

**Quantifizierung der Stickstoff- und Phosphorein-
träge ins Grundwasser und in die Oberflächenge-
wässer in Rheinland-Pfalz mit eintragspfadbezoge-
ner und regionaler Differenzierung**

Auszug des Endberichts

Stand 07.04.2021

*Prof. Dr. Frank Wendland, Dr. Frank Herrmann, Dr. Ralf Kunkel, M.Sc. Phuong Ta,
Dr. Björn Tetzlaff & M.Sc. Tim Wolters*

Forschungszentrum Jülich
Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG 3: Agrosphäre)
52425 Jülich

Tel.: 02461 61-3165
E-mail: f.wendland@fz-juelich.de

Auszug des Endberichts

Kapitel 13 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war eine flächendeckende und zugleich räumlich hoch aufgelöste und eintragspfadspezifische Modellierung der N- und P-Einträge in die Grund- und Oberflächengewässer in Rheinland-Pfalz. Ermittelt wurden hierzu die N-Einträge über sechs diffuse Eintragspfade (Erosion, Abschwemmung, Dränagen, Grundwasser, natürlicher Zwischenabfluss, atmosphärische Deposition auf Gewässerflächen) und über fünf punktförmige Eintragspfade (kommunale Kläranlagen, industriell-gewerbliche Direkteinleiter, Kleinkläranlagen, Mischwasserentlastung und Regenwasserkanäle). Auf diese Weise wurden zum einen die Hauptemittenten und zum anderen die räumlichen Belastungsschwerpunkte und damit Vorranggebiete für die Umsetzung von Nährstoffminderungsmaßnahmen identifiziert. Darüber hinaus wurde der N-Reduktionsbedarf zur Erreichung einer Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO₃/l ermittelt.

Für die Einbeziehung der N- und P-Emissionen aus der Landwirtschaft wurden am Thünen – Institut mit dem agrarökonomischen Modell RAUMIS berechnete landwirtschaftliche N- und P-Flächenbilanzüberschüsse aufgesetzt. Die N- und P-Eintragsmodellierung erfolgte basierend auf dem am Forschungszentrum Jülich entwickelten Programmpaket mGROWA-DENUZ-WEKU-MEPhos. Die für die Modellierung benötigten Datengrundlagen wurden über das Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz zur Verfügung gestellt und umfassten hydrologische, pedologische und hydrogeologische Datengrundlagen im Landesmaßstab. Die Modellrechnungen zu den diffusen N- und P-Einträgen erfolgten für die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz mit einer räumlichen Auflösung von 100m x 100m, so dass jede Modellrechnung konsistent für jeweils ca. 1,985 Mio. Einzelrasterzellen durchgeführt wurde.

Über den Projektfortschritt und die erzielten Ergebnisse wurde auf regelmäßig stattfindenden Arbeitsreffen berichtet, was maßgeblich zum Erfolg des Projektes beigetragen hat. So konnte nicht nur das regionale Expertenwissen schon während der jeweils aktuellen Modellierungsschritte einbezogen werden, sondern auch Inkonsistenzen oder Lücken in den Datengrundlagen frühzeitig erkannt und behoben werden.

- 1. Mit der Wasserhaushaltsmodellierung wurde die räumliche Variabilität der hydrologischen Verhältnisse in Rheinland-Pfalz und die damit verbundene regional unterschiedliche Relevanz der einzelnen Abflusskomponenten für den Nährstoffeintrag abgebildet.*

Für eine nach den Abflusskomponenten differenzierte Quantifizierung der diffusen Nährstoffeinträge in die Oberflächengewässer wurde das Wasserhaushaltsmodell mGROWA eingesetzt. Vor dem Hintergrund, dass die Modellierung die regional typische hydrologische Situation abbilden sollte, wurden die in täglicher Auflösung vorliegenden mGROWA-Modellergebnisse der hydrologischen Referenzperiode 1981-2010 zu langjährigen Mittelwerten aggregiert. Das Ergebnis der Wasserhaushaltsmodellierung dokumentiert die räumliche Variabilität der hydrologischen Verhältnisse und die damit verbundene regional unterschiedliche Relevanz der einzelnen Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, natürlicher Zwischenabfluss, Abfluss aus Dränagen, urbaner Direktabfluss und Grundwasserabfluss) für den Nährstoffeintrag in die Gewässer.

