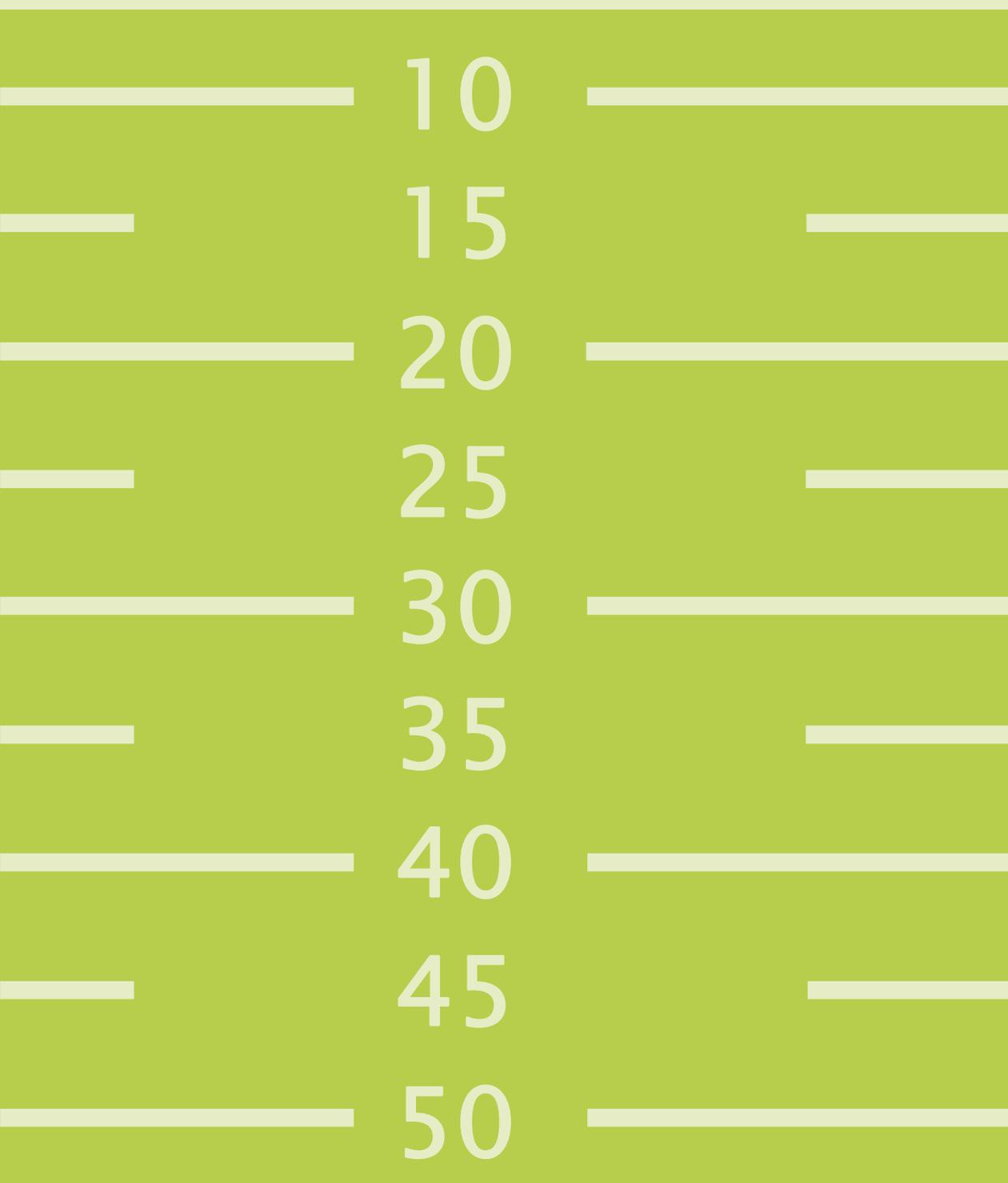




Forschungsprojekt Lysimeter

Technischer
Endbericht
2024



 Bundesamt
für Wasserwirtschaft

 Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Regionen und Wasserwirtschaft



Forschungsprojekt Lysimeter

Technischer Endbericht 2024

Impressum

Medieninhaber: Land Oberösterreich

Herausgeber:

Amt der Oö. Landesregierung
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung Wasserwirtschaft
Kärntnerstraße 12, 4021 Linz
Tel.: (0732) 77 20 - 124 24
Fax.: (0732) 77 20 - 21 28 60
E-Mail: ww.post@ooe.gv.at

Projektleiterin: Elisabeth Hartinger MSc Abteilung
Wasserwirtschaft

Autoren:

Dipl.-Ing. Dr. Max Kuderna
Dipl.-Ing. Christine Weinberger
wpa Beratende Ingenieure GmbH, 1090 Wien

Dipl.-Ing. Gabriele Fuchs
1180 Wien

Dipl.-Ing. Thomas Weninger
Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt
Bundesamt für Wasserwirtschaft
3252 Petzenkirchen

Grafik (Umschlag)

Grund- und Trinkwasserwirtschaft
text.bild.media GmbH, Linz (911003)

1. Auflage, Dezember 2024

Informationen zum Datenschutz finden Sie unter
<https://www.land-oberoesterreich.gv.at/datenschutz>

Copyright: Wasserwirtschaft

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung	5
2	Vorgeschichte und Fragestellung	6
3	Methoden	8
3.1	Probenahme.....	8
3.2	Analytik.....	9
3.3	Bilanzierung	9
3.4	Berechnung der Auswaschung	10
4	Bewirtschaftung	11
5	Ergebnisse.....	13
5.1	Wirtschaftsdünger und Ernteproben.....	13
5.2	Stickstoffsalden	15
5.3	Nachlieferbarer Stickstoff	17
5.4	N _{min} -Gehalte im Boden	17
5.5	Nitratauswaschung am tiefgründigen Standort in Eberstalzell.....	19
5.5.1	Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung	20
5.5.2	Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser	20
5.6	Nitratauswaschung am tiefgründigen Standort in Pettenbach	21
5.6.1	Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung	23
5.6.2	Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser	23
5.7	Nitratauswaschung am seichtgründigen Standort in Pucking.....	24
5.7.1	Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung	26
5.7.2	Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser	27
5.8	Nitratauswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg	26
5.8.1	Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung	29
5.8.2	Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser	29
5.9	Vergleich der Nitratauswaschung bzw. Nitratkonzentration im Sickerwasser zwischen den Standorten ...	29
5.10	Einfluss des Stickstoffsaldos auf die Nitratverlagerung	32
5.11	Phosphorbilanzen.....	36
5.12	Phosphatauswaschung	36
6	Hydrographische Auswertung der UZ-Messstelle Pettenbach.....	42
6.1	Allgemeines	42
6.2	Hydrographische Messergebnisse	42
6.3	Grundwasserneubildung	43
6.4	Bodenwasserverhältnisse	48
7	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	52
8	Literatur	53

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Lage der Lysimeter.....6

Abb. 5-1: N_{min}-Gehalte am tiefgründigen Standort in Eberstalzell 17

Abb. 5-2: N_{min}-Gehalte am tiefgründigen Standort in Pettenbach 18

Abb. 5-3: N_{min}-Gehalte am seichtgr. Standort in Pucking 18

Abb. 5-4: N_{min}-Gehalte am mittelgr. Standort in Schwertberg, mgSBg, mgSBu..... 18

Abb. 5-5: Vergleich der N_{min}-Gehalte der Standorte seit Jänner 2015 19

Abb. 5-6: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (tiefgr. EB).....20

Abb. 5-7: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Jänner 2015 (tiefgr. EB) *Juli 2016 nicht gesamtes SW erfasst.....20

Abb. 5-8: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. EB)21

Abb. 5-9: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. EB); *Juli 2016 nicht gesamtes SW erfasst21

Abb. 5-10: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (tiefgr EB)22

Abb. 5-11: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (tiefgr. EB).....22

Abb. 5-12: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (tiefgr. PE).....23

Abb. 5-13: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Juni 2015 (tiefgr. PE) *von Mai bis Sept. 2016 und August 2017 nicht gesamtes Sickerwasser erfasst.....23

Abb. 5-14: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. PE)24

Abb. 5-15: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. PE) von Mai bis Sept. 2016 und August 2017 nicht gesamtes Sickerwasser erfasst.....24

Abb. 5-16: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (tiefgr. PE).....25

Abb. 5-17: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (tiefgr. PE)25

Abb. 5-18: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (seichtgr.).....26

Abb. 5-19: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Jänner 2015 (seichtgründig)26

Abb. 5-20: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (seichtgründig)27

Abb. 5-21: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (seichtgründig)27

Abb. 5-22: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (seichtgründig)28

Abb. 5-23: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (seichtgründig).....28

Abb. 5-24: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (mittelgründig) mgSBg=gestört, mgSBu=ungestört.....29

Abb. 5-25: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (mittelgründig) mgSBg29

Abb. 5-26: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (mittelgründig) mgSBu29

Abb. 5-27: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBg.....30

Abb. 5-28: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBu.....30

Abb. 5-29: N_{min}-Gehalt des Bodens (ab April 2017) und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBg31

Abb. 5-30: N_{min}-Gehalt des Bodens (ab April 2017) und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBu31

Abb. 5-31: Monatliche Niederschlagssummen.....32

Abb. 5-32: Monatliche Sickerwassermengen32

Abb. 5-33: Durchschnittliche monatliche Nitratkonzentrationen.....33

Abb. 5-34: Monatliche Nitrat Auswaschung	33
Abb. 5-35: Summe der als Nitrat ausgewaschenen Stickstoffmenge an den vier Standorten	34
Abb. 5-36: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Eberstanzell	35
Abb. 5-37: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Pettenbach	35
Abb. 5-38: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Pucking	35
Abb. 5-39: Monatliche Phosphatauswaschung	37
Abb. 5-40: Phosphatauswaschung am tiefgründigen Standort in Eberstanzell	37
Abb. 5-41: Phosphatauswaschung am tiefgründigen Standort in Pettenbach	38
Abb. 5-42: Phosphatauswaschung am seichtgründigen Standort in Pucking	38
Abb. 5-43: Phosphatauswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg (gestörter Bodenaufbau)	39
Abb. 5-44: Phosphatauswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg (ungest. Bodenaufbau)	39
Abb. 5-45: Summe der ausgewaschenen P ₂ O ₅ Menge	41
Abb. 6-1: Niederschlags-Jahres- und Monatssummenlinien 2023 (blau) und 2024 (rot) in Pettenbach interpoliert	42
Abb. 6-2: Lufttemperatur-Jahres- und Monatssummenlinie und Monatsmittel 2023 (blau) und 2024 (rot) in Pettenbach interpoliert	42
Abb. 6-3: Globalstrahlungs-Jahressummenlinie und Wochenmittel 2023 (blau) und 2024 (rot) der Station Pettenbach	43
Abb. 6-4: Luftfeuchte- (oben) und Windgeschwindigkeits- (unten) Wochenmittel 2023 (blau) und 2024 (rot)	43
Abb. 6-5: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Pucking 2023 (blau) und 2024 (rot)	44
Abb. 6-6: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Eberstanzell 2023 (blau) und 2024 (rot)	44
Abb. 6-7: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Pettenbach 2023 (blau) und 2024 (rot)	44
Abb. 6-8: Bilanzierte Verdunstungs-Monatssummen 2023 (blau) und 2024 (rot)	44
Abb. 6-9: Profilwassermengen (4Tagesmittel) im Bodenprofil Pettenbach 2023 (blau) 2024 (rot)	45
Abb. 6-10: Monatsbilanzierungen	45
Abb. 6-11: Jahressummen der Versickerungen, bilanzierten Verdunstungen und des Niederschlages der Messstellen Pettenbach (oben), Eberstanzell (Mitte) und Pucking (unten)	46
Abb. 6-12: Monatsmittel der Gesamtprofilwassermengen (grün, rechts skaliert) und Wassermenge des durchwurzelten Profilbereichs (0-40 cm; schwarz, links skaliert) in Pettenbach seit 2013: oben Freiland, unten Lysimeter	47
Abb. 6-13: Profil- und Lufttemperaturen (Daten bis Juni fehlend)	48
Abb. 6-14: gemittelte Profil-Matrixpotentiale (Daten bis Juni fehlend)	49
Abb. 6-15: gemittelte Profil-SWI-Zeitreihen	50
Abb. 6-16: SWI-3 Jahres Diagramme	51

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3-1: Tätigkeiten BAW (IKT)	8
Tab. 3-2: Analysenprogramm	9
Tab. 4-1: Bewirtschaftungsmaßnahmen 2023/2024 (nach Angaben der Bewirtschafter)	11
Tab. 5-1: Erntemengen und Analyseergebnisse der Ernteproben	14
Tab. 5-2: Stickstoffsalden (jahreswirksam) für das Erntejahr 2024	16

Tab. 5-3: Stickstoffsaldo (feldfallend) für das Erntejahr 2024.....	16
Tab. 5-4: Sickerwassermengen und durchschnittliche Nitratkonzentration vom 01.11.23 bis 31.10.24	32
Tab. 5-5: Phosphorbilanzen für das Erntejahr 2024 (P ₂ O ₅)	36
Tab. 5-6: Sickerwasser, P ₂ O ₅ -Verluste und mittlere PO ₄ -Konzentration im Sickerwasser vom 01.11.23 bis 31.10.24	40

1 Zusammenfassung

Seit 1995 werden an drei Standorten in Oberösterreich Freilandlysimeter betrieben, nämlich in Pettenbach (tgPE), Eberstalzell (tgEB) und Pucking (sgPU). In Schwertberg werden seit 2002 zwei weitere Lysimeter betrieben (mgSBg und mgSBu) und ab 2017 im Forschungsprojekt Lysimeter mitbetrachtet. Der Lysimeter in Pettenbach ist seit 2013 zu einer UZ-Messstelle ausgebaut. Eine Wetterstation und die in unterschiedlichen Tiefen angebrachten Saugspannungs-, Wassergehalts- und Temperatursensoren liefern regelmäßig Messwerte. Alle 5 Lysimeter sind in Ackerböden eingebaut, die unter Praxisbedingungen von Landwirten bewirtschaftet werden. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des hydrologischen Jahres 2023/24 dar und vergleicht diese mit den Messreihen der Vorjahre.

Zwei der Lysimeter (tgEB und tgPE) befinden sich an tiefgründigen Standorten, einer an einem seichtgründigen Standort (sgPU) und zwei an einem mittelgründigen Standort (mgSBg und mgSBu). Einer der tiefgründigen Standorte (tgPE) wird seit 2014 nicht mehr (wie zuvor) ausschließlich mit Mineraldünger, sondern auch mit Puten- und Pferdemist oder Biogasgülle gedüngt, der andere (tgEB), wie auch bereits in den vergangenen Jahren, mit Schweinegülle.

Im hydrologischen Jahr 2023/24 war in Pettenbach Winterweizen angebaut und darauffolgend eine Zwischenbegrünung. Auf den anderen Standorten folgte auf eine Zwischenbegrünung Sojabohne. Der Winterweizen wurde entsprechend einer hohen Ertragslage (hoch 2) gedüngt, die Sojabohne erhielt keine oder (in Eberstalzell) nur eine sehr geringe Düngegabe.

Das Auswaschungsgeschehen am tiefgründigen Standort mit Winterweizen (Pettenbach) fand vor allem über den Winter statt (im Herbst war nicht gedüngt) und nahm im Lauf der Vegetationsperiode ab. Dieser Verlauf ist typisch für Jahre, in denen Wintergetreide mit anschließender Begrünung angebaut wird.

An den Standorten mit Soja war nach dem Einarbeiten der Zwischenfrüchte ein Anstieg des mineralischen Stickstoffs zu beobachten. Da nicht oder nur sehr wenig gedüngt worden war, ist dieser wohl auf eine Mineralisierung des zuvor von den Zwischenfrüchten aufgenommenen Stickstoffs zurückzuführen. Am tiefgründigen Standort in Eberstalzell führten hohe Niederschläge im Zeitraum April bis Juni zur Auswaschung eines Teils des gebildeten Nitrats. Niederschlagsmaxima in diesem Zeitraum und eine Nitratverlagerung bei Sommerungen wurde in der Vergangenheit häufig an den Lysimetern beobachtet und sind als typisch zu bezeichnen. An den seicht- und mittelgründigen Standorten in Pucking und Schwertberg blieben starke Niederschläge in diesem Zeitraum jedoch aus und verlief der Sommer im Weiteren sehr trocken. Dies führte insbesondere am seichtgründigen aber auch am mittelgründigen Standort zu einem schwachen Wachstum der Sojabohne und nur einer geringen Aufnahme des mineralisierten Stickstoffs. Unüblich starke Regenereignisse im September verursachten dann dessen Auswaschung. An diesen Standorten fanden 2/3 bis über 3/4 der Nitratauswaschung im September statt.

Immer häufiger auftretende Trockenperioden im Sommer mit darauffolgenden stark erhöhten Niederschlägen im August oder September lassen seicht- und mittelgründige Standorte zunehmend ungünstig für den Anbau von Sommerungen wie Mais, Soja, etc. erscheinen. Die durch solche Witterungsverläufe verursachten Mindererträge stellen dann auch eine immer bedeutender werdende Ursache für Nitratverluste ins Grundwasser dar.

2 Vorgeschichte und Fragestellung

Im Rahmen des Pilotprojekts zur Grundwassersanierung in der Oberen Pettenbachrinne und im Gebiet von Pucking / Weisskirchen (1994 – 2000; Auftraggeber: BMFLUW und Amt der OÖ Landesregierung) wurden vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt des Bundesamts für Wasserwirtschaft (BAW) vier Lysimeteranlagen mit dem Ziel errichtet, die Nitratauswaschung ins Grundwasser im Projektgebiet unter den Vorgaben des Pilotprojekts zu untersuchen. Nach Abschluss des Pilotprojekts im Jahr 2000 beauftragte das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung die wpa Beratende Ingenieure GmbH, jene drei Lysimeteranlagen, die sich auf Ackerstandorten befinden, in Zusammenarbeit mit dem BAW ab September 2001 weiter zu betreiben.

Zwei der Lysimeter befinden sich auf Standorten mit schweren tiefgründigen Böden in der Oberen Pettenbachrinne (tgEB und tgPE, vgl. Abb. 2-1).

Sie liegen im Bereich der Grundwasserkörper der Traun-Enns-Platte, welche ab 13. September 2007 aufgrund der Nitratgehalte als Beobachtungsgebiet ausgewiesen wurde (LGBl Nr. 80/2007). Das dritte Lysimeter in Pucking / Weisskirchen befindet sich auf einem sehr sensiblen Standort am Rande der Traun-Enns-Platte (sgPU). Dieser Standort ist durch einen sehr leichten, skelettreichen Boden gekennzeichnet, der darüber hinaus seichtgründig ist. Eine genaue Beschreibung der Lysimeteranlage und der Charakteristik der Böden an den Lysimeterstandorten enthalten die Berichte des IKT (Klaghofer und Murer, 2001) und der wpa - Beratende Ingenieure (Kuderna et al., 2007).



sgPU: seichtgründig Pucking; tgEB: tiefgründig Eberstalzell;
tgPE: tiefgründig Pettenbach

Abb. 2-1: Lage der Lysimeter

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Fragenkomplexe zur Nitrat- und Phosphat-Auswaschung untersucht:

- Einfluss der Standortverhältnisse auf die Nährstoffauswaschung: zwei tiefgründige Böden wurden einem seichtgründigen Boden gegenübergestellt
- Unterschiede in der Nährstoffauswaschung aufgrund unterschiedlicher Bewirtschaftung: auf den tiefgründigen Böden wurde ein Standort mit Schweinegülle und ein Standort mit Pferde- und Putenmist bewirtschaftet.

Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird eine – soweit unter Praxisbedingungen möglich – gleiche Bewirtschaftungsweise der Standorte angestrebt, wobei auf allen Standorten Maßnahmen zum Grundwasserschutz gesetzt werden (zielgerichtete Düngung, Zwischenbegrünung). Auf allen Standorten ist es das Ziel, zu zeigen, dass unter Praxisbedingungen die Nitratkonzentration im Sickerwasser unter dem Grundwasserschwellenwert von 45 mg/l gehalten werden kann.

