.

- EU-Nitratbericht

Mit den Monitoringberichten des Wirkungsmonitorings und dem Nitratbericht werden zwei Berichterstattungspflichten zur EU-Nitratrichtlinie erfüllt. Inwiefern die Berichte des Wirkungsmonitorings mit der Nitratberichterstattung in Zukunft interagieren bzw. aufeinander aufbauen werden, wird derzeit noch erörtert. Die Ergebnisse des Monitorings bzw. der Vorläuferprojekte können prinzipiell auch für die Nitratberichte herangezogen werden. Der nächste Nitratbericht wird 2024 erstellt.

7 Anhang: Methodik der Indikatorenberechnung

7.1 Emissionsindikatoren

7.1.1 Viehbestand

Für die Berechnung der Viehbesatzdichte in Großvieheinheiten (GV) wurden die Umrechnungsschlüssel in Tabelle 1 genutzt, die entsprechend der vorliegenden Verfahrensdifferenzierung aus Veröffentlichungen der KTBL und des Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LFULG) zusammengestellt wurden.

Tabelle 6: Verwendete GV-Schlüssel

Verfahren	GV
Milchkühe	1,2000
Kälber	0,3000
Milchfärsen	0,6000
Weibliche Mastrinder	0,7000
Männliche Mastrinder	0,7000
Mutterkühe	1,2000
Männliche Rinder > 2 Jahre	1,2000
Sauen	0,3000
Aufzuchtferkel	0,0300
Mastschweine	0,1400
Eber	0,3000
Mutterschafe und übrige erwachsene Schafe	0,1000
Lämmer	0,0500
Ziegen	0,1000
Großpferde	1,0000
Kleinpferde und Ponys	0,5000
Legehennen	0,0034
Masthähnchen und -hühnchen	0,0015
Junghennen	0,0014
Gänse	0,0084

Verfahren	GV
Enten	0,0040
Puten-Hähne	0,0222
Puten-Hennen	0,0125
Gehegewild	0,1000
Kaninchen	0,0250
Strauße	0,0700
Pelztiere	0,0020

Quelle: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

7.1.2 Bodenbedeckung (C-Faktor)

Der C-Faktor wurde auf Grundlage von InVeKoS-Daten nach der Methode von Auerswald et al. (2021) abgeleitet. Da in der Publikation nicht alle Kulturarten aus dem InVeKoS abgedeckt sind, wurden zusätzlich C-Faktoren des HLNUG¹ berücksichtigt. Für einige Kulturarten geben Auerswald et al. (2021) C-Faktoren in Abhängigkeit der Bewirtschaftung (konventionelle Saat, Mulchsaat, Direktsaat) an. Angaben des Statistischen Bundesamts zur Häufigkeit der jeweiligen Verfahren für die einzelnen Kulturen sind auf Landesebene für das Jahr eingeflossen (DESTATIS, 2017). Angaben aus dem InVeKoS zum Anbau von Zwischenfrüchten, Randstreifen oder Untersaaten wurden in diesem Bericht noch nicht berücksichtigt.

7.2 Modellregionen

In den Modellregionen wird auf repräsentativen Betrieben ein bundesweit einheitliches Messprogramm bestehend aus rechnerischen und analytischen Indikatoren angewendet. Um frühzeitig Prognosen zu Maßnahmenwirkungen ableiten und einen direkten Bezug zur Bewirtschaftung herstellen zu können, konzentriert sich das Untersuchungsprogramm auf die Bereiche Bodenoberfläche, Wurzelzone sowie Sicker- und Dränwasser in der ungesättigten Bodenzone. Die Erhebungen dienen zunächst einer differenzierten Erfassung des Ist-Zustandes und der spezifischen bewirtschaftungs- und standortortbedingten Faktoren, welche eine Nitratbelastung oder Eutrophierung bedingen. Hieraus kann bereits eine erste Prognose auf die voraussichtliche Wirkung bestimmter Maßnahmen getroffen werden. Im zeitlichen Verlauf werden dann auch Entwicklungstrends zunehmend betrachtet werden können.