Nur in einigen Bereichen des Oberrheingebiets kann das in den Boden einsickernde Niederschlagswasser ungehindert dem Aquifer zufließen, so dass die Grundwasserneubildungshöhe weitestgehend der Gesamtabflusshöhe entspricht. In den meisten Festgesteinsregionen wird mehr als 60% des Gesamtabflusses über den natürlichen Zwischenabfluss abgeführt, für einige Festgesteinsregionen ergeben sich mit bis zu mehr als 80% sogar noch höhere Werte. Künstliche Entwässerungssysteme (Dränagen, Gräben), sind dagegen in Rheinland-Pfalz relativ wenig verbreitet.

Die Validierung der Modellergebnisse zum Wasserhaushalt hat gezeigt, dass insgesamt 50 von den zur Verfügung stehenden Pegel für die Validierung verwendet werden konnten. Für die meisten dieser Pegel wurde bei der Validierung eine Abweichung hohe Modellgüte (beim Gesamtabfluss PBIAS -2.8 %, NSE 0.91; bei der Grundwasserneubildung PBIAS -6.8 %, NSE 0.74) erzielt, so dass die ermittelten Abflusshöhen als eine geeignete Grundlage für eine nach den Austragspfaden differenzierende Modellierung der N- und P- Einträge in die Vorfluter angesehen wurden.

2. Für die Modellanalysen zu den diffusen N-Einträgen ins Grundwasser und die Oberflächengewässer wird auf Bilanzüberschüsse aus der Landwirtschaft aufgesetzt.

Die mittlere Stickstoffbilanz der Landwirtschaft für die Periode 2014 – 2016 wurde vom Thünen-Institut mit dem Modell RAUMIS ermittelt und ist bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche in den Gemeinden. In vielen Gemeinden liegen die Stickstoffbilanzüberschüsse zwischen 25-50 kg N/(ha·a). In einer Reihe von Gemeinden, vor allem im Westerwald und im Pfälzerwald, ergeben sich relativ geringe N-Bilanzüberschüsse der Landwirtschaft (< 25 kg N/(ha·a). Extensive Grünlandregionen sowie geringe Viehbesatzdichten erklären das niedrige Überschussniveau. Für eine Reihe von Gemeinden, vor allem in der Westeifel, werden hohe N-Bilanzüberschüsse (> 50 kg N/(ha·a) ausgewiesen. N-Bilanzüberschüsse von > 80 kg/(ha·a) sind auf wenige Gemeinden im Oberrheingebiet, in denen der Sonderkulturanbau dominiert, beschränkt. Die Gesamtmenge des N-Bilanzüberschusses der Landwirtschaft liegt bei ca. 31.100 t N/a.

3. Die atmosphärische N-Deposition ist eine weitere bedeutsame N-Quelle.

In landwirtschaftlich genutzten Regionen stellen atmosphärische Stickstoffeinträge über die trockene und nasse Deposition neben den N-Bilanzüberschüssen aus der Landwirtschaft eine weitere diffuse Eintragsquelle dar. In bewaldeten Regionen ist die atmosphärische Deposition neben dem Stoffumsatz im Boden die wichtigste diffuse N-Quelle für Stickstoffeinträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer. Als atmosphärische N-Deposition wurden die von Schaap et al. (2018) ermittelten Werte der Periode 2013-2015 berücksichtigt. Vor allem in den bewaldeten Kammlagen der Mittelgebirge können atmosphärische N-Depositionen von mehr als 20 kg/(ha·a) auftreten. Im Oberrheingebiet übersteigen die Werte dagegen selten 10 kg N/(ha·a). Aufsummiert über die Landesfläche von Rheinland-Pfalz liegt die atmosphärische Deposition bei ca. 21.900 t N/a.