Seit dem Frühjahr 2017 sind noch 2 Lysimeteranlagen in Aisting/Schwertberg Teil des Projekts geworden. Die zusätzliche Betrachtung dieses Standortes und der Vergleich mit den Lysimeteranlagen des Landes Oberösterreich unterstützen die Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse sowie das Herausarbeiten der standortspezifischen Besonderheiten.

Die Lysimeteranlagen in Schwertberg werden seit 2002 bzw. 2003 betrieben, seit 2016 sind neue Messgeräte im Einsatz. Der Freiauslauf befindet sich auf 140 cm Tiefe. Zusätzlich sind auf 40 cm, 70 cm, 100 cm und 130 cm Saugkerzen angebracht. Die beiden Lysimeteranlagen unterscheiden sich bei der Messrichtung nicht und wurden im selben Feldstück eingebaut. Eine Anlage wurde mit ungestörtem Boden eingebaut (mgSBu), für die andere wurde das Bodenmaterial ausgegraben und entsprechend der Bodenhorizonte wieder befüllt (mgSBg). Der Boden ist als mittelgründig einzustufen.

3 Methoden

3.1 Probenahme

Von Anfang September 2001 bis Ende Oktober 2024 erfolgte auf den Lysimeterstandorten eine Beprobung des Sickerwassers, das mittels Feldlysimeter mit Freiauslauf und zwei Saugkerzen (Kontrollstellen) gewonnen wurde. Die Einbautiefe der Lysimeter und der Kontrollstellen war 1,5 m. Die Proben wurden, sofern Sickerwasser anfiel, wöchentlich gewonnen und bis zur Analyse tiefgefroren. Die technische Betreuung der Lysimeteranlagen in Eberstalzell, Pettenbach und Pucking während des Berichtszeitraums erfolgte durch Mitarbeiter des Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt der Bundesanstalt für Wasserwirtschaft (Tab. 3-1). Die Analysen des Sickerwassers wurden vom Landeslabor OÖ durchgeführt.

Tab. 3-1: Tätigkeiten BAW (IKT)

Datum	Tätigkeit
4.10.2023	Bei Lysimeter 3 wurde der Aufsatzring gezogen und die Fühler ausgebaut und im Boden „versenkt“. Bei Lysimeter 1 und 4 wurden und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen.
23.10.2023	Bei Lysimeter 3 wurde der Aufsatzring aufgesetzt. (Winterweizen leicht angekeimt) und die Messfühler auf und neben dem Lysimeter eingebaut.
7.2.2024	Bei Lysimeter 1 und 4 wurden und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen und die Anlage kontrolliert. Herrn Karlsberger (L1) wurde eine neue Vakuumpumpe (Vaccuporter Firma Meter) übergeben.
27.2.2024	Bei Lysimeter 1 und 4 wurden und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen und

Datum	Tätigkeit
	die Anlage kontrolliert. Probleme mit WippenL1 und L4. Herrn Aitzetmüller (L3) wurde eine neue Vakuumpumpe (Vaccuporter Firma Meter) übergeben. Bei L1 (abgefrostete Zwischenfrucht) wurde der Aufsatzring gezogen.
22.3.2024	Bei Lysimeter 1 wurde eine neue Wippe inkl. Datenlogger installiert. Die Wippe und der Logger wurden bei Lysimeter 4 ausgebaut und zur Kontrolle mitgenommen (Probleme).
30.4.2024	Bei Lysimeter 4 wurde der Aufsatzring aufgesetzt. (Sojabohne wurde ca. vor einem Tag angebaut) Im Meßschacht, Lysimeter 4, wurde eine neue Wippe und ein neuer Datenlogger installiert.
17.6.2024	Bei Lysimeter 1 wurde der Aufsatzring aufgesetzt. (Soja ca. 10 cm hoch). Bei Lysimeter 1 und 4 wurden und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen und die Anlage kontrolliert.
11.7.2024	Bei Lysimeter 3 wurde der Aufsatzring gezogen und die Fühler ausgebaut und im Boden „versenkt“. Bei Lysimeter 1, 3, 4 und der Wetterstation wurde gemäht.
7.8.2024	Bei Lysimeter 3 wurde der Aufsatzring aufgesetzt und die Messfühler auf und neben dem Lysimeter eingebaut.
22.8.2024	Bei Lysimeter 1, 3, 4 und der Wetterstation wurde gemäht. Bei Lysimeter 1 und 4 wurden und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen und die Anlage kontrolliert.

Datum	Tätigkeit
27.8.2024	Bei Lysimeter 3 wurde eine Generalreinigung und Sondierarbeiten für den Fühler-einbau durchgeführt.
19.9.2024	Bei Lysimeter 3 fand eine große Besprechung über die Errichtung einer neuen Messstelle statt. Anwesend war das Land OÖ, WPA Wien, Johanneum Graz, IKT Petzenkirchen und Landwirt Aitzetmüller Alexander.
1.10.2024	Neben Lysimeter 3 wurde eine neue Messstelle errichtet. Die Grube für die Messfühler wurden mit einem Minibagger gegraben.
10.10.2024	Bei Lysimeter 4 wurde der Aufsatzring aufgesetzt und die Freiauslaufwippendaten ausgelesen.
6.11.2024	Bei Lysimeter 1 wurde der Aufsatzring gezogen und bei Lysimeter 4 wurden Zwischenfruchtpflanzen nachgesetzt.

Am Lysimeterstandort in Schwertberg (mgSBg und mgSBu) erfolgt die Probenahme des Sickerwassers ebenfalls im Wochenrhythmus. Zusätzlich werden Niederschlag, Temperatur und der Witterungsverlauf dokumentiert. Die Wartung der Anlagen übernimmt der Landwirt selbst.

Sechsmal pro Jahr wurden von wpa Bodenproben aus den Tiefenstufen 0-30, 30-60 und 60-90 cm der beiden tiefgründigen Standorte entnommen. Vom seichtgründigen Boden konnten üblicherweise ab 40 cm Tiefe keine Bodenproben mehr genommen werden, da ab dieser Tiefe der Grobanteil dominiert. Am mittelgründigen Standort wurden zeitgleich Proben ab April 2017 genommen. Unmittelbar anschließend an die Probenahme wurden die Proben gekühlt ins Labor transportiert.

An jedem Lysimeterstandort wurde jeweils der gesamte Aufwuchs direkt über dem Lysimeter und an zwei weiteren zufällig ausgewählten Stellen (Kontrollstandorten) am Feld geerntet. Jede Probenahmestelle hatte eine Fläche von 1 m². Korn und Stroh wurden nach der Ernte getrennt. Von den beiden Kontrollstandorten im Feld wurden für die chemische Analyse Mischproben gebildet.

3.2 Analytik

Die Sickerwasseranalysen wurden vom Landeslabor OÖ durchgeführt, die restlichen Analysen von Chemcon - Technisches Büro für Technische Chemie GmbH. In Tab. 3-2 werden die angewandten Methodenvorschriften aufgelistet.

Tab. 3-2: Analysenprogramm

Substanz	Parameter	Methoden
Sickerwasser	Nitrat Orthophosphat	ÖNORMEN ISO 10304-1, -2
Boden	Nitrat in 0-30, 30-60 und 60-90cm Bodentiefe, Ammonium in 0-30cm Nachlieferbarer Stickstoff im anaeroben Brutversuch	ÖNORM L1091 ÖNORM L 1204
Pflanzenproben	Trockenmasse N _{gesamt} P _{gesamt}	N: Kjeldahlabschluss, P: HNO ₃ Aufschluss, photometrische Bestimmung mittels Ammonmolybdat nach Abtrennung der störenden Matrix
Wirtschaftsdünger	Ammonium, N _{gesamt} , P _{gesamt}	Ammonium: gemäß ÖNORM ISO 5664, N _{gesamt} , P _{gesamt} S.O.

3.3 Bilanzierung

Zur Bilanzierung der N- und P- Ein- und Austräge wurde der Boden bis 1,5 m Tiefe abgegrenzt (Einbautiefe des Lysimeterauslaufs). Im Boden verbleibende Pflanzenteile wurden damit dem Boden zugerechnet, die oberirdischen Pflanzenteile jedoch nicht. Sie scheinen daher in der Bilanz auf. Der Bilanzierungszeitraum umfasst die Ernte der vorangegangenen Hauptfrucht bis zur Ernte der Hauptfrucht des Jahres 2024. Zur Berechnung der N- und P-Entzüge wurden die Korn- und Strohgewichte auf 1 ha hochgerechnet und mit den analysierten N- und P-Gehalten multipliziert. Die Berechnung wurde sowohl für die Mittelwerte der beprobten Teilflächen (Lysimeter- und Kontrollflächen) als auch nur für die Lysimeterflächen durchgeführt.

Für N-Einträge durch Wirtschaftsdünger wurde rechnerisch ein Abschlag für gasförmige Verluste aufgrund der Ausbringung bei Gülle und Jauche im Ausmaß von 13% und bei Stallmist 9% berücksichtigt. Zusätzlich wurde eine Jahreswirksamkeit von 80% bei Schweinegülle und 50% bei Stallmist veranschlagt (Richtlinien für die sachgerechte Düngung 8. Aufl., Baumgarten, 2022). Die atmosphärische Deposition und Stickstoffverluste durch Denitrifikation blieben unberücksichtigt.

3.4 Berechnung der Auswaschung

In die Berechnung der Nitratauswaschung und der Sickerwasserkonzentration ging jeweils der Mittelwert der Konzentrationen vom Lysimeter und den Kontrollmessstellen ein. Phosphat wurde nur an den Proben aus den Lysimetern analysiert.

Zur Ermittlung der Sickerwassermenge wird der Freiauslauf aus den Lysimetern über eine Wippe geführt. Zur Kontrolle und um einen eventuellen Ausfall der Wippe überbrücken zu können, werden parallel dazu im Zuge der wöchentlichen Sickerwasserprobenahme Kübelmessungen durchgeführt.

Aus den Konzentrationen und der im jeweiligen Zeitraum ermittelten Sickerwassermenge wird die Menge an ausgewaschenem Nitrat und Phosphat berechnet.

4 Bewirtschaftung

Auf allen vier Standorten wird eine konventionelle Bewirtschaftungsweise durchgeführt. Als Hauptkulturen des Jahres 2024 waren auf den Standorten in Eberstalzell, Pucking und Schwertberg Sojabohne und in Pettenbach Winterweizen angebaut. Die einzelnen Bewirtschaftungsmaßnahmen sind in Tab. 4-1 angeführt.

Die Summe der N-Düngung betrug am tiefgründigen Standort in Eberstalzell 29 kg N/ha (jahreswirksam). Am tiefgründigen Standort in Pettenbach wurden 160 kg N/ha (jahreswirksam) ausgebracht, wovon 95 kg N/ha als Biogasgülle gedüngt wurden. Am

seichtgründigen Standort in Pucking sowie in Schwertberg erfolgte keine Stickstoffdüngung.

Die Phosphordüngermengen betragen in Eberstalzell 34 kg P₂O₅/ha, in Pettenbach 68 kg P₂O₅/ha. In Schwertberg wurden 34 kg P₂O₅/ha ausgebracht in Pucking erfolgte keine Phosphordüngung.

Die Stickstoffdüngung zu Winterweizen in Pettenbach entsprach einer hohen Ertragslage (hoch 2); (gem. NAPV 2023, Anlage 3, Tab.2, für Gebiete mit verstärkten Aktionen). Die Düngemengen zur Sojabohne werden keiner Ertragslage zugeordnet, liegen jedoch auf allen Standorten unter der empfohlenen Düngemenge von max. 50 bzw. 60 kg N/ha.

Tab. 4-1: Bewirtschaftungsmaßnahmen 2023/2024 (nach Angaben der Bewirtschafter)

Datum	Tiefgr. Eberstalzell tgEB	Tiefgr. Pettenbach tgPE	Seichtgr. Pucking sgPU	Mittelgr. Schwertberg mgSB
29.07.2023	Anbau Zwischenfrucht			
31.07.2023				Grubbern + Anbau Zwischenfrucht (Phacellia, Krumenkle, Mungo, Alexandriner- klee)
12.08.2023			Anbau Zwischenfrucht	
18.10.2023		Anbau Winterweizen		
09.01.2024				Mulchen/Häckseln
08.03.2024		Düngung Biogasgülle 17,6 m ³ /ha		
11.03.2024				Düngung DC-45 neu, 290 kg/ha
12.04.2024		Düngung NAC 209 kg/ha		
15.04.2024			Einarbeitung Zwischenfrucht	
20.04.2024	Grubber			

Datum	Tiefgr. Eberstalzell tgEB	Tiefgr. Pettenbach tgPE	Seichtgr. Pucking sgPU	Mittelgr. Schwertberg mgSB
27.04.2024	Düngung Schweingülle 11 m ³ /ha			
29.04.2024			Anbau Sojabohne	Kreiseln
30.04.2024		Düngung NAC 202 kg/ha		Anbau Sojabohne
15.05.2024	Aussaat Soja			
19.07.2024		Ernte Winterweizen 8.250 kg/ha (12%F)		
26.07.2024		Pflug Anbau Zwischenfrucht		
30.08.2024				Ernte Sojabohne 2.250 kg/ha
31.08.2024			Ernte Sojabohne 1.180 kg/ha	
07.10.2024			Anbau Winterweizen	
12.10.2024	Ernte Soja, ca. 3.000 kg/ha			
17.10.2024				Grubbern
18.10.2024				Aussaat Wintertriticale

5 Ergebnisse

5.1 Wirtschaftsdünger und Ernteproben

Am Betrieb in Eberstolz wurde im April 2024 Schweinegülle ausgebracht. Der Gesamtstickstoffgehalt betrug $3,8 \text{ kg/m}^3$. Umgerechnet auf jahreswirksamen Stickstoff ergibt das $2,7 \text{ kg/m}^3$. Der P_2O_5 - Gehalt betrug $3,1 \text{ kg/m}^3$.

Am Betrieb in Pettenbach wurde im März 2024 Biogasgülle ausgebracht. Der Gesamtstickstoffgehalt betrug $4,0 \text{ kg/m}^3$. Umgerechnet auf jahreswirksamen Stickstoff ergibt das $2,8 \text{ kg/m}^3$. Der P_2O_5 - Gehalt betrug $1,4 \text{ kg/m}^3$.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der eigentlichen Lysimeterflächen mit den Mittelwerten von Lysimeterfläche plus 2 Vergleichsflächen mit jeweils 1 m^2 Fläche ist ersichtlich, dass der Kornertrag auf der Lysimeterfläche in Eberstolz deutlich niedriger als der Durchschnitt aus Lysimeterfläche und Kontrollstellen war. Auch in Pucking war die Erntemenge am Lysimeter etwas niedriger, in Pettenbach hingegen ist fast kein Unterschied vorhanden (Tab. 5-1).

In Schwertberg konnten im Jahr 2024 keine Ernteproben genommen werden, weshalb hierzu keine Analyseergebnisse vorliegen.

Umgerechnet auf Standardfeuchte wurden im Durchschnitt aller beprobten Stellen eines Standorts am tiefgründigen Standort in Eberstolz (inkl. Lysimeter) ca. $4,0 \text{ t/ha}$ Sojabohne geerntet, was über dem vom Landwirt ermittelten Felddurchschnitt von $3,0 \text{ t/ha}$ liegt. Am seichtgründigen Standort in Pucking wurden an den Probenahmestellen ca. $0,6 \text{ t/ha}$ Sojabohne geerntet, also in etwa um die Hälfte weniger als im Felddurchschnitt ($1,18 \text{ t/ha}$), was damit erklärt werden kann, dass der Bereich, wo der Lysimeter eingebaut ist, seichtgründiger ist, als der Felddurchschnitt. Am tiefgründigen Standort in Pettenbach wurde hochgerechnet $7,9 \text{ t/ha}$ Winterweizen geerntet, was mit den Angaben des Landwirts mit $8,25 \text{ t/ha}$ recht gut übereinstimmt. In Schwertberg ermittelte der Landwirt einen Felddurchschnitt von $2,25 \text{ t/ha}$ Sojabohne.

Entsprechend der Angaben der Landwirte wurde in Pettenbach gem. NAPV 2023 eine hohe Ertragslage erreicht (hoch 2). Auf den anderen Standorten wurde Sojabohne angebaut, welche in der NAPV 2023 keiner Ertragslage zugeordnet werden kann. Jedoch gemäß Richtlinien für die sachgerechte Düngung (8. Auflage) erreichte die Sojabohne in Eberstolz eine hohe Ertragslage (hoch 1), in Pucking eine niedrige und in Schwertberg eine mittlere Ertragslage.

Tab. 5-1: Erntemengen und Analysenergebnisse der Ernteproben

Probe	Erntemenge (g TS/m²)	Trockenmasse (%)	N_{gesamt} (g/kg TS)	P₂O₅ (g/kg TS)
tgEB - Lys Korn	122	73%	40,7	17,4
tgEB - MW Korn	348	74%	55,9	17,3
tgEB - Lys Stroh	126	61%	8,4	3,9
tgEB - MW Stroh	262	73%	6,9	2,5
tgPE - Lys Korn	645	86%	17,2	9,6
tgPE - MW Korn	681	86%	16,2	8,8
tgPE - Lys Stroh	591	89%	1,2	1,6
tgPE - MW Stroh	526	90%	1,3	1,9
sgPU - Lys Korn	29	90%	62,0	13,1
sgPU - MW Korn	51	91%	62,0	14,3
sgPU - Lys Stroh	137	89%	21,7	6,9
sgPU - MW Stroh	165	88%	18,2	6,3

Probenbezeichnung: Lys = Probe über Lysimeter, MW = Mittelwert aller Ernteproben am Feld,

5.2 Stickstoffsalden

Zur Berechnung der Stickstoffsalden ist anzumerken, dass bei allen vier Standorten das Stroh nach der Ernte auf dem Feld gelassen wurde. Ein Vergleich der Stickstoffentzüge mit dem N-Düngeaufwand (jahreswirksam) ergab für die Standorte unterschiedliche Stickstoffsalden.

Auf allen Standorten mit Sojaanbau liegt der Saldo mehr oder weniger stark unter null, sofern die symbiotische Fixierung von Luftstickstoff unberücksichtigt bleibt. In Eberstanzel war der Saldo mit -182 kg N/ha im Feldmittel am niedrigsten. Am Lysimeter selbst war jedoch der Ertrag sehr niedrig, weshalb auch der Entzug niedrig war und das Saldo mit -20 kg N/ha entsprechend höher liegt. Die Berücksichtigung des feldfallenden Stickstoffs ergibt nur einen geringfügig höheren Saldo (-12 kg N/ha am Lysimeter und -174 kg N/ha im Mittelwert), da nur eine geringe Wirtschaftsdüngergabe erfolgte und der feldfallende Anteil daher gering ausfällt.

In Pucking erfolgte keine Stickstoffdüngung. Der Saldo ist mit -18 kg N/ha am Lysimeter und -31 kg N/ha im Mittelwert sehr ähnlich, da die Erntemenge generell niedrig war. Dieselben Werte gelten auch ohne Berücksichtigung der Jahreswirksamkeit, da kein Dünger ausbracht wurde.

In Schwertberg konnten im Jahr 2024 keine Ernteproben genommen werden, weshalb keine näheren Informationen zum N-Gehalt und zur Erntemenge vorhanden sind. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass auch hier der Saldo stark negativ ist, da keine Stickstoffdüngung erfolgte.

Die Stickstoffsalden bezogen auf jahreswirksamen Stickstoff und die einzelnen Bilanzglieder werden in Tab. 5-2 aufgelistet. Da davon ausgegangen werden kann, dass der organische Anteil im Wirtschaftsdünger im Laufe der Jahre wirksam wird, werden in Tab. 5-3 zusätzlich die feldfallenden N-Düngemengen den Ernteeutzeugen gegenübergestellt. Da in Pucking und Schwertberg kein Dünger eingesetzt wurde, bleiben die Salden ident.

Die Bilanzsalden für die Ernteabfuhr variieren zwischen den Lysimeterflächen und Vergleichsflächen bzw. den daraus gebildeten Mittelwerten auf allen Standorten vor allem aufgrund der Ertragsunterschiede. Der Unterschied bewegt sich zumeist in einem kleinen Bereich. Anzumerken ist, dass die Abweichung zwischen dem Ertrag bzw. der Nährstoffabfuhr zwischen der Lysimeterfläche und den Vergleichsflächen nicht jedes Jahr in gleicher Weise ausfällt und auch nicht jedes Mal gleichgerichtet ist. Kleinräumige Schwankungen der Ertragshöhe dürften daher eine größere Rolle spielen als systematische Abweichungen.