¹ <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/c-faktor>

Die Modellregionen repräsentieren stichprobenartig für die Nitrat- und Phosphatbelastung bedeutungsvolle agrarstrukturelle Räume. Bei der Verortung der Modellregionen werden sowohl belastete Bereiche gemäß § 13a DüV sowie unbelastete Gebiete einbezogen.

Als Modellbetriebe werden sechs oder zwölf Vollerwerbsbetriebe mit für die Modellregion repräsentativer landwirtschaftlicher Produktionsausrichtung ausgewählt. Die Modellbetriebe innerhalb einer Modellregion weisen eine relativ homogene Struktur (Produktionsschwerpunkt, Anbaufolge, Bodeneigenschaften) auf, sodass die Anzahl der Betriebe im Sinne einer gerichteten Stichprobe als statistische Wiederholung gewertet werden kann. Durch diese restriktive Stichprobenauswahl soll sichergestellt werden, dass die Variation der Bewirtschaftung und damit der Sickerwasserqualität zwischen den Betrieben möglichst gering ist, um Auswirkungen einer geänderten Bewirtschaftungsweise auf die Nährstofffrachten mit höherer Wahrscheinlichkeit feststellen zu können. Von jedem Modellbetrieb werden für die Durchführung des Messprogramms zwölf repräsentative Ackerschläge bereitgestellt, die bestimmte Kriterien erfüllen.

Das in den Modellregionen zur Anwendung kommende Messprogramm beinhaltet die Erhebung sowohl rechnerischer (Stoffstrombilanz, Schlagbilanzen, Fruchtbilanzen) als auch analytischer Indikatoren (Frühjahrs-, Ernte- und Herbst- $N_{\min}$ -Werte, Nitrattiefenprofile und, sofern Dränsysteme vorhanden sind, Dränagemessungen) (Abbildung 31). Das Messprogramm ist modular aufgebaut, sodass z. B. Nitrattiefenprofile bei gedränten Flächen durch Dränmessungen ergänzt oder ggf. ersetzt werden können. Die Indikatoren werden auf der kleinsten räumlichen Einheit, dem Testschlag bzw. dem Modellbetrieb, erhoben und im Rahmen der Auswertungen bis hin zur Skala einer oder mehrerer Modellregionen aggregiert. Dabei repräsentieren die Indikatoren unterschiedliche vertikale Ebenen von der Bodenoberfläche über die Wurzelzone bis zum Sicker- und Dränwasser in der ungesättigten Bodenzone.

Um eine einheitliche Erhebung und regionsübergreifende Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, werden Pflichtenhefte verwendet, die z. B. die Auswahl von Testflächen, die Methoden bei der Datenerhebung sowie Regeln bei der Datenverarbeitung vorgeben.

Das Messprogramm wird in ausgesuchten Teilbereichen um weiterführende hydrogeologische Untersuchungen zur Aufklärung der zeitlichen und räumlichen Zusammenhänge zwischen Emissionen und Immissionen ergänzt werden. Die konkrete Methodik kann erst nach der endgültigen Verortung der Modellregionen festgelegt werden.

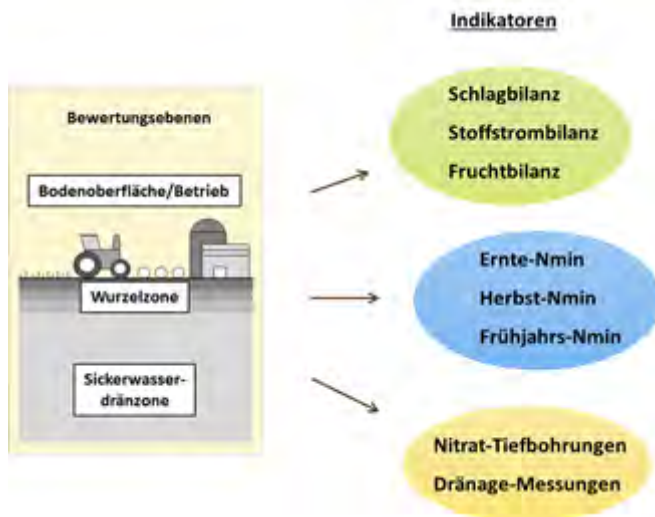


Abbildung 31: In den Modellregionen durchgeführtes Messprogramm mit Zuordnung zur vertikalen Bezugsebene.