4. Der Nitratabbau im Boden ist in Rheinland-Pfalz regional bedeutsam.

Das Ausmaß des Nitratabbaus im Boden wird im DENUZ – Modell über die Verweilzeit des Sickerwassers im Boden sowie durch das Nitratabbauvermögen des Bodens bestimmt. Danach führt die Denitrifikation im Boden zu einer nur geringen Reduzierung der verlagerbaren N-Menge (insgesamt ca. 42.000 t N/a) im Boden in den Regionen, für welche geringe Verweilzeiten des Sickerwassers im durchwurzelten Boden ermittelt worden sind. In der Regel sind dies die Regionen, für die nur geringe Gesamtsummen aus landwirtschaftlichem N-Bilanzüberschuss und atmosphärischer Deposition berechnet wurden, wie z.B. für die Eifel. Dort führt die Denitrifikation im Boden zu einer Reduzierung der N-Überschüsse von maximal lediglich ca. 25%. Dagegen führen die langen Verweilzeiten des Sickerwassers im Boden in den großen Niederungsregionen entlang des Rheins (Oberrheingebiet, Neuwieder Becken) dazu, dass vielerorts mehr als 75% der ausgewiesenen N-Überschüsse im Boden denitrifiziert werden können. Durch den Nitratabbau im Boden reduzieren sich die verlagerbaren N-Mengen im Boden um ca. 13.600 t N/a, so dass der N-Austrag aus dem Boden bei ca. 28.400 t N/a liegt.

5. Die N-Einträge über Drainage sind insbesondere in Niederungsregionen bedeutsam.

Bei den N-Einträgen in die Oberflächengewässer über Drainage treten vor allem landwirtschaftlich genutzte Aueböden und Pseudogleye in Niederungsregionen hervor. Insgesamt ist dieser Eintragspfad in Rheinland-Pfalz von untergeordneter Bedeutung. Dränierten Flächen tragen dadurch nur ca. 590 t N/a zum gesamten N-Eintrag in die Oberflächengewässer bei.

6. Der natürliche Zwischenabfluss ist in Rheinland-Pfalz der bedeutsamste diffuse N-Eintragspfad.

Der Untergrund von Rheinland-Pfalz besteht größtenteils aus Festgestein. Dort, wo wenig wasserwegsamem Gesteinsschichten (paläozoische Schiefer, Grauwacken, Schluff- und Tonsteine etc.) vorherrschenden, werden erhebliche Mengen des in den Boden einsickernden Niederschlagswassers über den natürlichen Zwischenabfluss abgeführt. Entsprechend hoch ist dort die N-Menge, die über den natürlichen Zwischenabfluss in die Vorfluter gelangt. Vor allem im Westteil der Eifel kann es über diesen Austragspfad zu N-Einträgen von zum Teil mehr als 25 kg N/(ha·a) kommen. Im Pfälzerwald und in anderen Festgesteinsregionen liegen die N-Einträge über diesen Austragspfad jedoch bei häufig unter 10 kg N/(ha·a). Aufsummiert über die Flächen mit natürlichem Zwischenabfluss liegen die N-Einträge dadurch bei ca. 16.100 t N/a. Da der natürliche Zwischenabfluss eine Funktion der natürlichen Standortbedingungen ist, sind die Eingriffsmöglichkeiten des Menschen, z.B. zur Erhöhung der Verweilzeiten im Boden und damit der Nitratabbauraten im Boden, gering.

7. Reduzierte Aquifere mit geringen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers und guten Nitratabbaubedingungen treten in Rheinland-Pfalz nur regional begrenzt auf.

Ein Teil der N-Austräge aus dem Boden (ca. 11.900 t N/a) sowie der N-Austrag ins Grundwasser aus Kanalleckagen (ca. 310 t N/a) wird über die Grundwasserneubildung in das Grundwasser eingetragen und innerhalb des Aquifers zu einem Oberflächengewässer transportiert. Je nach dem vorherrschenden Denitrifikationsvermögen im Aquifer, können hierbei Nitratabbauprozesse ablaufen. Dieser reaktive N-Transport im Grundwasser wird mit dem WEKU-Modell in Abhängigkeit von den Grundwasserverweilzeiten, den N-Einträgen in den Aquifer und den Nitratabbaubedingungen im Aquifer flächendifferenziert modelliert.

Aquifere mit guten Nitratabbaubedingungen im Grundwasser treten in Rheinland-Pfalz jedoch nur regional begrenzt in einigen Niederungsregionen des Oberrheingebiets auf. Das ins Grundwasser eingetragene Nitrat wird in Rheinland-Pfalz daher auf dem Weg zum Vorfluter nur in wenigen Regionen abgebaut. Folglich entsprechen die grundwasserbürtigen N-Austräge in die Oberflächengewässer in weiten Landesteilen den N-Einträgen ins Grundwasser. Da der Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss häufig gering ist, liegt der grundwasserbürtige N-Eintrag in die Vorfluter bei insgesamt ca. 8.800 t N/a entspricht. Durch den Nitratabbau im Aquifer werden die N-Einträge in den Aquifer also um lediglich ca. 3.400 t N/a reduziert.