Tab. 5-2: Stickstoffsalden (jahreswirksam) für das Erntejahr 2024

	Tiefgr. Standort in Eberstalzell tgEB		Tiefgr. Standort in Pettenbach tgPE		Seichtgr. Standort in Pucking sgPU		Mittelgr. Standort in Schwertberg
	----- kg N/ha -----						
Stickstoffzufuhr aus Düngung jahreswirksam	29		160		0		0
Entzug durch Pflanzen	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	MW
Entzug durch Korn	49	211	111	110	18	31	-
Entzug durch Stroh	11	17	7	7	30	30	-
Summe Entzug	60	228	118	117	48	61	-
Abfuhr durch Ernte	49	211	111	110	18	31	-
Saldo Korn	-20	-182	49	50	-18	-31	-
Saldo Korn + Stroh	-31	-199	42	43	-48	-61	-
Saldo Ernte	-20	-182	49	50	-18	-31	-

Tab. 5-3: Stickstoffsaldo (feldfallend) für das Erntejahr 2024

	Tiefgr. Standort in Eberstalzell tgEB		Tiefgr. Standort in Pettenbach tgPE		Seichtgr. Standort in Pucking sgPU		Mittelgr. Standort in Schwertberg
	----- kg N/ha -----						
Stickstoffzufuhr aus Düngung feldfallend	37		175		0		0
Entzug durch Pflanzen	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	MW
Entzug durch Korn	49	211	111	110	18	31	-
Entzug durch Stroh	11	17	7	7	30	30	-
Summe Entzug	60	228	118	117	48	61	-
Abfuhr durch Ernte	49	211	111	110	18	31	-
Saldo Korn	-12	-174	61	62	-18	-31	-
Saldo Korn + Stroh	-23	-191	54	55	-48	-61	-
Saldo Ernte	-12	-174	61	62	-18	-31	-

5.3 Nachlieferbarer Stickstoff

Der nachlieferbare Stickstoff wurde zuletzt im Jahr 2021 analysiert. Nachdem beim Stickstoffnachlieferungspotential eines Bodens keine jährlichen Schwankungen zu erwarten sind, wurde im Jahr 2023/24 keine Untersuchung durchgeführt. Diese ist jedoch für das kommende Jahr wieder vorgesehen.

5.4 N_{\min} -Gehalte im Boden

Die N_{\min} Gehalte (Nitrat + Ammonium) im Boden zeigen auf den fünf Standorten (vgl. Abb. 5-1-bis Abb. 5-4) einen Zusammenhang mit den Düngemaßnahmen, dem zeitlichen Verlauf der Stickstoffaufnahme der Kulturen sowie Vorbewirtschaftung. Auf den Standorten wurden verschiedene Kulturen angebaut, wodurch sich Unterschiede beim N_{\min} Gehalt im Boden ergeben.

Am tiefgründigen Standort in Eberstalzell wurde nach einer Winterbegrünung Sojabohne im Jahr 2024 angebaut. Zum Sojaanbau wird grundsätzlich keine Düngung empfohlen, jedoch bei Verwendung von nicht beimpftem Saatgut, bei mangelhaftem Knöllchenbesatz oder bei erstmaligem Anbau kann eine Düngung durchgeführt werden. Nachdem der letzte Sojaanbau in Eberstalzell vor mehr als 10 Jahren durchgeführt wurde, erfolgte kurz vor dem Anbau im April 2024 eine Düngung mit Schweinegülle (29 kg N/ha (jw), 37 kg N/ha (ff)). Es erfolgten am Standort in Eberstalzell sonst keine weiteren Düngemaßnahmen.

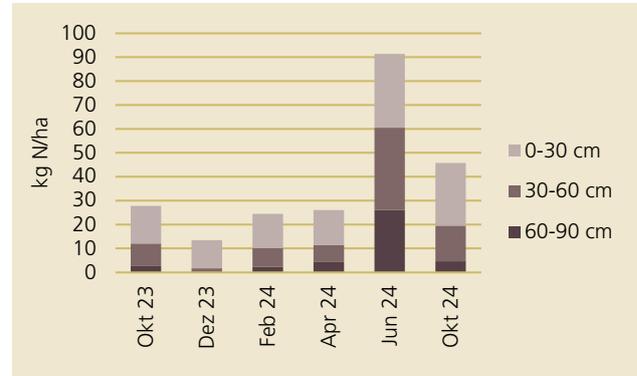


Abb. 5-1: N_{\min} -Gehalte am tiefgründigen Standort in Eberstalzell

Die N_{\min} -Messungen in Eberstalzell bleiben über den Winter 2023/24 stets unter 30 kg N/ha, bei der Messung im Juni ist ein Anstieg auf insgesamt 91 kg N/ha sichtbar, was auf das Einarbeiten der Zwischenfrucht und die Schweinegülledüngung zurückzuführen ist. Bis zum Oktober 2024 geht der N_{\min} -Gesamtwert auf 46 kg N/ha zurück (Abb. 5-1).

Am tiefgründigen Standort in Pettenbach wurde Winterweizen angebaut. Die Düngung für das hydrologische Jahr 2023/24 erfolgte durch Biogasgülle im März 2024 (49 kg N/ha (jw), 61 kg N/ha (ff)) und im April zweimal durch NAC (56 kg N/ha (jw=ff) und 55 kg N/ha (jw=ff)). Der N_{\min} -Gehalt zeigte im Oktober nach der Ernte der Vorfrucht (Körnermais) vergleichsweise hohe Werte von 81 kg N/ha. Bis zum Winter wurden um die 25 kg N/ha erreicht. Nach den Düngungen im Frühjahr ist nur ein geringer Anstieg beim N_{\min} -Gehalt zu beobachten von maximal 30 kg N/ha. Im weiteren Jahresverlauf bleiben die Werte in diesem Bereich (Abb. 5-2).

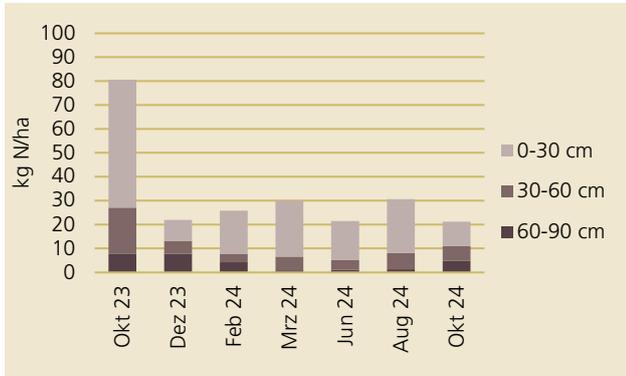


Abb. 5-2: N_{min}-Gehalte am tiefgründigen Standort in Pettenbach

Am seichtgründigen Standort in Pucking wurde nach einer Winterbegrünung Sojabohne im Jahr 2024 angebaut. Es erfolgten keine Düngungen im gesamten Jahresverlauf, auch nicht im Herbst davor zur Zwischenfrucht. Dementsprechend bleibt der N_{min}-Gehalt über den Winter stets unter 25 kg N/ha. Erst im April nach dem Einarbeiten der Zwischenfrucht und dem Anbau der Sojabohne, steigen die Werte auf knapp 60 kg N/ha an. Im weiteren Jahresverlauf ist nur ein leichter Rückgang zu beobachten, da die schwach entwickelte Sojabohne nur wenig Stickstoff aus dem Boden aufnahm. Schlussendlich verbleiben nach der Ernte noch 44 kg N/ha im Boden (Abb. 5-3).

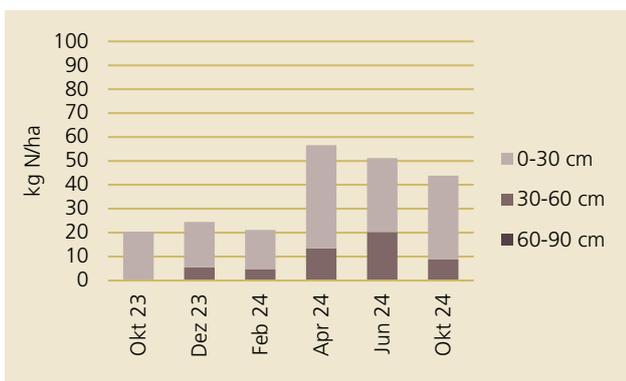


Abb. 5-3: N_{min}-Gehalte am seichtgr. Standort in Pucking

In Schwertberg wurde auf den beiden Lysimetern (mgSBg = gestörter Bodenaufbau; mgSBu= ungestörter Bodenaufbau) als Hauptfrucht Sojabohne angebaut, nachdem davor um den Winter eine Begrünung angelegt wurde. Auch in Schwertberg erfolgte keine N-Düngung. Die N_{min}-Gehalte verhalten sich während des Jahres ähnlich wie am Lysimeter in Pucking. Der höchste Wert während des Winters 2023/24 lag bei 21 kg N/ha und nach dem Sojaanbau bei 67 kg N/ha. Im Oktober verblieben nach der Ernte noch 58 kg N/ha im Boden (Abb. 5-4).

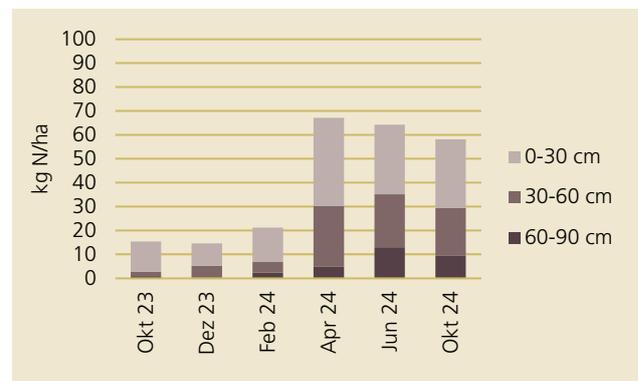


Abb. 5-4: N_{min}-Gehalte am mittelgr. Standort in Schwertberg, mgSBg, mgSBu

Der Verlauf der N_{min} Gehalte des Jahres 2024 unterscheidet sich zwischen den Standorten entsprechend der angebauten Kultur, weist aber Ähnlichkeiten bei den Standorten mit Soja auf. Im langjährigen Vergleich liegen die Werte des Jahres 2024 insgesamt in einem niedrigen Bereich (Abb. 5-5).

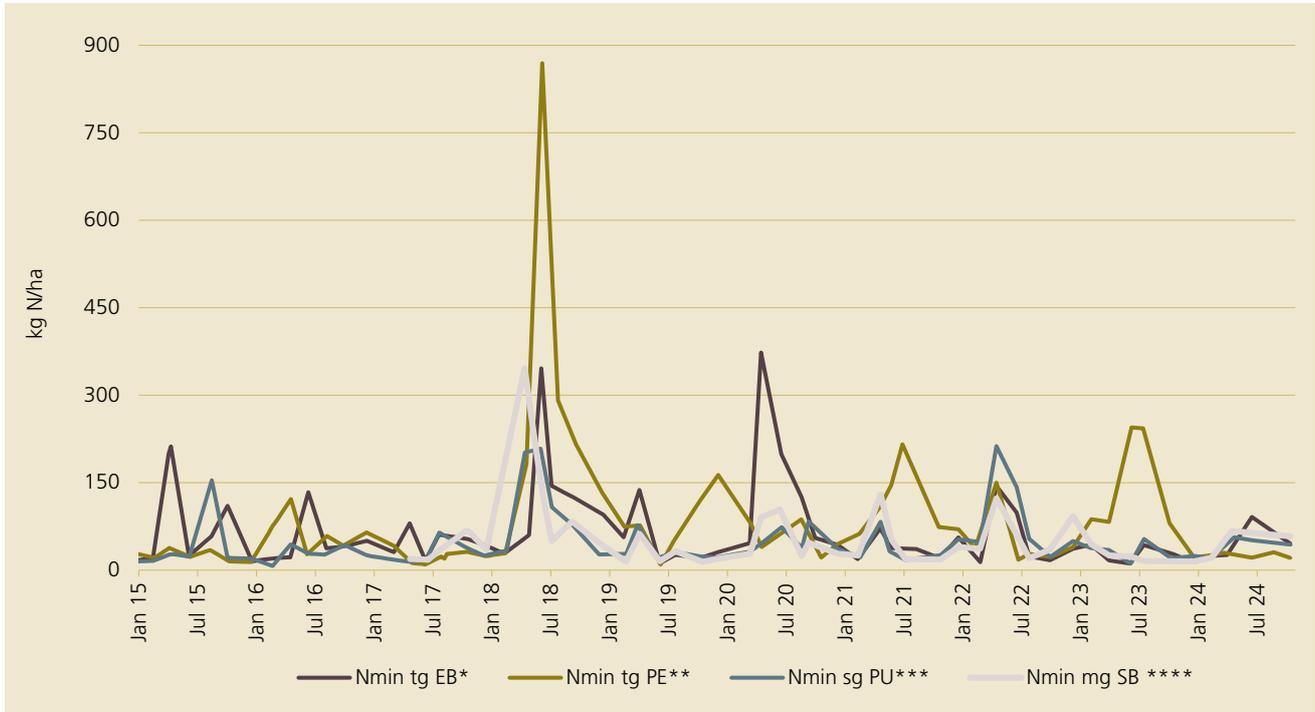


Abb. 5-5: Vergleich der N_{min}-Gehalte der Standorte seit Jänner 2015

- * tiefgründiger Standort in Eberstalzell
- ** tiefgründiger Standort in Pettenbach
- *** seichtgründiger Standort in Pucking
- **** mittelgründiger Standort in Schwertberg (gestört)

5.5 Nitratauswaschung am tiefgründigen Standort in Eberstalzell

5.5.1 Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung

Im hydrologischen Jahr 2023/24 fielen 1.463 mm Niederschlag. Die Sickerwassermenge in diesem Zeitraum betrug 459 mm, was 31% der Niederschlagsmenge entspricht. Die höchsten Niederschlagswerte wurden im September (278 mm) und April (216 mm) gemessen. Die beiden trockensten Monate waren März (48 mm) und Oktober (55 mm) (Abb. 5-6, Abb. 5-7).

Die höchste Menge an Sickerwasser bildete sich in Eberstalzell im Dezember 2023 (113,4 mm). Die geringsten Mengen an Sickerwasser wurden im August (0,0 mm), Juli (0,8 mm) und März (9,8 mm) gemessen.

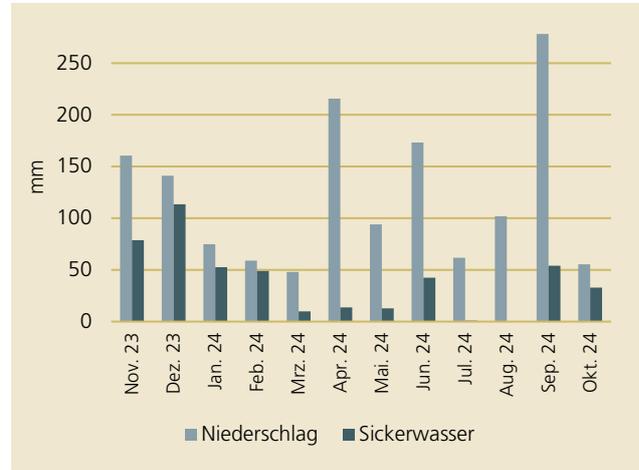


Abb. 5-6: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (tiefgr. EB)

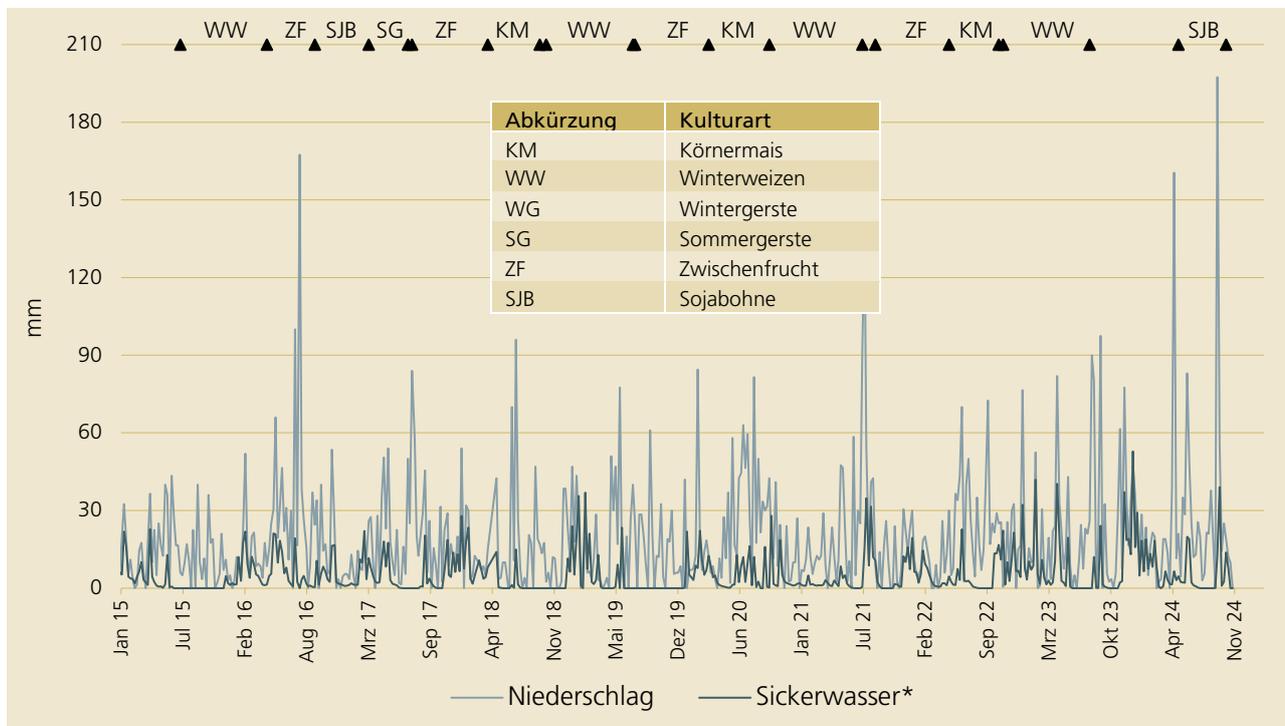


Abb. 5-7: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Jänner 2015 (tiefgr. EB) *Juli 2016 nicht gesamtes SW erfasst

5.5.2 Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser

Der Verlauf der Nitratauswaschung korreliert im hydrologischen Jahr 2023/24 mit dem Verlauf des Sickerwasseranfalls. Die höchste monatliche Nitratmenge wurde im Juni mit 6,2 kg N/ha ausgewaschen, gefolgt von September mit 1,8 kg N/ha, Februar mit 1,7 kg N/ha und Oktober mit 1,6 kg N/ha. In den restlichen Monaten blieben die Werte unter 1,3 kg N/ha. In den (Abb. 5-8).

Insgesamt wurden im gesamten Jahr 2023/24 15,0 kg N/ha ausgewaschen. Von diesen wurden 53% aufgrund der starken Niederschläge und des hohen Sickerwasseranfalls in den Monaten Juni und September ausgewaschen.

Die Nitratkonzentration im Sickerwasser betrug im hydrologischen Jahr durchschnittlich 14,5 mg/l (Abb. 5-9 bis Abb. 5-11).