Quelle: JKI.

Die Auswertung der Daten ist in zwei Bereiche untergliedert. Die einzelbetriebliche Auswertung umfasst in allen Modellregionen die Analyse der Schlagbilanzen, der Hoftorbilanzen, N_{min}-Messungen sowie der Tiefbohrdaten und Dränmessungen (nur dort wo relevant). Aufbauend auf den einzelbetrieblichen Analysen werden die Ergebnisse auf die Ebene der Modellregionen nach Produktionsrichtungen (Ackerbau, Tierhaltung, Gemüsebau) aggregiert und so für die Berichterstattung zusammengefasst.

In eutrophierten Gebieten werden Modellregionen in Einzugsgebieten von Oberflächengewässern eingerichtet. Das Messprogramm wird auf zwei Ebenen basieren. Auf der ersten Ebene wird ein Messprogramm entsprechend dem Vorgehen beim Nitrat-Monitoring auf Schlag- bzw. Betriebsebene angewendet. Die zweite Ebene besteht aus hydrologischen Untersuchungen in Oberflächengewässern und der Charakterisierung des Einzugsgebiets von Messstellen. Die genaue Struktur dieser Modellregionen und das anzuwendende Messprogramm werden im Zuge der Weiterentwicklung des Monitoringkonzeptes fortlaufend konkretisiert.

Literaturverzeichnis

Auerswald K, Ebertseder F, Levin K, Yuan Y, Prasuhn V, Plambeck NO, Menzel A, Kainz M (2021) Summable C factors for contemporary soil use. Soil and Tillage Research 213:105155. doi: 10.1016/j.still.2021.105155

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022) HÜK250: Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland, zu finden in <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Huek200/huek200_projektbeschr.html> [zitiert am 11.6.2022]

CDC [DWD Climate Data Center] (2023) Historische tägliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland, zu finden in <https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/more_precip/historical/> [zitiert am 23.10.2023]

DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2017) Agrarstrukturerhebung (ASE) 2016: Fachserie 3 Reihe 2.2.1 und Reihe 2.2.4, zu finden in <https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-3.html?nn=206136> [zitiert am 23.10.2023]

DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2023) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, zu finden in <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/_inhalt.html> [zitiert am 13.10.2023]

Deutscher Wetterdienst (2023) Raster der Tagessumme des Niederschlags in mm für Deutschland – HYRAS-DE-PRE, zu finden in <https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras_de_pre/hyras_de_pre.html> [zitiert am 23.10.2023]

Mielenz H, Dieser M, Stock O, Zieseniß S, Kücke M, Greef JM, Stever-Schoo B, Julius Kühn-Institut (2021) Abschlussbericht: Demonstrationsvorhaben „Indikatoren zur Früherkennung von Nitratfrachten im Ackerbau“

- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), hg. v. US Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook, zu finden in <https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf> [zitiert am 10.10.2023]
- Sanders J, Heß J (2019) Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft, Johann Heinrich von Thünen-Institut. Thünen Report, zu finden in <https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_65.pdf> [zitiert am 14.10.2023]
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2015) Zensus 2011, Methoden und Verfahren, hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, zu finden in <https://www.zensus2011.de/DE/Home/home_node.html> [zitiert am 20.10.2023]
- Zinnbauer M, Eysholdt M, Henseler M, Kreins P, Herrmann F, Kunkel R, Nguyen H, Tetzlaff B, Venohr M, Wolters T, Wendland F (2023) Quantifizierung aktueller und zukünftiger Nährstoffeinträge und Handlungsbedarfe für ein deutschlandweites Nährstoffmanagement – AGRUM-DE, hg. v. Thünen-Institut. Thünen-Report, zu finden in <https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_108.pdf> [zitiert am 22.11.2023]