8. Die diffusen N-Einträge in die Vorfluter über Erosion, Abschwemmung und die atmosphärische Deposition sind von nur untergeordneter Bedeutung.

Die Eintragspfade Grundwasser und vor allem natürlicher Zwischenabfluss dominieren in allen Landschaftseinheiten und Flussgebieten von Rheinland-Pfalz. Ca. 76% der im Vorfluter befindlichen N-Gesamtmenge gelangen über diese beiden Eintragspfade in die Vorfluter. Die diffusen Eintragspfade Erosion und Abschwemmung treten dagegen mit ca. 860 t N/a bzw. 230 t N/a genauso in den Hintergrund wie die direkte N-Deposition auf Gewässerflächen mit ca. 270 t N/a.

9. Die punktförmigen N-Einträge in die Vorfluter machen ca. 18 % der gesamten N-Fracht in den Vorflutern aus.

Als N-Einträge aus punktförmigen Quellen wurden kommunale Kläranlagen, industrielle Kläranlagen, Kleinkläranlagen, Mischwassersysteme und Regenwasserkanäle im Trennsystem berücksichtigt. Die Gesamtsumme der punktförmigen N-Einträge liegt bei ca. 5.900 t N/a. Dabei stellen die kommunalen Kläranlagen mit ca. 3.150 t N/a die größte punktförmige N-Eintragsquelle dar. Mit einem Verhältnis von punktuellen zu diffusen Eintragsquellen von ca. 18% zu 82% liegt der Schwerpunkt des N-Eintrags in die Vorfluter aber eindeutig auf Seiten der diffusen Eintragspfade.

10. Modellierte N- Einträge in die Flüsse wurden mit Messwerten im Vorfluter abgeglichen.

Um die modellierten N -Einträge in die Vorfluter mit im Fluss gemessenen Werten vergleichen zu können, wurden alle signifikanten Einträge aus diffusen und punktuellen Quellen erfasst. Für die Plausibilitätsüberprüfung der modellierten mittleren langjährigen N-Einträge in die Oberflächengewässer standen für Rheinland-Pfalz langjährige pegelbezogene Messwerte (Abflussmenge und N-Konzentration) von 44 Einzugsgebieten zur Verfügung. Die zur Validierung verwendbaren pegelbezogenen Einzugsgebiete wiesen ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,979$ auf. Vor dem Hintergrund der Größe und Heterogenität des betrachteten Untersuchungsgebiets stellt dies eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten N-Frachten dar.

11. Nach MEPhos-Berechnungen erreicht der überwiegende Teil der P-Einträge die Oberflächengewässer über die Pfade kommunale Kläranlagen, Erosion, Mischwasserentlastung, Industrie, Grundwasser und Zwischenabfluss.

Insgesamt werden Gesamteinträge von P_{ges} von 924 t/a modelliert. Mit einem Verhältnis diffuser zu punktuellen Quellen von 45 zu 55% liegt der Schwerpunkt des P-Eintrags auf den punktuellen Quellen und somit auf der Siedlungswasserwirtschaft. Mit 32% oder 292 t/a stellen die kommunalen Kläranlagen im Vergleich aller Eintragspfade den bedeutsamsten P-Emittenten dar. Der zweitgrößte Eintragspfad ist die Erosion mit 206 t/a bzw. 22 %. Die P-Einträge über Mischwasserentlastungen, industriell-gewerbliche Direkteinleiter, Grundwasser und Zwischenabfluss liegen in einer ähnlichen Größenordnung und schwanken zwischen 71 t/a bzw. 8% und 94 t/a bzw. 10 %. Über die restlichen fünf Eintragspfade gelangen ca. 11% bzw. 104 t/a in die Oberflächengewässer in Rheinland-Pfalz. Regional kann die Bedeutung einzelner Eintragspfade jedoch stärker variieren. Die Erosion stellt vor allem in Teilen der Westeifel sowie im Alzeyer Hügelland und in Rheinhessen die dominierende P-Quelle dar.

12. Die modellierten P- Einträge in die Flüsse zeigen eine gute und valide Übereinstimmung mit den Messwerten im Oberflächengewässer.