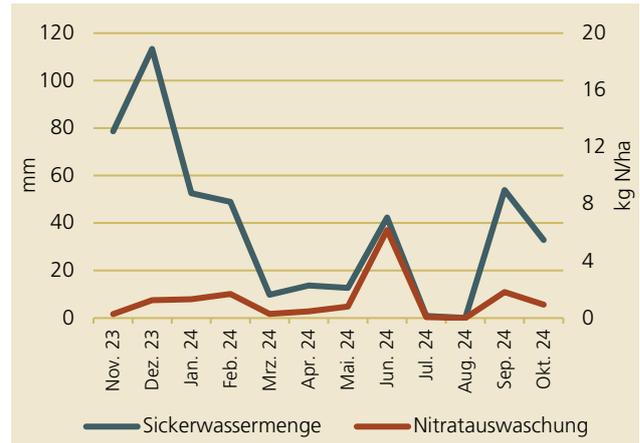


Abb. 5-8: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. EB)

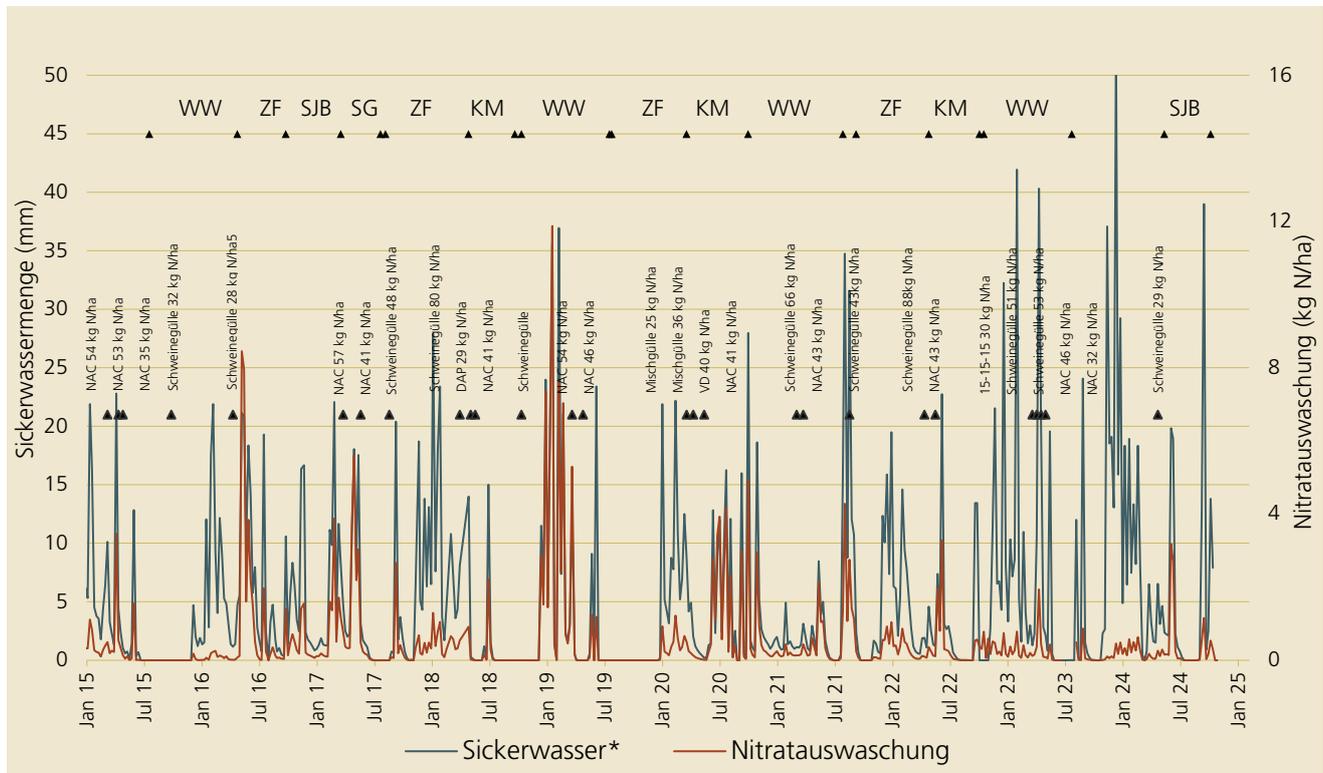


Abb. 5-9: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. EB); *Juli 2016 nicht gesamtes SW erfasst

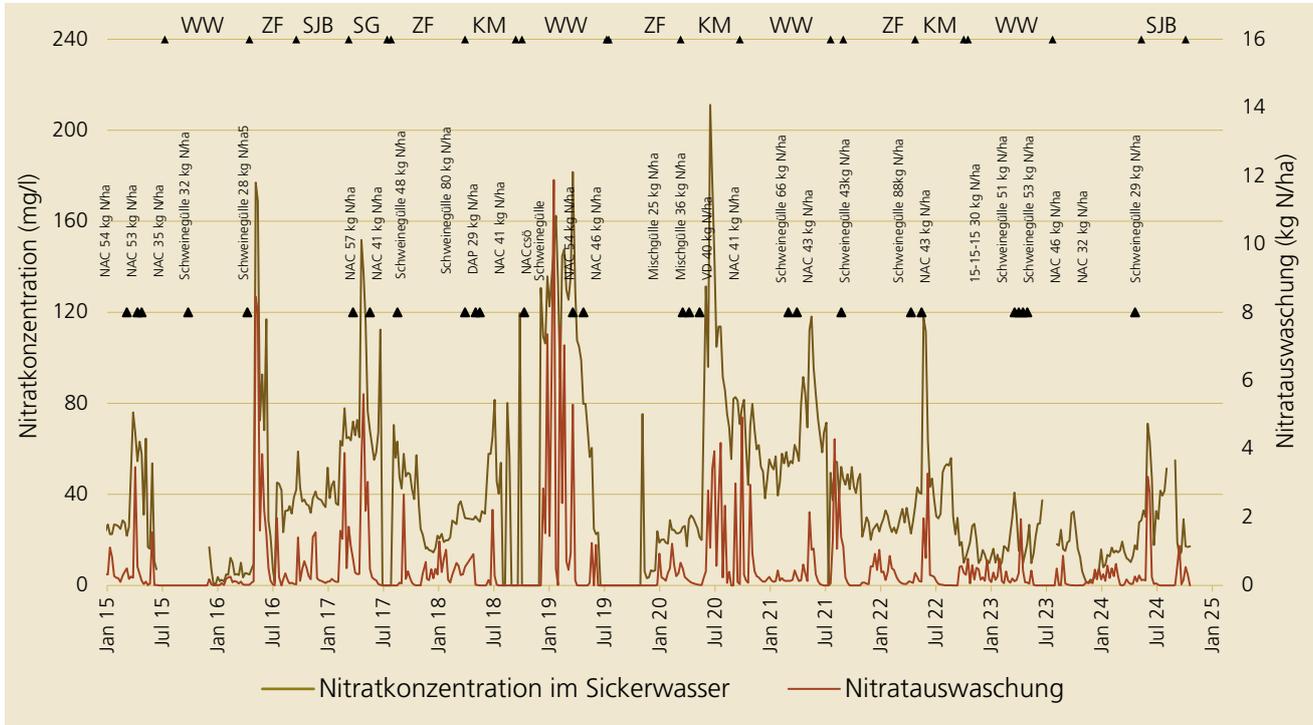


Abb. 5-10: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (tiefr. EB)

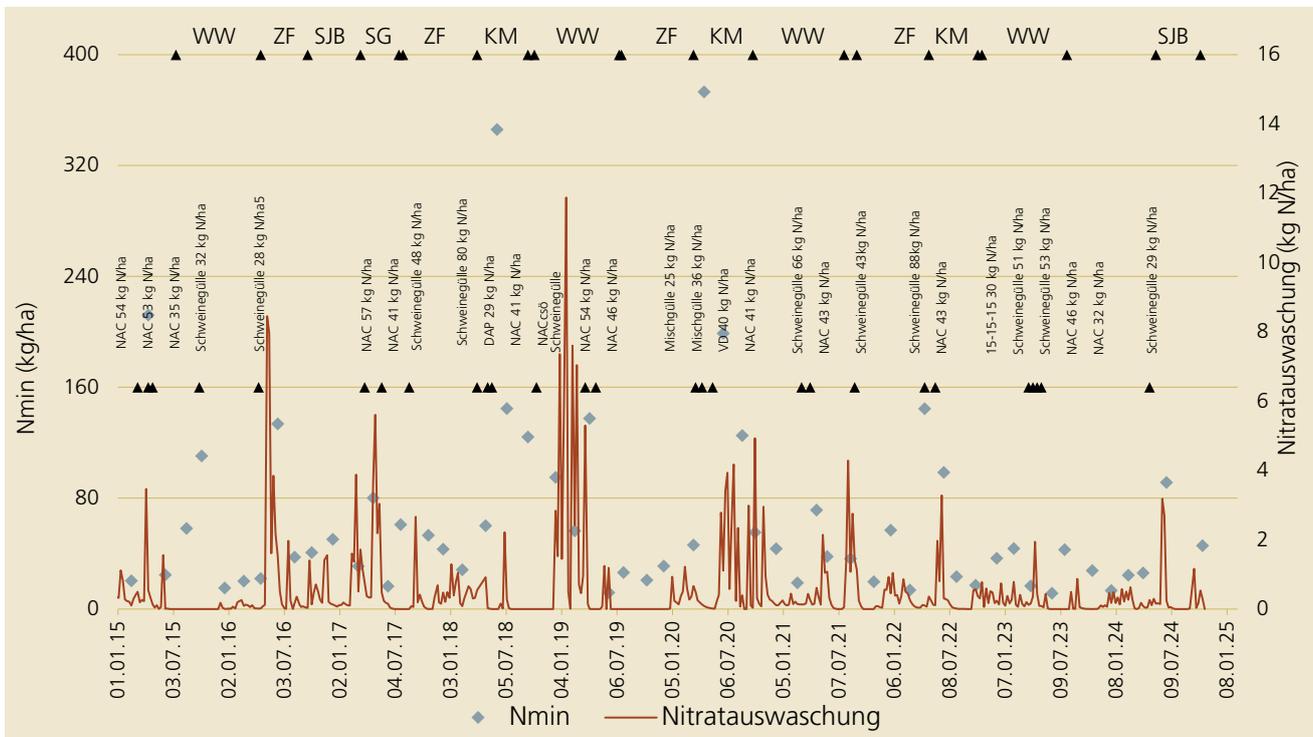


Abb. 5-11: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (tiefr. EB)

5.6 Nitratauswaschung am tiefgründigen Standort in Pettenbach

5.6.1 Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung

Im hydrologischen Jahr 2023/24 wurden mehrere Ausfälle der Wippendaten verzeichnet. Zur Vervollständigung der Daten wurden daher Kübelmessungen interpoliert und in die Datenreihe eingefügt. Es wurde eine Niederschlagssumme von 1.280 mm und eine Sickerwassermenge von 620 mm gemessen. Das Verhältnis der Sickerwassermenge zur Niederschlagsmenge (Abb. 5-12) betrug etwa 48%. Die höchsten Niederschlagssummen traten in den Monaten September (269 mm) und November (171 mm) auf.

Die geringsten Mengen an Sickerwasser wurden in Pettenbach im Juli (2,7 mm), gefolgt von April (8,3 mm) und August (13,6 mm) gemessen. Die

höchsten Sickerwasserwerte konnten im September (149,6 mm) und November (128,8 mm) verzeichnet werden, was mit den höchsten Niederschlagswerten des Jahres übereinstimmt.

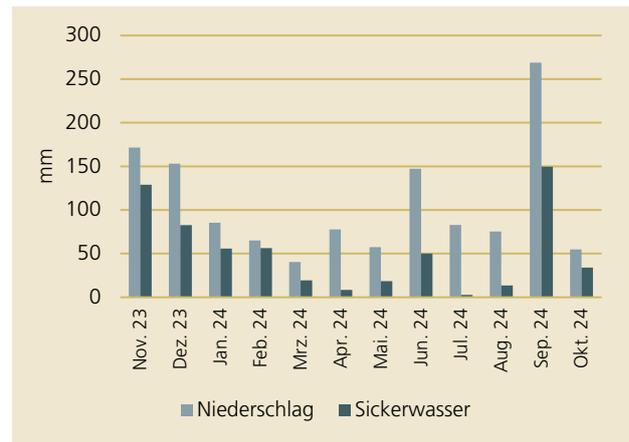


Abb. 5-12: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (tiefgr. PE)

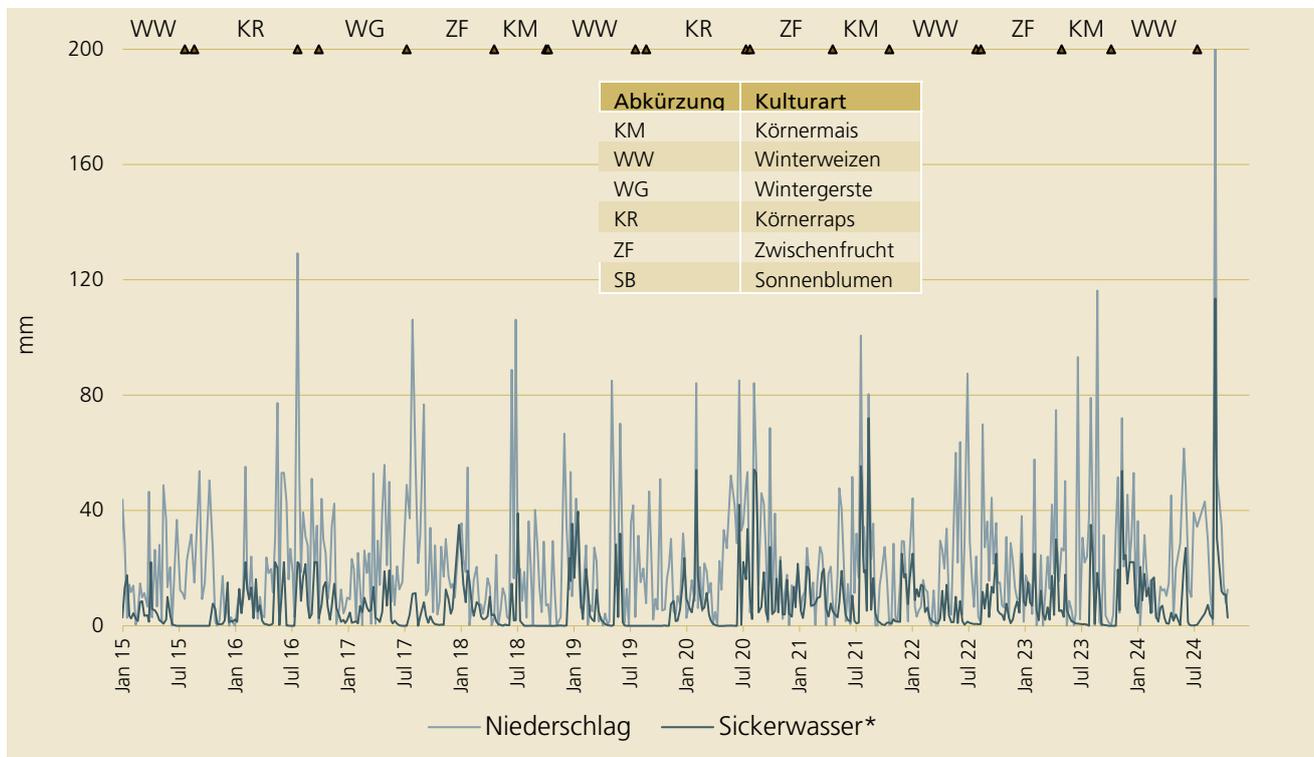


Abb. 5-13: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Juni 2015 (tiefgr. PE) *von Mai bis Sept. 2016 und August 2017 nicht gesamtes Sickerwasser erfasst

5.6.2 Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser

Der Verlauf der Nitratauswaschung korreliert mit dem Verlauf des Sickerwasseranfalls. Die höchsten Nitratauswaschungswerte wurden im November 2023 und September 2024 registriert. Von der insgesamt ausgewaschenen Menge von 39,6 kg N/ha wurden 32% im November und 18% im September in den Untergrund verlagert. Im Dezember 2023 wurden etwa 16% der Gesamtjahresmenge ausgewaschen.

Die höchste Nitratkonzentration im Sickerwasser wurde bei einer Messung im November 2023 aufgezeichnet. Die durchschnittliche Nitratkonzentration im Jahresverlauf lag bei 28 mg/l.

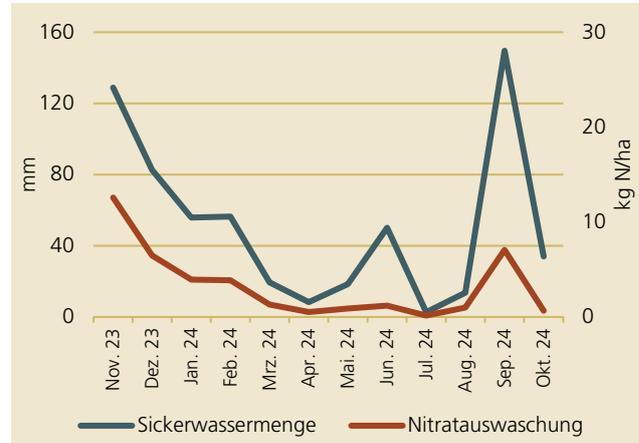


Abb. 5-14: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. PE)

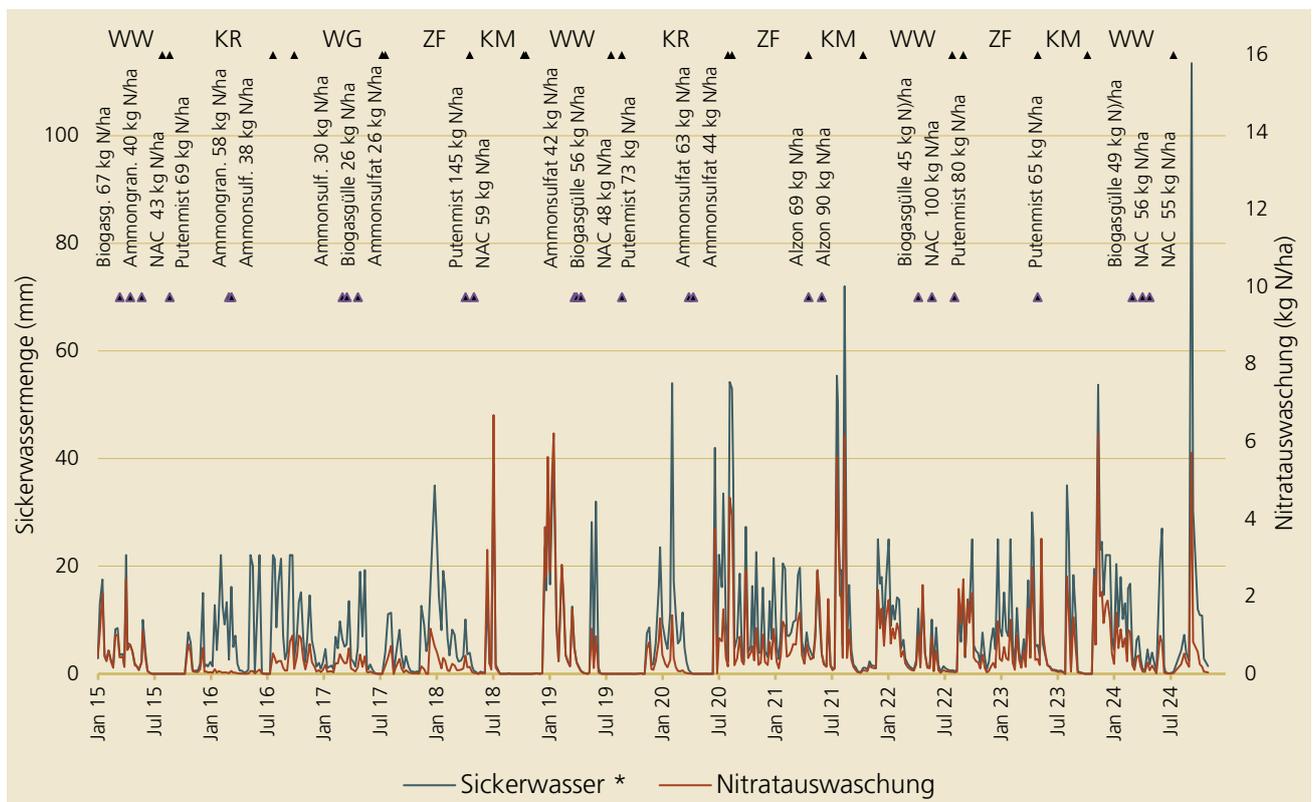


Abb. 5-15: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (tiefgr. PE) von Mai bis Sept. 2016 und August 2017 nicht gesamtes Sickerwasser erfasst

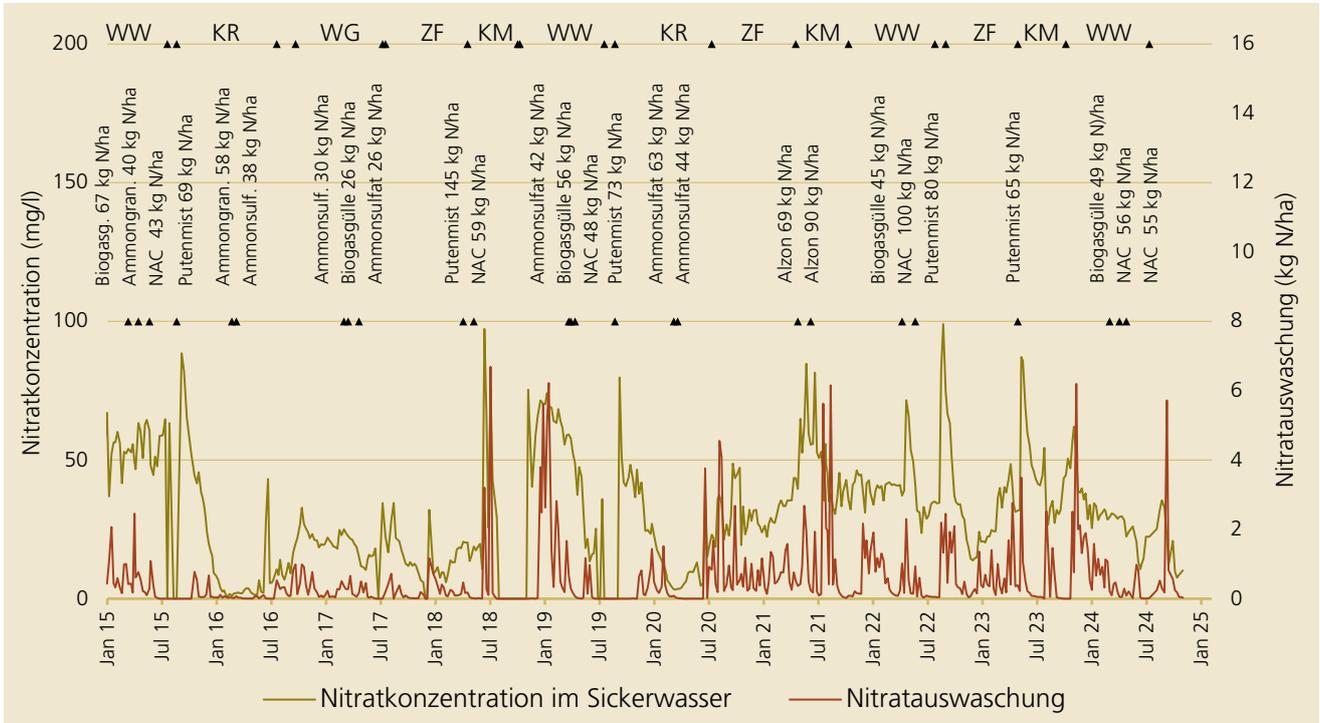


Abb. 5-16: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (tiefgr. PE)

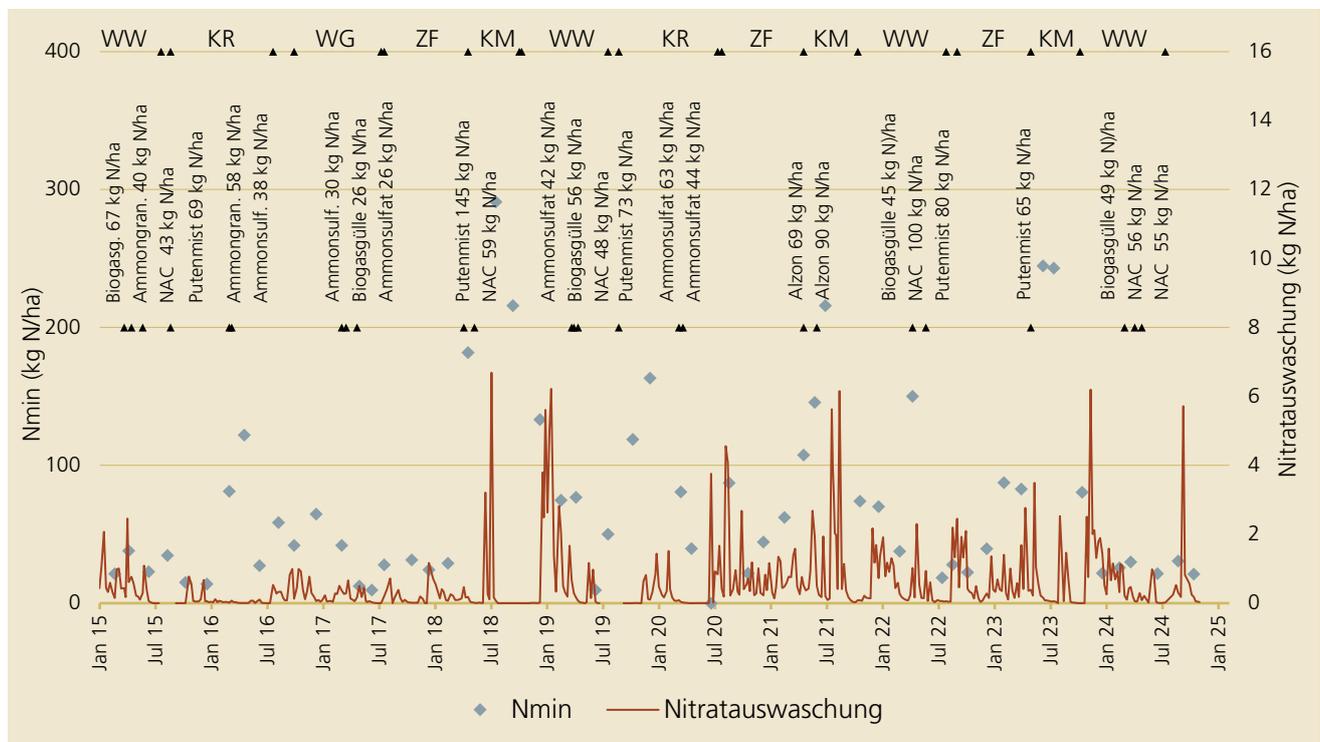


Abb. 5-17: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (tiefgr. PE)

5.7 Nitratauswaschung am seichtgründigen Standort in Pucking

5.7.1 Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung

Am seichtgründigen Standort fielen im hydrologischen Jahr 2023/24 in Summe 869 mm Niederschlag (Abb. 5-18). Die niederschlagreichsten Monate waren Dezember (172 mm), September (148 mm) und November (116 mm).

Die Gesamtmenge an Sickerwasser betrug 472 mm wobei die höchste Sickerwasserbildung im Dezember (150,0 mm) und September (131,6 mm) erfolgte. In diesen beiden Monaten versickerten insgesamt 60% der Jahressumme. Die Monate Juli und August waren

sickerwasserfrei. Die gesamte Sickerwassermenge entspricht rund 54% der jährlichen Niederschlagssumme.

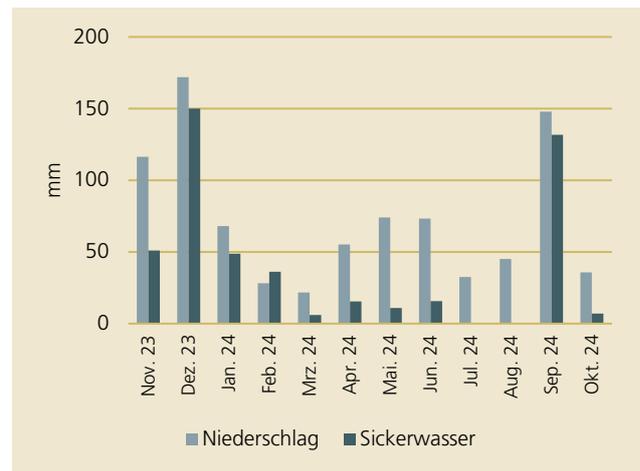


Abb. 5-18: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (seichtgr.)

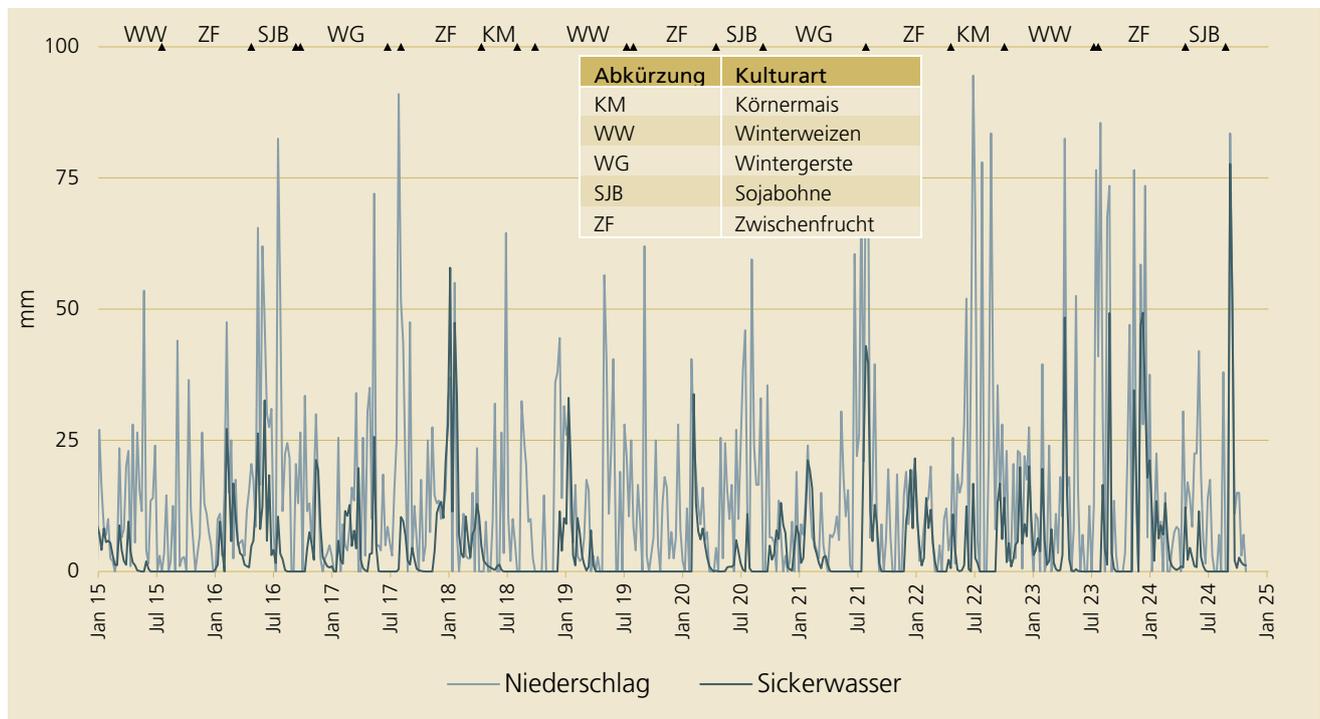


Abb. 5-19: Niederschläge und Sickerwasser, Messreihe seit Jänner 2015 (seichtgründig)

5.7.2 Sickerwassermenge, Nitratauswaschung und -konzentration im Sickerwasser

Die gesamt ausgewaschene Nitratmenge betrug im hydrologischen Jahr 2023/24 94,7 kg N/ha. Die höchste Nitratauswaschung nämlich 80,3 kg N/ha, was 84% der Jahresmenge entspricht, wurde durch die starken Niederschläge im September 2024 verursacht. Demgegenüber war die Nitratauswaschung im Dezember 2023 im Vergleich zur Sickerwassermenge gering ausfiel (Abb. 5-20).

Im Sickerwasser wurden die höchsten Nitratkonzentrationen im September und Oktober 2024 registriert. Die durchschnittliche Nitratkonzentration im hydrologischen Jahr lag bei 89 mg/l (Abb. 5-22).

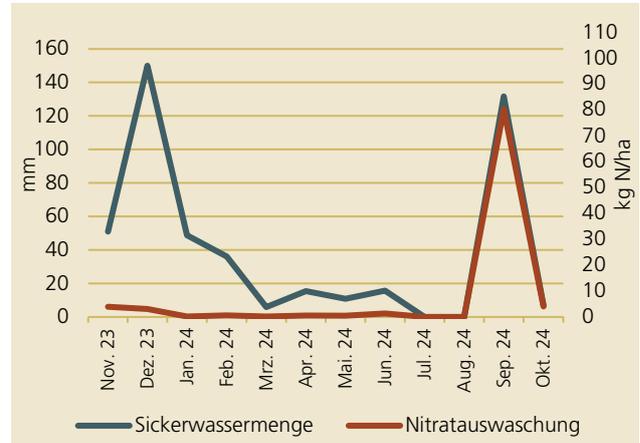


Abb. 5-20: Monatliche Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (seichtgründig)

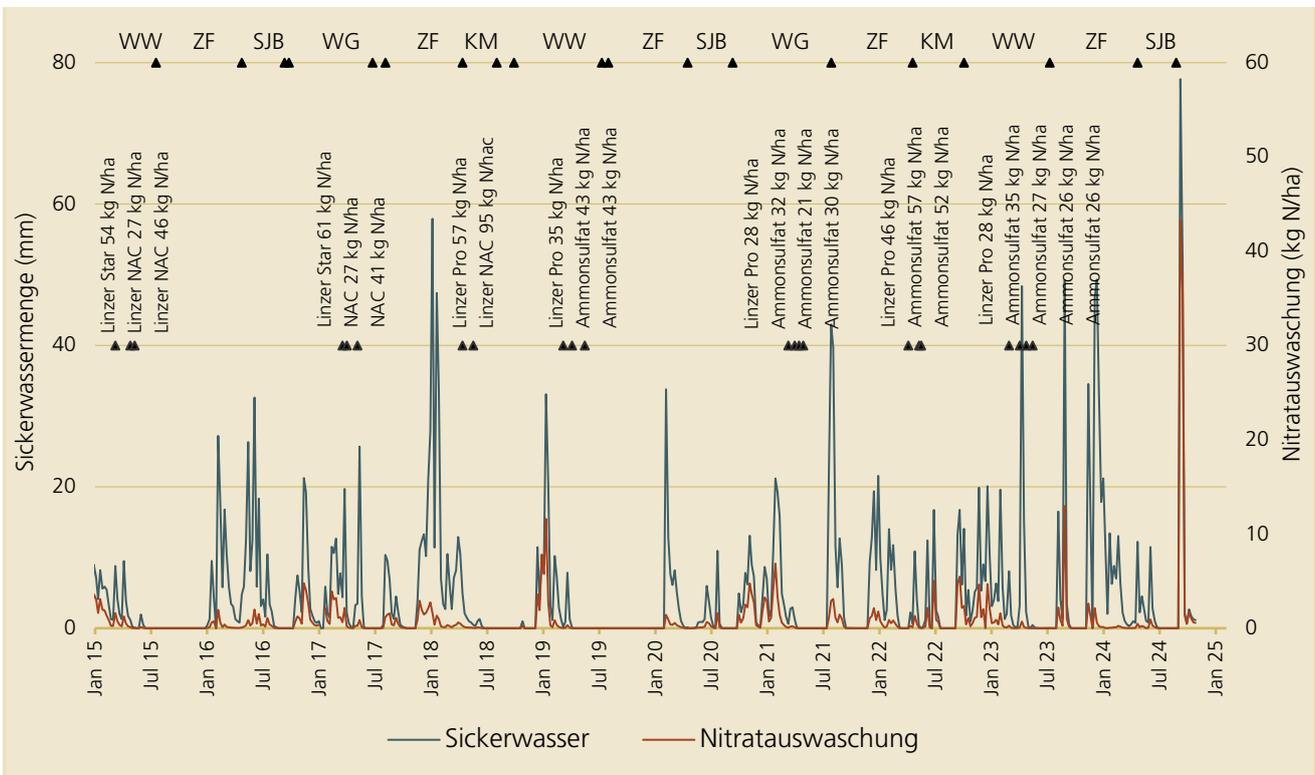


Abb. 5-21: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung (seichtgründig)

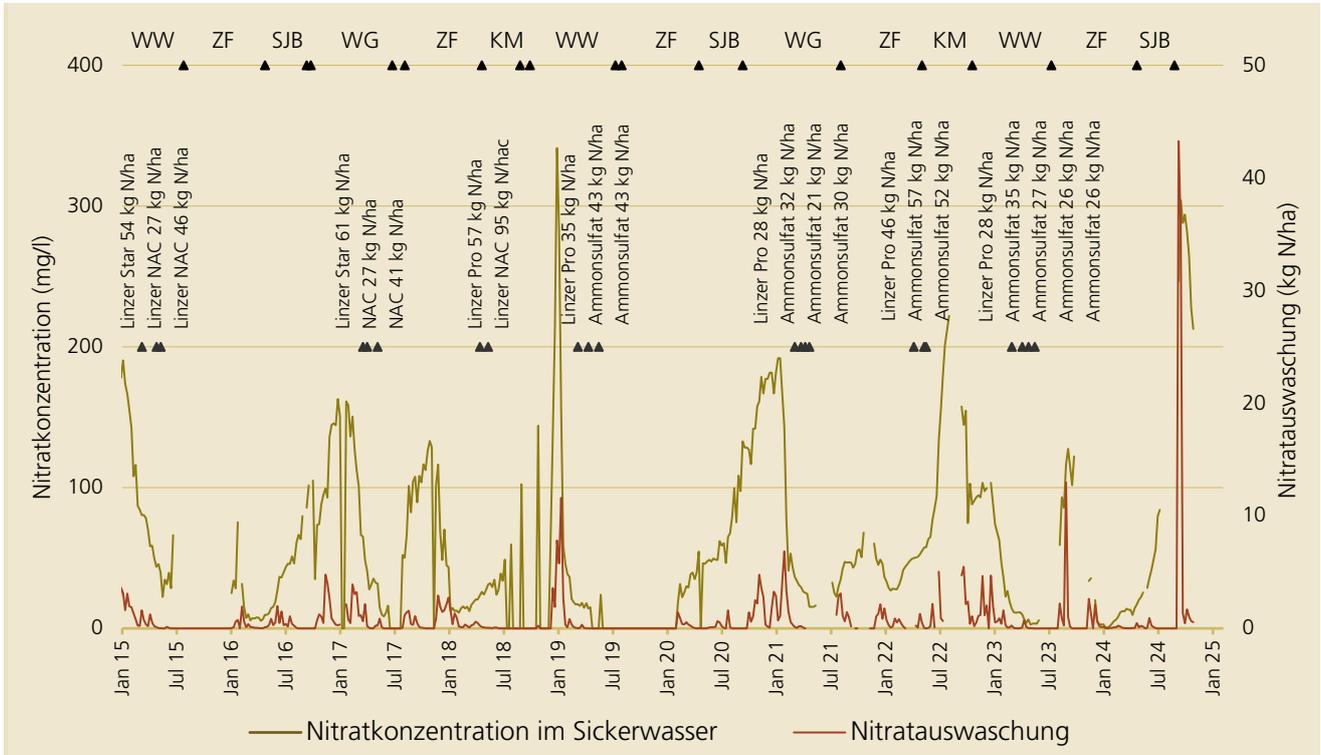


Abb. 5-22: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung (seichtgründig)