Um die Güte der Modellergebnisse zu überprüfen, wurde ein Vergleich der Gesamteinträge über alle Eintragspfade mit mehrjährigen mittleren Frachten durchgeführt, die für Gütemessstellen ermittelt wurden. Hierzu mussten im Zeitraum 2000-2020 mindestens 50 Messungen des Güteparameters P_{ges} sowie Abflüsse in täglicher Auflösung an einem nahe gelegenen Abflusspegel zur Verfügung stehen.

Der Vergleich der Modellergebnisse mit Gewässerfrachten für insgesamt 44 Gütemessstellen zeigt eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Modellergebnissen. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei $R^2=0,97$. Vor dem Hintergrund der Größe und Heterogenität des

betrachteten Untersuchungsgebiets stellt dies eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten P-Frachten dar.

13. Die abgeschätzten Einträge von eutrophierungswirksamem P stammen überwiegend aus der Siedlungswasserwirtschaft.

Die Abschätzung des Eintrags von gelöstem und damit unmittelbar eutrophierungswirksamem ortho-Phosphat-Phosphor ergibt einen Gesamteintrag in Höhe von etwa 593 t/a, was einem Anteil von 64 % des P_{ges} -Eintrags in Rheinland-Pfalz entspricht. Der Anteil aller Punktquellen beträgt beim Parameter P_{ges} 55 % und beim Parameter $P_{\text{gelöst}}$ 62 %. Die Relevanz von Erosion als einem der diffusen Eintragspfade beträgt beim Parameter P_{ges} 22 % und beim Parameter $P_{\text{gelöst}}$ 4 %. Die Anteile der abflussgebundenen diffusen Quellen (Dränage, grundwasserbürtiger Abfluss, Zwischenabfluss und Abschwemmung) sind mit 22 % für P_{ges} und 32 % für den Parameter $P_{\text{gelöst}}$ an dem jeweiligen Gesamteintrag hoch. Der Anteil der Kläranlagen an dem Phosphoreintrag ist sowohl für P_{ges} (32 %) als auch für $P_{\text{gelöst}}$ (39 %) ebenfalls hoch.

14. Die Nitratkonzentration im Sickerwasser ist ein wichtiger Indikator zur Beurteilung, ob das Grundwasserschutzziels von 50 mg NO_3/l erreicht werden kann.

Durch Kombination der berechneten N-Austräge aus dem Boden mit der Sickerwasserrate wurde im DENUZ - Modell die potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser berechnet. Diese gibt an, mit welcher mittleren Konzentration das aus dem Boden ausgetragene Nitrat mit der Grundwasserneubildung ins Grundwasser bzw. über die Direktabflusskomponenten in die Oberflächengewässer eingetragen wird. Nitratkonzentrationen im Sickerwasser von mehr als 50 mg NO_3/l und mehr errechneten sich vor allem für weite Bereiche des Oberrheingebiets, der Vorderpfalz und des Neuwieder Beckens. Relativ geringe Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ergeben sich dagegen für die Höhenlagen der Mittelgebirge. Neben der extensiveren Landnutzung sind dort auch die Sickerwasserhöhen von 300 mm/a und mehr ausschlaggebend.

15. Hohe Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ergeben sich in Rheinland-Pfalz in Regionen mit hohe N-Bilanzüberschüsse der Landwirtschaft und in Regionen mit geringer Sickerwasserbildung.

Hohe Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ergeben sich zum einen in Regionen, in denen hohe N-Bilanzüberschüsse der Landwirtschaft auftreten. Aufgrund der Niederschlagsarmut kommt es in vielen Bereichen des Oberrheingebiets und der Vorderpfalz zu einer nur geringen Sickerwasserbildung von unter 100 mm/a. Dort reicht dann bereits ein N-Austrag aus dem Boden von 10 kg N/(ha·a), um eine Nitratkonzentration im Sickerwasser von fast 50 mg NO_3/l zu erreichen. Schon bei N-Austrägen aus dem Boden von 20 kg N/(ha·a) würde der EU-Grenzwert für Nitrat im Grundwasser (50 mg NO_3/l) deutlich überschritten.

16. Es wurde ein hypothetischer N- Minderungsbedarf abgeleitet, der erbracht werden müsste, um das Schutzziel für das Grundwasser (50 mg NO_3/l) zu erreichen.