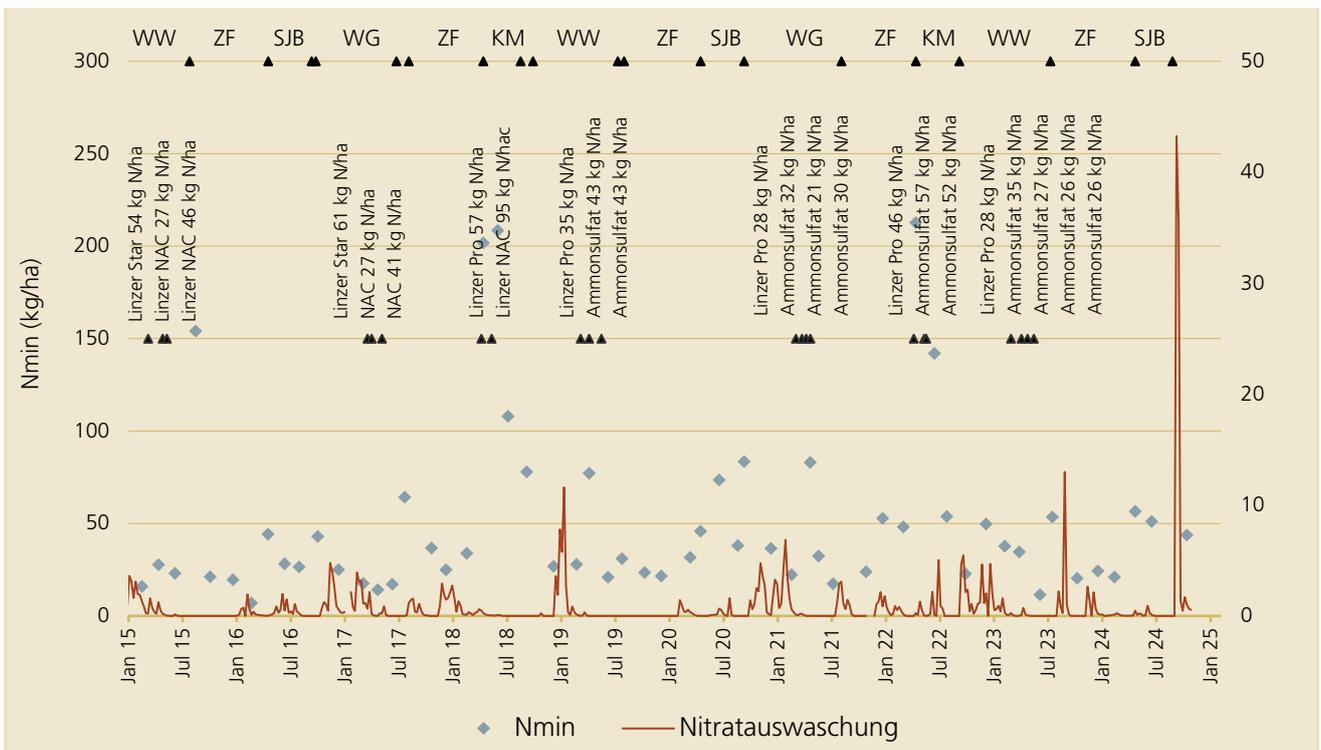


Abb. 5-23: Nitratauswaschung und N_{min}-Gehalte des Bodens (seichtgründig)

5.8 Nitrat auswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg

5.8.1 Niederschlagsmenge und Sickerwasserbildung

In Schwertberg fielen im hydrologischen Jahr 2023/24 in Summe 1086 mm Niederschlag (Abb. 5-24). Die größten Niederschlagsmengen wurden im September 2024, sowie im November und Dezember 2023 verzeichnet. In diesen drei Monaten fielen 53% des Jahresniederschlages verzeichnet. Die Sickerwasserbildung erfolgte beim gestörten Lysimeter hauptsächlich im Dezember (132,2 mm) und September (101,3 mm). Beim ungestörten Lysimeter fand die Sickerwasserbildung hauptsächlich im September (101,6 mm) und Dezember (80,4 mm) statt. Im Vergleich der beiden Lysimeter in Schwertberg ist die Sickerwassermenge bei mgSBg mit gestörtem Bodenaufbau mit 432 mm um 60 mm höher als beim Lysimeter mit ungestörtem Bodenaufbau (371 mm). Die gemessene Sickerwassermenge entspricht bei mgSBg gestörtem Bodenaufbau rund 40%, und bei mgSBu (ungestört) 34% der Niederschlagssumme.

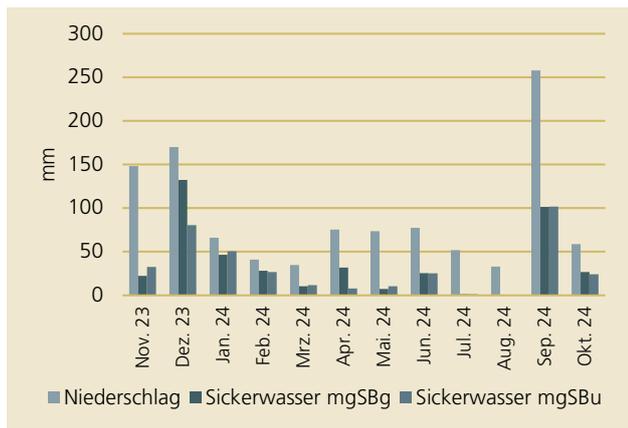


Abb. 5-24: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassersummen (mittelgründig) mgSBg=gestört, mgSBu=ungestört

5.8.2 Sickerwassermenge, Nitrat auswaschung und -konzentration im Sickerwasser

Die ausgewaschene Nitratmenge im hydrologischen Jahr 2023/24 beim Lysimeter mit gestörtem Bodenaufbau war mit 34 kgN/ha 14% geringer als jene des ungestörten Lysimeters (40 kgN/ha) (vgl. Abb. 5-25 und Abb. 5-26). Die Monatsmittelwerte liegen im gestörten Lysimeter mit Ausnahme von April und Oktober leicht unter jenen des ungestörten Lysimeters. (Abb. 5-27, Abb. 5-28).

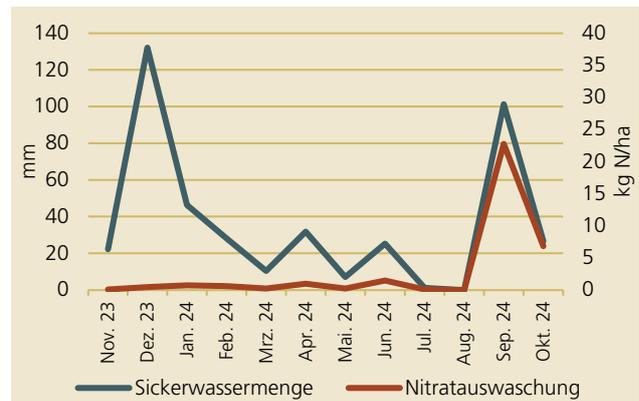


Abb. 5-25: Monatliche Sickerwassermenge und Nitrat auswaschung (mittelgründig) mgSBg

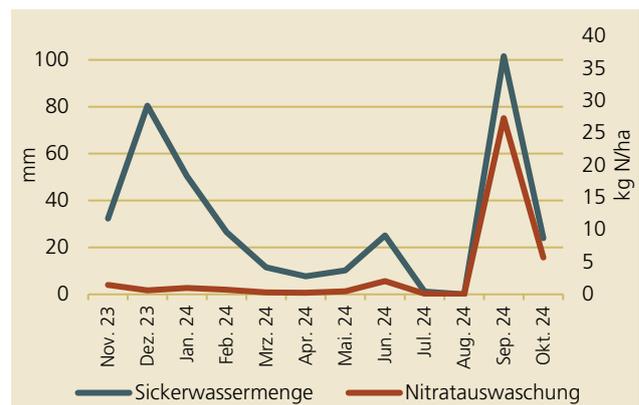


Abb. 5-26: Monatliche Sickerwassermenge und Nitrat auswaschung (mittelgründig) mgSBu

Die durchschnittliche, monatliche Nitratkonzentration im Sickerwasser liegt beim gestörten Lysimeter bei 35,3 mg/l und daher ebenfalls unter dem Wert des

ungestörten Standortes (47,8 mg/l). Beim Lysimeter mgSBg waren die Werte im Beobachtungszeitraum des hydrologischen Jahres 2023/24 im Vergleich zum vergangenen Jahr um mehr als 50% geringer. Die Werte beim Lysimeter mgSBu lagen ebenfalls unter

den Beobachtungen des letzten Jahres (vgl. Abb. 5-27 und Abb. 5-28). Beide Lysimeter zeigten einen ähnlichen Verlauf der Nitratkonzentration im hydrologischen Jahr 2023/24.

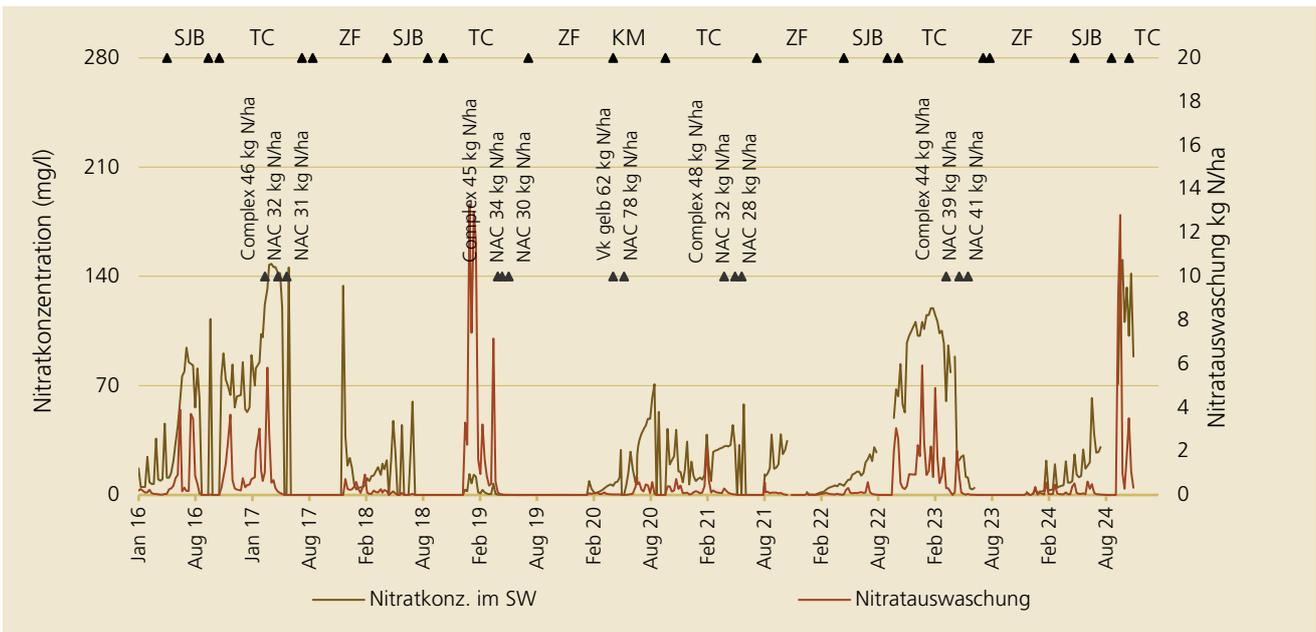


Abb. 5-27: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBg

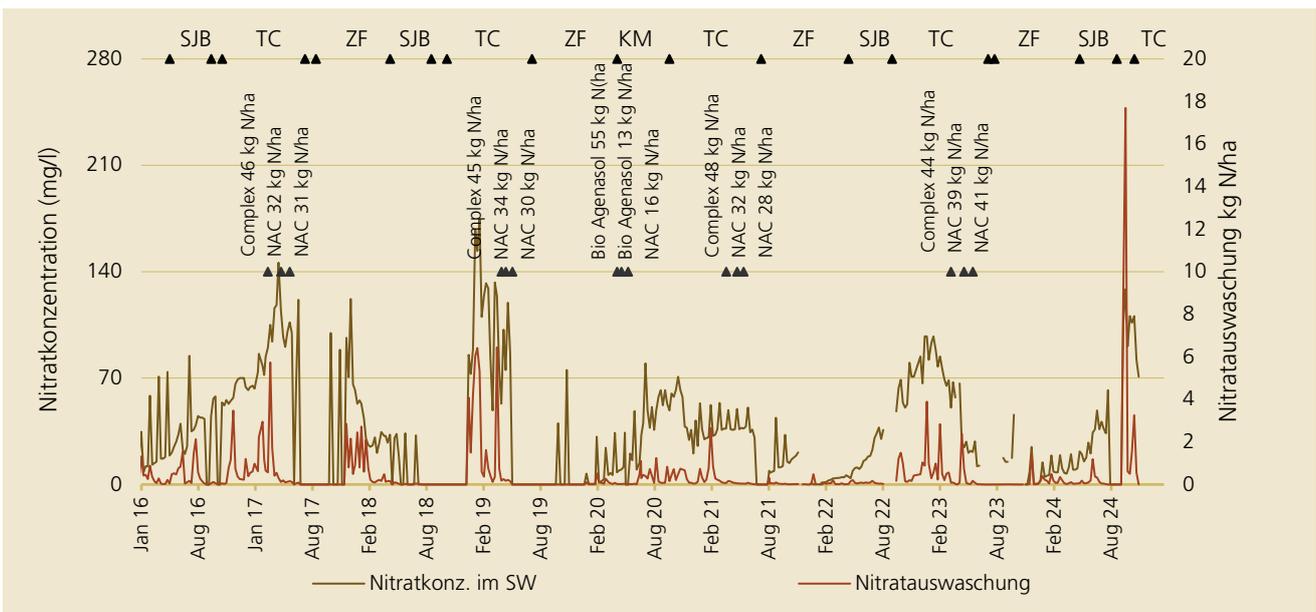


Abb. 5-28: Nitratkonzentration und Nitratauswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBu

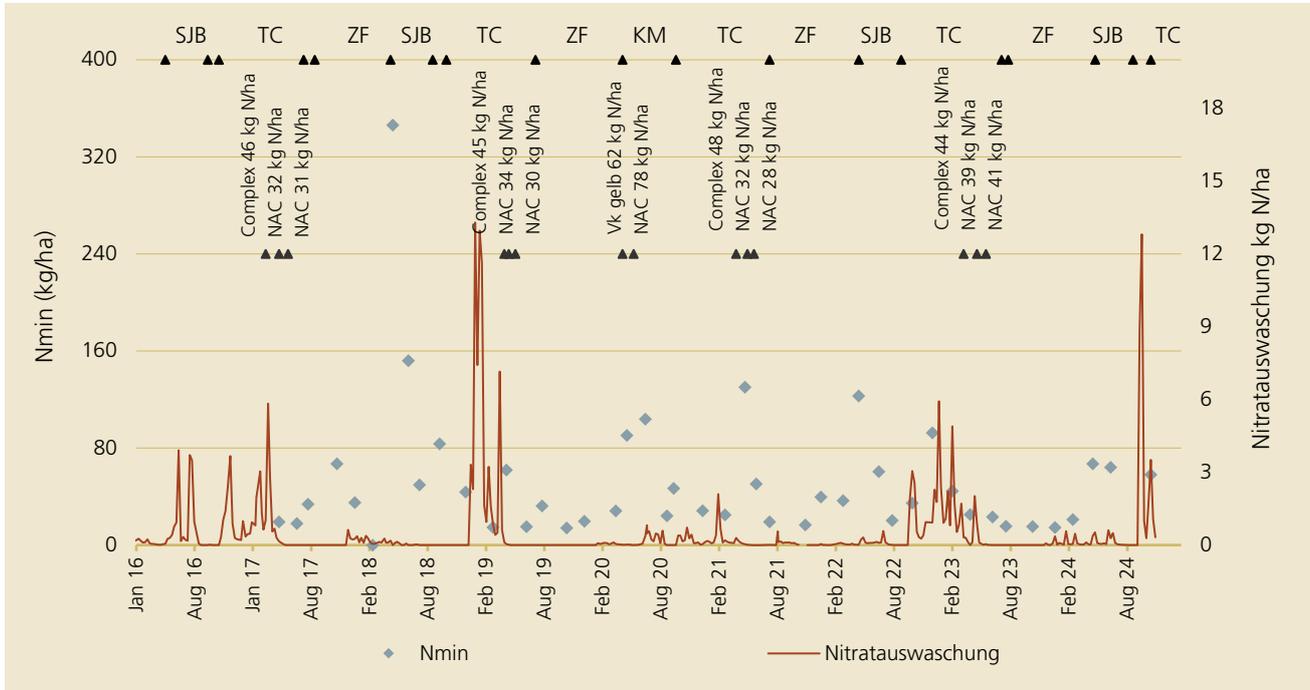


Abb. 5-29: N_{min}-Gehalt des Bodens (ab April 2017) und Nitrat auswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBg

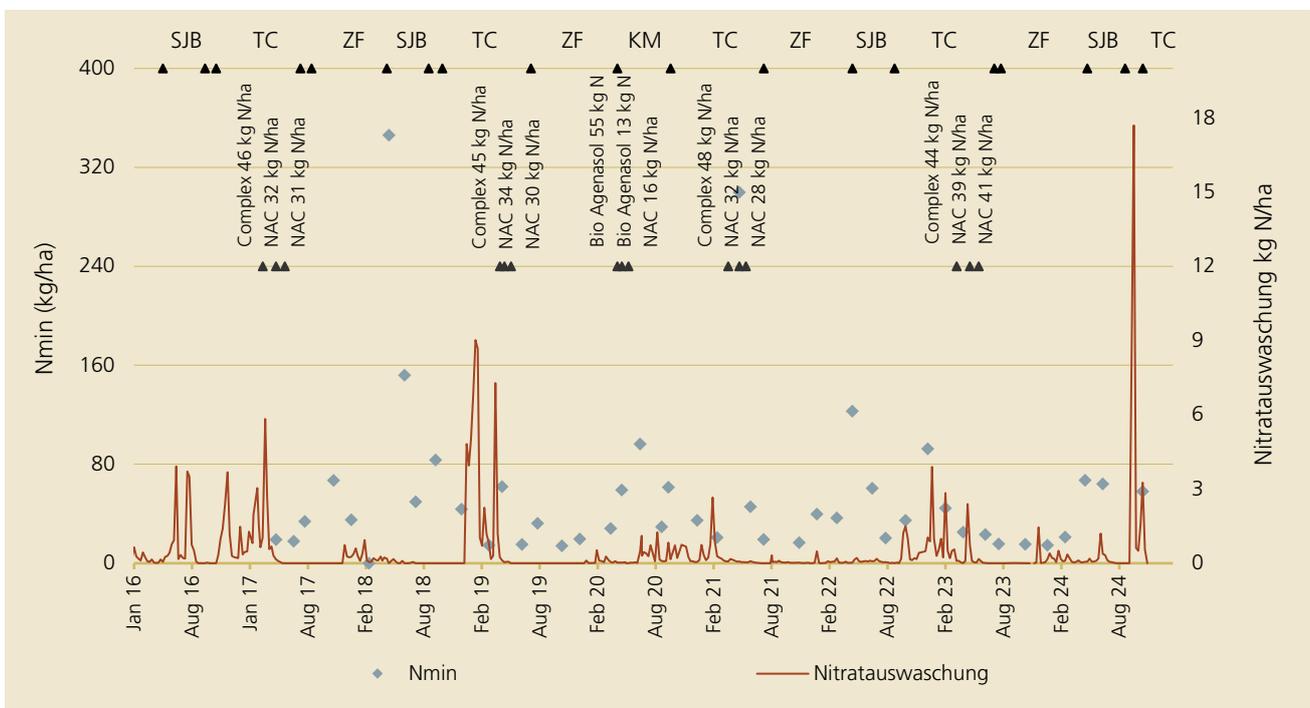


Abb. 5-30: N_{min}-Gehalt des Bodens (ab April 2017) und Nitrat auswaschung ab Jänner 2016 (mittelgründig) mgSBu

5.9 Vergleich der Nitratauswaschung bzw. Nitratkonzentration im Sickerwasser zwischen den Standorten

Die monatlichen Niederschlagssummen verlaufen im hydrologischen Jahr 2023/24 an den 4 Standorte von November bis März und ab August ähnlich. Im April war der Niederschlag in Eberstalzell im Vergleich zu den anderen Standorten jedoch deutlich höher, im Juni an beiden tiefgründigen Standorten. Demgegenüber waren die Sommermonate in Pucking und Schwertberg relativ trocken. Dem entspricht auch die Reihenfolge der Jahresniederschlagssummen mit 1.463 mm in Eberstalzell, gefolgt von Pettenbach (1.280 mm) und Schwertberg (1086 mm). In Pucking war die Niederschlagsmenge am geringsten und erreichte eine Jahressumme von 869 mm (Abb. 5-31).

Während Niederschlagsmaxima im späten Frühjahr (April bis Juni) durchaus typisch sind, stellen die hohen Niederschläge im September eine Besonderheit des Jahres 2024 dar.