Die Nitratkonzentration im Sickerwasser ist ein guter Indikator zur Beurteilung, ob das Grundwasserschutzziel von 50 mg NO_3/l in einer Region erreicht werden kann bzw. zur Abschätzung der hierfür erforderlichen Reduktion der N-Austräge aus dem Boden. Eine mittlere langjährige Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO_3/l wurde als ein Maß für die maximal tolerierbaren N-Austräge aus dem Boden angenommen, die nicht überschritten werden dürfen, wenn eine Nitratkonzentration im Grundwasser von unter 50 mg NO_3/l nachhaltig garantiert

werden soll. Bei diesem Wert ist sichergestellt, dass der EU-Schwellenwert für Nitrat in allen Fällen eingehalten werden kann, d.h. auch bei Aquiferen, bei denen die Denitrifikationskapazität verbraucht ist bzw. bei oxidierten Grundwässern ohne Denitrifikationskapazität.

Unter der Prämisse einer konstanten mittleren Sickerwasserrate und einem konstanten Denitrifikationspotenzial im Boden wurde durch eine "Rückwärtsrechnung" der hypothetisch maximal zulässige N-Austrag aus dem Boden berechnet, bei dem die Nitratkonzentration im Sickerwasser 50 mg NO₃/l nicht übersteigt. In Regionen mit geringer Sickerwasserbildung (Punkt 15) ist der hypothetisch maximal zulässige N-Austrag aus dem Boden sehr viel niedriger als in Regionen mit hoher Sickerwasserbildung.

Durch einen Vergleich des hypothetisch maximal zulässigen N-Austrags aus dem Boden mit dem ausgewiesenen N-Austrag aus dem Boden wurde der N-Minderungsbedarf bestimmt. Hierbei errechnete sich ein N-Minderungsbedarf zwischen 10 und 50 kg N/(ha·a). Insgesamt liegt der N-Reduktionsbedarf bei ca. 5.500 t N/a.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch der N - Minderungsbedarf stark von der Sickerwasserhöhe beeinflusst wird (siehe Punkt 15), die in die Ermittlung der Nitratkonzentration im Sickerwasser eingeht. Bei der Dimensionierung von N-Minderungsmaßnahmen im Bereich Landwirtschaft sollte die hydrologische Standortsituation in Rheinland-Pfalz daher Berücksichtigung finden.

17. Hohe Verweilzeiten in der ungesättigten Zone können die Nitratkonzentrationen im Grundwasser selbst bei sinkenden N-Überschüssen kurz- und mittelfristig ansteigen lassen.

Für die Bodenzone wurden Verweilzeiten im Sickerwasser im Bereich von etwa 3 Monaten bis etwa 2,5 Jahren berechnet. Besonders geringe Verweilzeiten ergeben sich dort, wo hohe Sickerwasserraten und Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität korrelieren. Besonders hohe Verweilzeiten ergeben sich dort, wo bindige Böden (hohe nutzbare Feldkapazitäten) in Kombination mit äußerst geringen Sickerwasserhöhen auftreten.

Die berechneten Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung sowie die Gesamtzeiten, die das Sickerwasser benötigt, um von der Erdoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche zu gelangen, umfassen eine Wertespanne zwischen weniger als 3 Monaten und mehr als 25 Jahren. Insbesondere in den mächtigen bindigen Deckschichten der Lockergesteinsregionen können bei großen Flurabständen Verweilzeiten von mehr als 25 Jahren auftreten. Aber auch in Festgesteinsregionen können bei hohen Flurabständen Verweilzeiten von bis zu 10 Jahren auftreten. Deutlich geringere Verweilzeiten von bis zu einem halben Jahr ergeben sich in den Festgesteinsregionen dagegen für Bereiche, wo hohe Sickerwasserraten in Kombination mit durchlässigen Gesteinen (z.B. Sandsteine, Kalksteine) auftreten.

Lange Verweilzeiten in der ungesättigten Zone können also der Grund dafür sein, dass umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen bislang nicht den gewünschten Effekt hatten. Über die Verweilzeitenanalyse kann begründet werden, warum die eingeleiteten N-Minderungsmaßnahmenprogramme zwar geeignet sind, die Ziele der WRRL langfristig zu erreichen, jedoch aufgrund der hydrodynamischen Gegebenheiten in der ungesättigten Zone eine Erreichung der Ziele bis 2021 (und ggf. sogar 2027) nicht möglich ist.