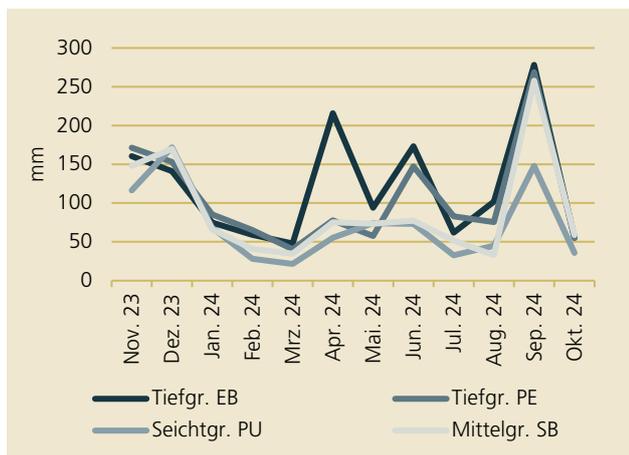


Abb. 5-31: Monatliche Niederschlagssummen

Die Sickerwassermengen folgen nur zum Teil den Niederschlägen. In Pettenbach wurde die höchste Menge an Sickerwasser registriert, gefolgt von Pucking und Eberstalzell. Die niedrigsten Sickerwassermengen wurden in Schwertberg verzeichnet (Tab. 5-4).

Während sich in Pettenbach neben der Höhe der Niederschläge die niedrigere Verdunstung in der Sickerwassermenge abbildet, ist es in Pucking die geringe Wasserspeicherefähigkeit des Bodens. In der Vegetationspause der Wintermonate fallen an allen Standorten infolge höherer Niederschläge größere Sickerwassermengen an und gehen wie jene bis März deutlich zurück. Im Juni bilden sich die höheren Niederschläge an den tiefgründigen Standorten auch im Sickerwasseranfall ab, der an den anderen Standorten aufgrund der Trockenheit bis in den August niedrig bleibt. Im September führen dann Starkniederschläge zu einem für diesen Monat ungewöhnlich hohen Sickerwasseranfall (Abb. 5-32).

Tab. 5-4: Sickerwassermengen und durchschnittliche Nitratkonzentration vom 01.11.23 bis 31.10.24

	SW [mm]	NO ₃ -Kon. [mg/l]
Tiefgr. EB	459	14,5
Tiefgr. PE	620	28,3
Seichtgr. PU	472	88,8
Mittelgr. SB gestört	432	35,3
Mittelgr. SB ungestört	371	47,8

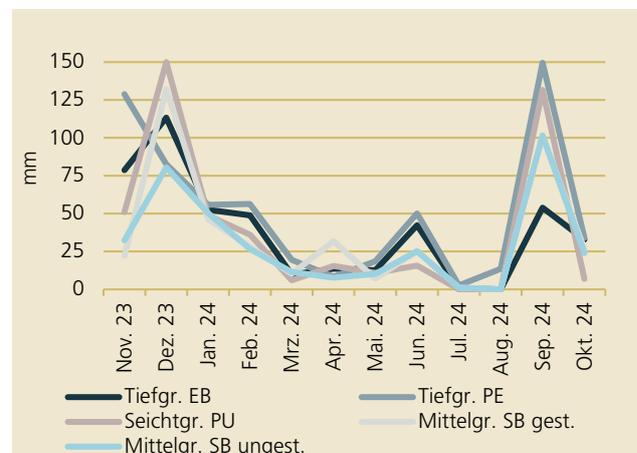


Abb. 5-32: Monatliche Sickerwassermengen

Die höchste durchschnittliche Nitratkonzentration wurde am seichtgründigen Standort in Pucking beobachtet, gefolgt vom mittelgründigen, ungestörten und gestörten Standort in Schwertberg. Die beiden tiefgründigen Standorte Pettenbach und Eberstallzell verzeichneten die geringsten Werte (Tab. 5-4).

Die Nitratkonzentrationen zeigen Unterschiede im Jahrgang je nach Anbau und Bodenverhältnissen. Nur am tiefgründigen Standort in Pettenbach wurde Winterweizen angebaut und gedüngt, gefolgt von einer Zwischenfrucht. An den anderen Standorten folgte auf eine Zwischenfrucht Soja ohne oder mit minimaler Düngung. In Pettenbach verlief dementsprechend die Konzentration bis Anfang Juni am höchsten mit einer Konzentrationsspitze im Mai (61,8 mg NO₃/l, vermutlich in Folge einer Düngung mit NAC) nahm aber dann ab und blieb niedrig. An den anderen Standorten blieb die Nitratkonzentration infolge des Zwischenfruchtanbaus und der unterbliebenen oder geringen Düngung der Sojabohne bis zum August niedrig. Im September führten die Starkniederschläge am seicht- und am mittelgründigen Standort zu einer Stickstoffverlagerung und zu einem deutlichen Anstieg. Nicht so am tiefgründigen Standort. Die Unterschiede dürften in der vorangegangenen Trockenphase ihre Erklärung finden, die am seichtgründigen Standort zu einem sehr niedrigen Ertrag und damit auch einer sehr niedrigen Stickstoffaufnahme führte, in Schwertberg nur zu einem mittleren Ertrag, während im Eberstallzell infolge eines günstigeren Niederschlagsverlaufs und einer höheren Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ein hoher Sojaertrag erzielt wurde und weniger auswaschungsgefährdeter Stickstoff zum Zeitpunkt der Niederschläge vorhanden war. An diesem Standort stieg dafür im Juni die Konzentration infolge der dort gefallenen Niederschläge etwas an.

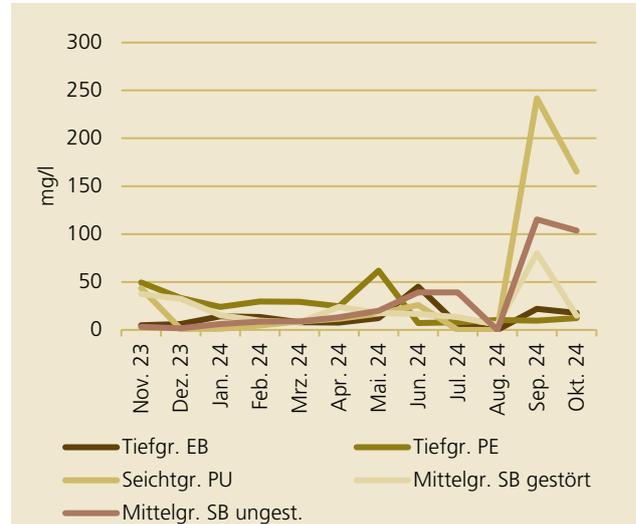


Abb. 5-33: Durchschnittliche monatliche Nitratkonzentrationen

Die geringste Nitratauswaschung erfolgte wie im Vorjahr in Eberstallzell (15,0 kg N/ha), gefolgt vom Lysimeter mit gestörtem Bodenaufbau in Schwertberg (34,4 kg N/ha). Pettenbach sowie der ungestörte Lysimeter in Schwertberg liegen mit 39,6 kg N/ha und 40,0 kg N/ha im Mittelfeld. Die höchste Auswaschung wurde wie in den beiden Vorjahren in Pucking (94,7 kg N/ha) gemessen (vgl. Abb. 5-34).

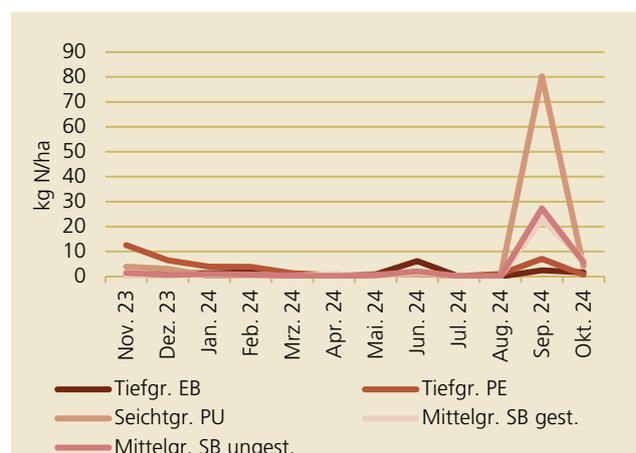


Abb. 5-34: Monatliche Nitratauswaschung

Am seichtgründigen Standort sowie am mittelgründigen Standort in Schwertberg ist der Großteil der ausgewaschenen Stickstoffmenge auf die starken

Regenfälle im September zurückzuführen. In Pucking waren es mit 80,3 kg N/ha 85%, in Schwertberg ungestört mit 27,3 kg N/ha 69% und gestört mit 22,8 kg N/ha 66% der im Gesamtzeitraum ausgewaschenen Menge. Der Standort mit der Hauptfrucht Winterweizen in Pettenbach zeigt die für Winterweizen typische höhere Auswaschung zu Beginn des hydrologischen Jahres im Vergleich zu Jahren mit Zwischenbegrünung.

Während des Messzeitraums seit September 2001 bis November 2024 wurde in Summe am seichtgründigen Standort in Pucking mit 1034 kg N/ha am meisten Stickstoff in Form von Nitrat ausgewaschen (Abb. 5-35). Am tiefgründigen Standort in Eberstalzell waren es mit 603 kg N/ha etwa 42% weniger, am tiefgründigen Standort in Pettenbach mit 528 kg N/ha etwas weniger als die Hälfte. Am neu hinzugekommenen Standort in Schwertberg wurden von Jänner 2016 bis November 2024 in Summe 220 kg N/ha (gestört) bzw. 188 kg N/ha (ungestört) ausgewaschen.

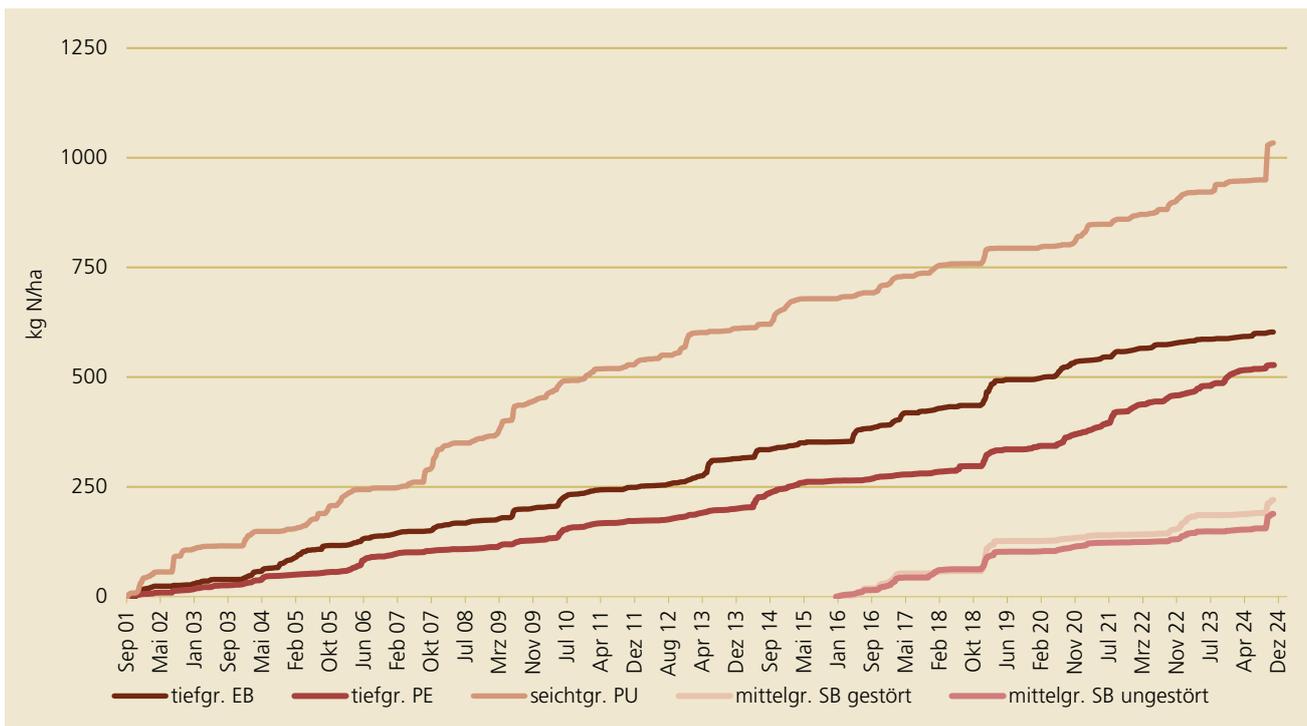


Abb. 5-35: Summe der als Nitrat ausgewaschenen Stickstoffmenge an den vier Standorten

5.10 Einfluss des Stickstoffsaldos auf die Nitratverlagerung

Zur Berechnung des Stickstoffsaldos wurde die Differenz aus gedüngter Stickstoffmenge und Stickstoffentzug gebildet. Da die Stickstofffixierung durch Leguminosen nicht ermittelt wurde, wurde in Jahren, in denen Leguminosen angebaut waren, die Vorfruchtwirkung gemäß den Richtlinien für die Sachgerechte Düngung als Stickstoffsaldo eingesetzt. Als Entzug wurden die vom Feld abgeführten Produkte bewertet. Der Entzug durch Stroh wurde also zur Berechnung des N-Saldos nur herangezogen, falls dieses abgeführt wurde.

Eine aussagekräftige Übereinstimmung zwischen Auswaschung und N-Saldo ergibt sich nur, wenn der Wirtschaftsdünger in seiner feldfallenden Wirkung bewertet wird. Eine Bewertung mit der Jahreswirksamkeit würde an den tiefgründigen Standorten, wo regelmäßig Wirtschaftsdünger eingesetzt wurde, einen N-Saldo ergeben, der deutlich unter der ausgewaschenen Stickstoffmenge liegt.

Ein Vergleich des Stickstoffsaldos mit der Nitratauswaschung seit Beginn der Beobachtungen 1994/95 zeigt langfristig auf den tiefgründigen Standorten eine gute Übereinstimmung, auch wenn bei der Betrachtung einzelner Jahre Abweichungen auftreten (Abb. 5-36 und Abb. 5-37), wobei in Pettenbach eine Rolle spielen dürfte, dass der seit wenigen Jahren eingesetzte Wirtschaftsdünger erst zeitverzögert zu einem Anstieg der Nitratkonzentration im Sickerwasser führt. Am seichtgründigen Standort in Pucking lässt sich die Höhe der Auswaschung nicht mit dem Stickstoffsaldo erklären (vgl. Tab. 5-3). Obwohl seit 2000 der N-Saldo weitgehend ausgeglichen oder nur schwach positiv ist, findet dennoch eine laufende Stickstoffauswaschung statt (Abb. 5-38). In diesem Fall ist die Mineralisierung von ausreichend vorhandenem nachlieferbarem Stickstoff des Bodens als Ursache zu sehen, der auf dem seichtgründigen Boden in Zeiten geringer Pflanzenaufnahme sehr rasch ausgewaschen werden kann.

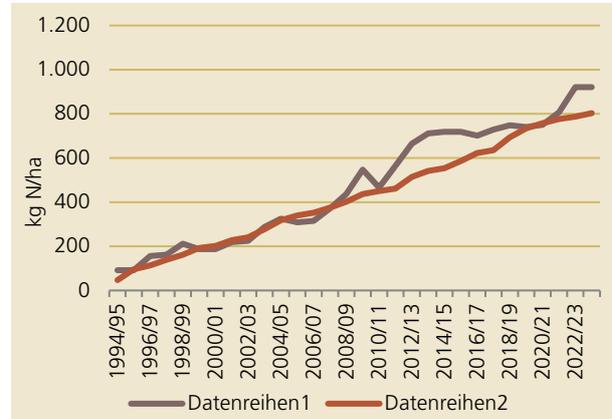


Abb. 5-36: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Eberstalzell

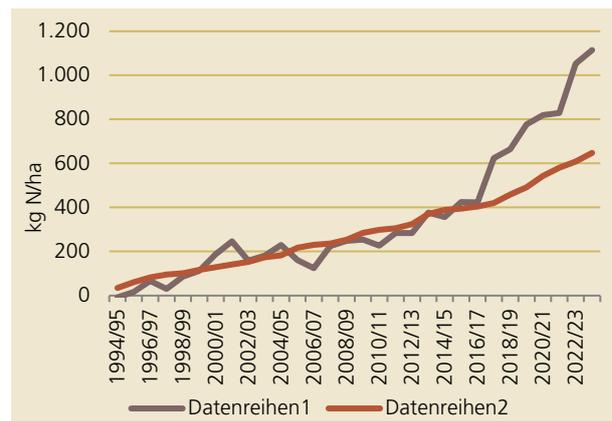


Abb. 5-37: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Pettenbach

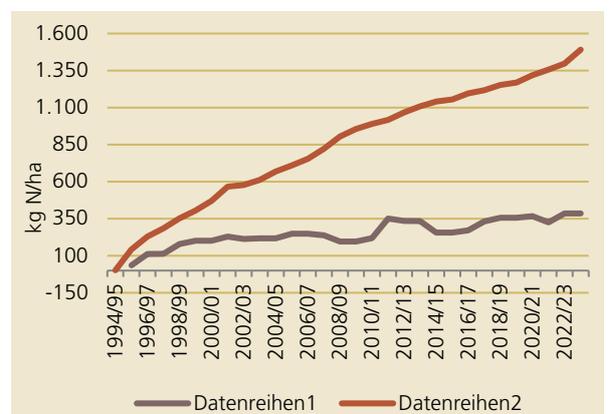


Abb. 5-38: Summenlinien von Stickstoffsaldo und Stickstoffauswaschung am Standort in Pucking

5.11 Phosphorbilanzen

In Eberstolzcell erfolgte die Phosphorzufuhr in Form von Schweinegülle am 27.04.2024 mit 34 kg P₂O₅/ha. Auf dem Standort in Pettenbach erfolgte am 08.03.2024 eine Düngung mit Biogasgülle mit 25 kg P₂O₅/ha. Am 01.05.2023 wurde erneut mit Putenmist gedüngt (253 kg P₂O₅/ha). In Pucking erfolgte keine Phosphordüngung. Der Standort in Schwertberg wurde am 11.03.2023 mit 35 kg P₂O₅/ha gedüngt.

Die Standorte Eberstolzcell, Pettenbach und Pucking weisen nach der Ernte eine negative Phosphorbilanz auf, mit Ausnahme am Lysimeter in Eberstolzcell, wo aufgrund der geringen Erntemenge weniger Phosphor abgeführt wurde und der Saldo daher im Positiven liegt. In Schwertberg konnten im Jahr 2024 keine Ernteproben genommen werden, weshalb keine näheren Informationen zum P₂O₅-Gehalt und zur Erntemenge vorhanden sind (Tab. 5-5).

Die Ergebnisse der Bilanzen für die Ernteabfuhr zwischen den Lysimeterflächen und den Mittelwerten sind auf den Standorten Pettenbach und Pucking ähnlich.

Tab. 5-5: Phosphorbilanzen für das Erntejahr 2024 (P₂O₅)

	Tiefgr. Standort in Eberstolzcell tgEB		Tiefgr. Standort in Pettenbach tgPE		Seichtgr. Standort in Pucking sgPU		Mittelgr. Standort in Schwertberg
	----- kg P ₂ O ₅ /ha -----						
Phosphorzufuhr aus Düngung	34		25		0		35
Entzug durch die Pflanzen	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	Lysimeter	MW	MW
Entzug durch das Korn	21	60	62	60	4	7	-
Entzug durch das Stroh	5	6	9	10	9	10	-
Summe Entzug	26	65	72	70	13	18	-
Abfuhr durch Ernte	21	60	62	60	4	7	-
Bilanz Korn	13	-26	-37	-35	-4	-7	-
Bilanz Korn + Stroh	8	-31	-47	-45	-13	-18	-
Bilanz Ernte	13	-26	-37	-35	-4	-7	-

5.12 Phosphatauswaschung

Der jahreszeitliche Verlauf der Phosphatauswaschung im Jahr 2023/24 folgt im Wesentlichen dem Sickerwasseranfall (Abb. 5-39). Die mit Abstand höchste Auswaschsumme wurde am seichtgründigen Standort

in Pucking erzielt mit 0,57 kg P₂O₅/ha. Es folgen gleichauf die beiden Standorte Eberstolzcell und Schwertberg (gestört) mit jeweils 0,19 kg P₂O₅/ha, sowie Schwerterg (ungestört) mit 0,20 kg P₂O₅/ha. In Pettenbach wurde die geringste Summe mit insgesamt 0,12 kg P₂O₅/ha ausgewaschen. Die Auswaschungs-

spitzen erfolgten im Dezember 2023, sowie im September 2024 während des langandauernden Niederschlags. In Eberstalzell zeigt sich eine dritte Spitze im Juni 2024. Obwohl in diesem Zeitraum bei allen Standorten höhere Sickerwassersummen auftraten, wirkte sich dieser Umstand nur in Eberstalzell auf eine verstärkte P-Auswaschung aus. Insgesamt sind die Werte der Phosphatauswaschung gering, mit Ausnahme von Pucking, wo aufgrund des seichteren Bodens im Vergleich zu den anderen Standorten stärkere Ausschläge der monatlichen Phosphatauswaschung zu verzeichnen sind.

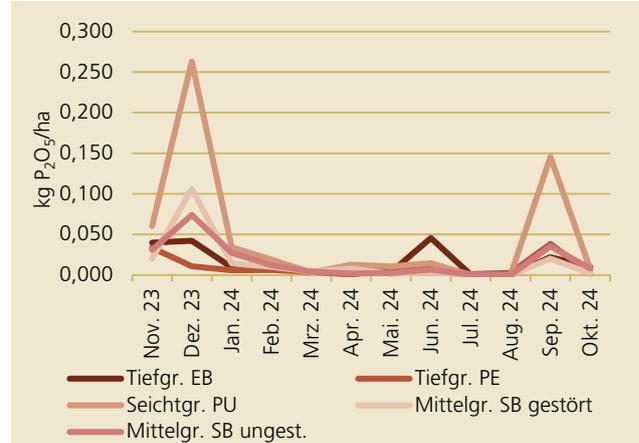


Abb. 5-39: Monatliche Phosphatauswaschung

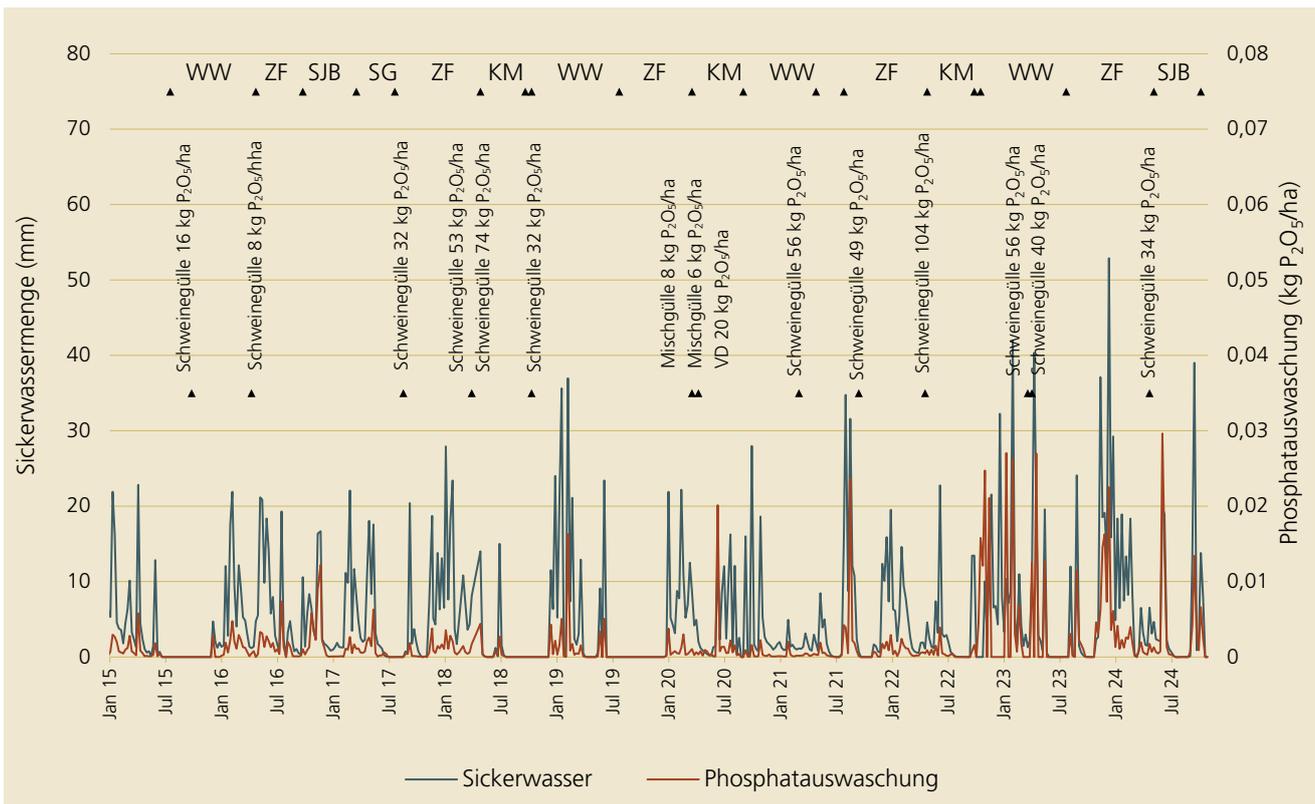


Abb. 5-40: Phosphatauswaschung am tiefgründigen Standort in Eberstalzell

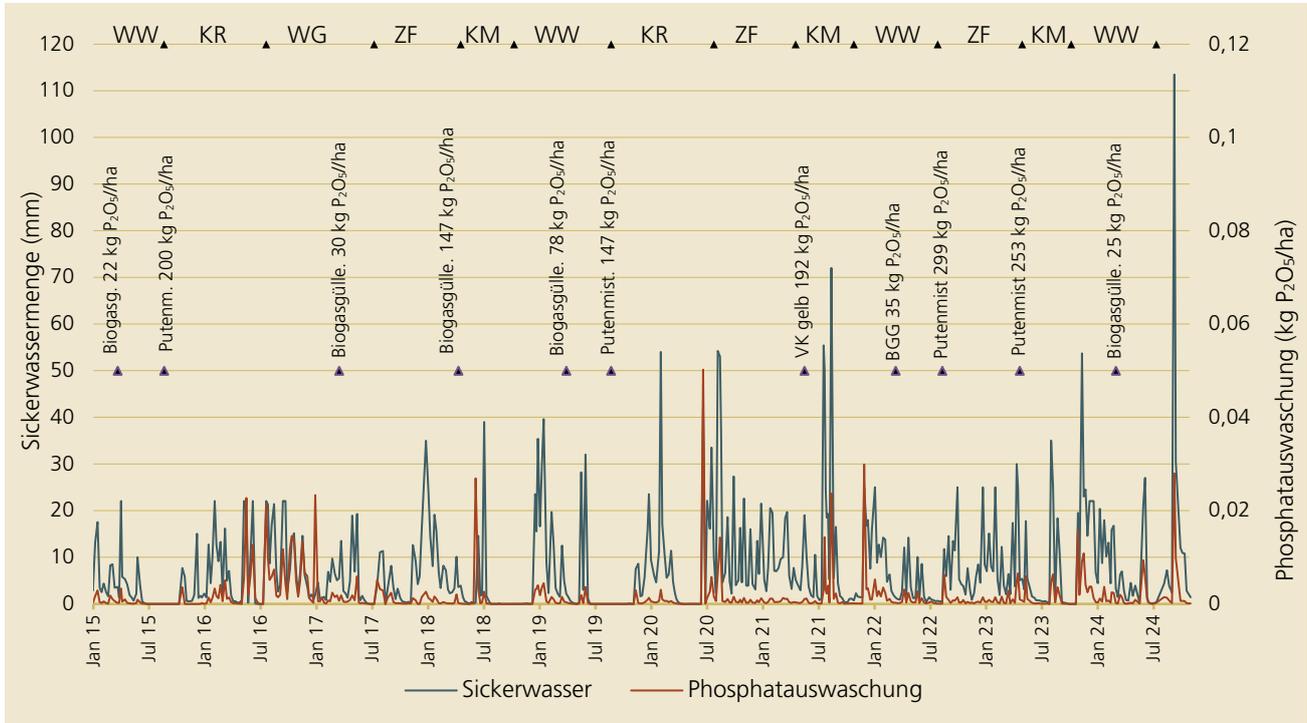


Abb. 5-41: Phosphatauswaschung am tiefgründigen Standort in Pettenbach

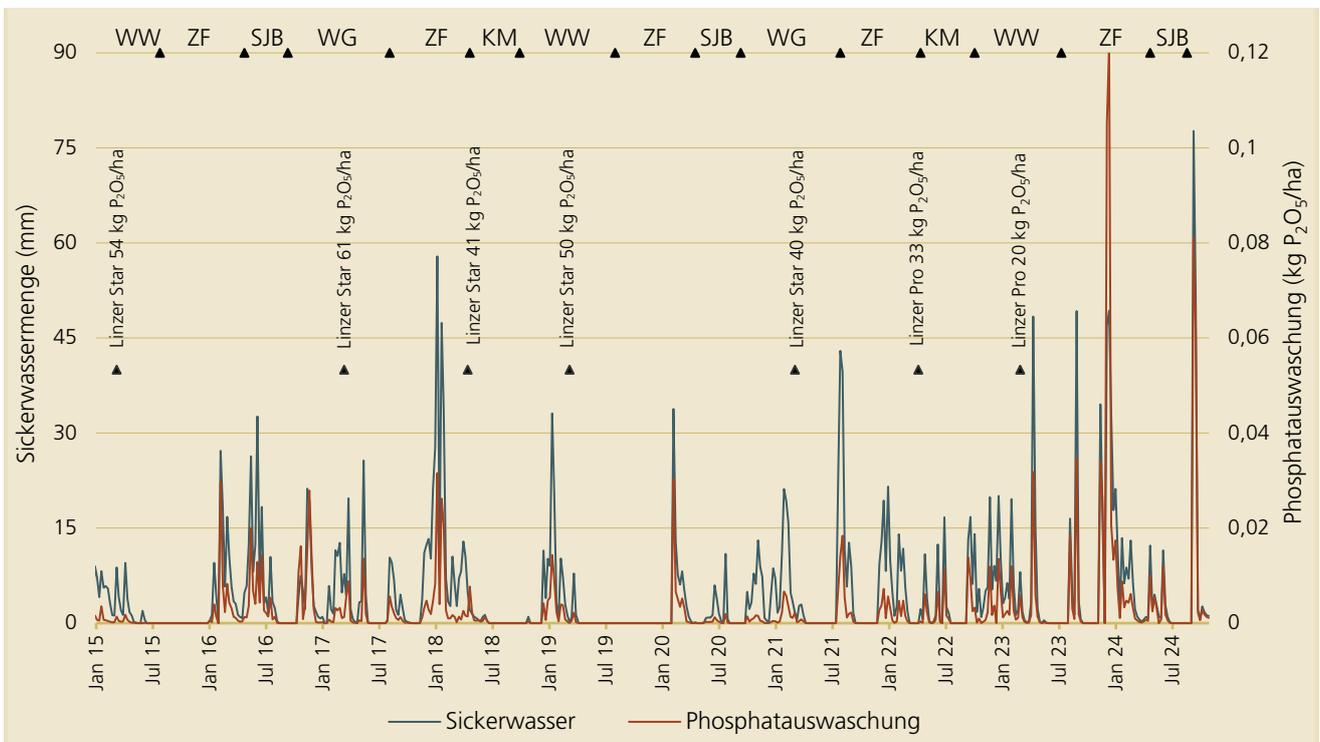


Abb. 5-42: Phosphatauswaschung am seichtgründigen Standort in Pucking

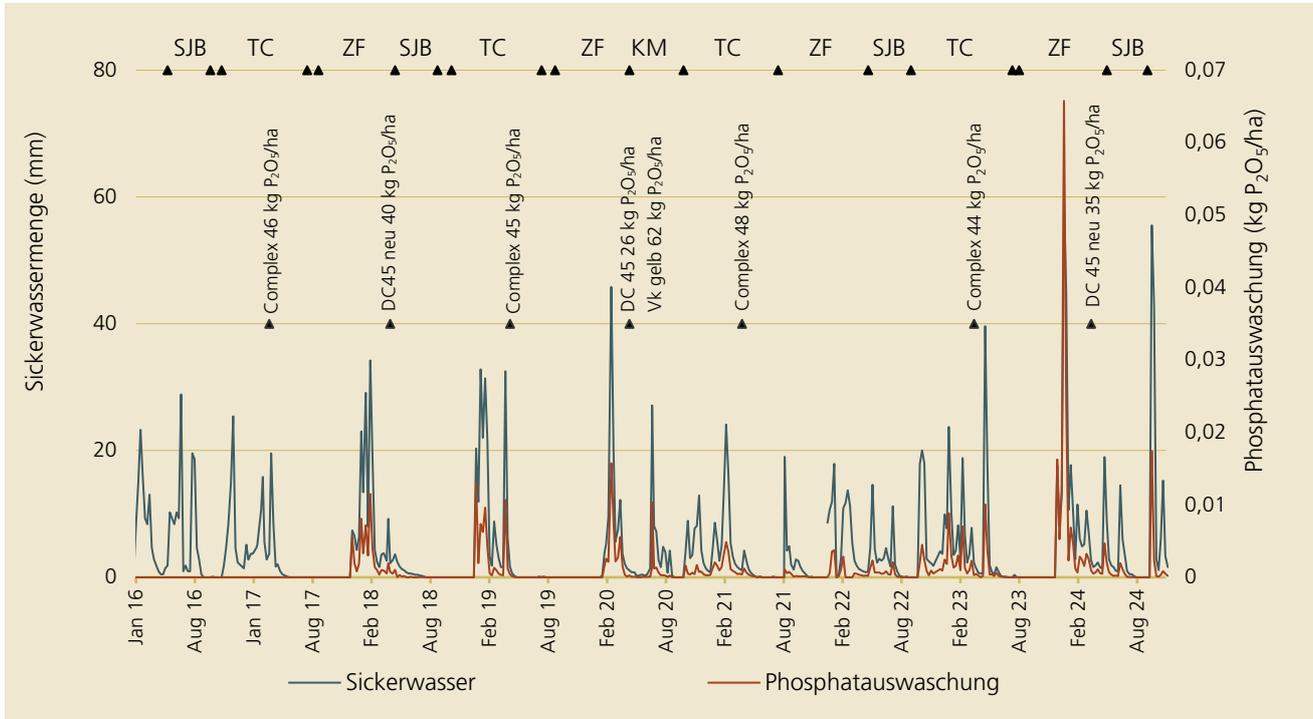


Abb. 5-43: Phosphatauswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg (gestörter Bodenaufbau)

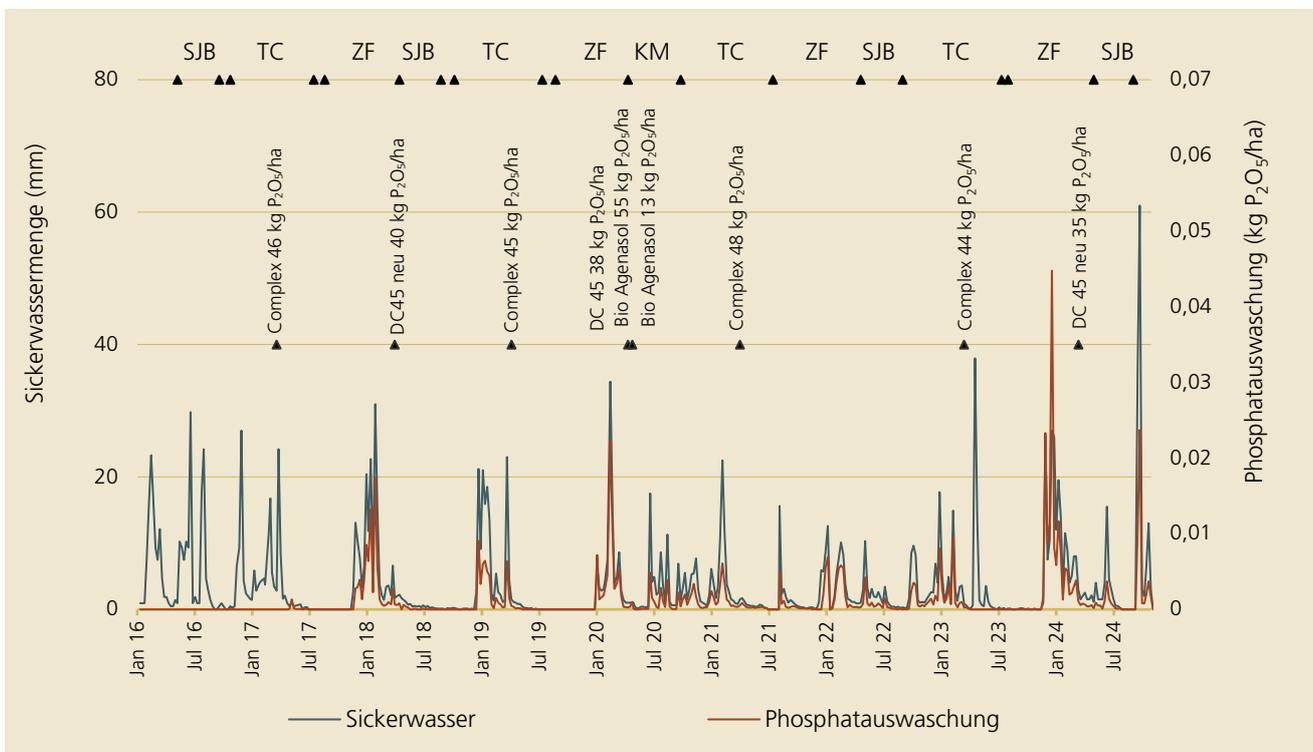


Abb. 5-44: Phosphatauswaschung am mittelgründigen Standort in Schwertberg (ungest. Bodenaufbau)

Seit Beginn der Messreihe wurden am tiefgründigen Standort in Eberstanzell insgesamt 1,71 kg P₂O₅/ha ausgewaschen und am tiefgründigen Standort in Pettenbach 1,88 kg P₂O₅/ha. Am seichtgründigen Standort in Pucking wurde seither mit 3,22 kg P₂O₅/ha annähernd die doppelte Menge von Eberstanzell ausgewaschen. (Abb. 5-45). Am Standort in Schwertberg wurde seit Jänner 2016 0,49 kg P₂O₅/ha beim Lysimeter mit gestörtem Bodenaufbau und 0,57 kg P₂O₅/ha beim Lysimeter mit ungestörtem Bodenaufbau ausgewaschen.

Im hydrologischen Jahr 2023/24 liegt die P-Auswaschung in Eberstanzell im Bereich des Vorjahres. In Pettenbach wurde die P-Auswaschung um ca. 140% erhöht. Der Standort Pucking verzeichnete einen Zuwachs von 130%. Die Sickerwasserproben aus Schwertberg registrierten eine um 148% erhöhte P-Auswaschung am gestörten Standort. Die P-Auswaschung am ungestörten Standort ist im Vergleich zum Vorjahr mehr als 5-mal höher. In Summe waren die P-Verluste mit dem Sickerwasser im hydrologischen Jahr 2023/24 um etwa 220% höher als im Vergleichszeitraum des vorigen Jahres. Im Vergleich dazu erhöhte sich die Sickerwasserkonzentration zum Vorjahr um 90%.

Die durchschnittliche Phosphatkonzentration im Sickerwasser lag in diesem Jahr auf allen 4 Standorten deutlich unter dem Grundwasserschwellenwert von 0,30 mg PO₄/l.

Die mittlere PO₄-Konzentration im Sickerwasser war in Pucking am höchsten, gefolgt von Schwertberg (ungestört). In Schwertberg (gestört) und Eberstanzell wurden ähnliche PO₄-Konzentration bestimmt und in Pettenbach wurde die geringste Menge registriert (Tab. 5-6).

Tab. 5-6: Sickerwasser, P₂O₅-Verluste und mittlere PO₄-Konzentration im Sickerwasser vom 01.11.23 bis 31.10.24

	SW [mm]	P ₂ O ₅ - Verlust [kg/ha]	PO ₄ -Kon. [mg/l]
Tiefgr. EB	459	0,190	0,055
Tiefgr. PE	620	0,121	0,026
Seichtgr. PU	472	0,569	0,161
Mittelgr. SB gestört	432	0,189	0,059
Mittelgr. SB ungestört	371	0,203	0,073

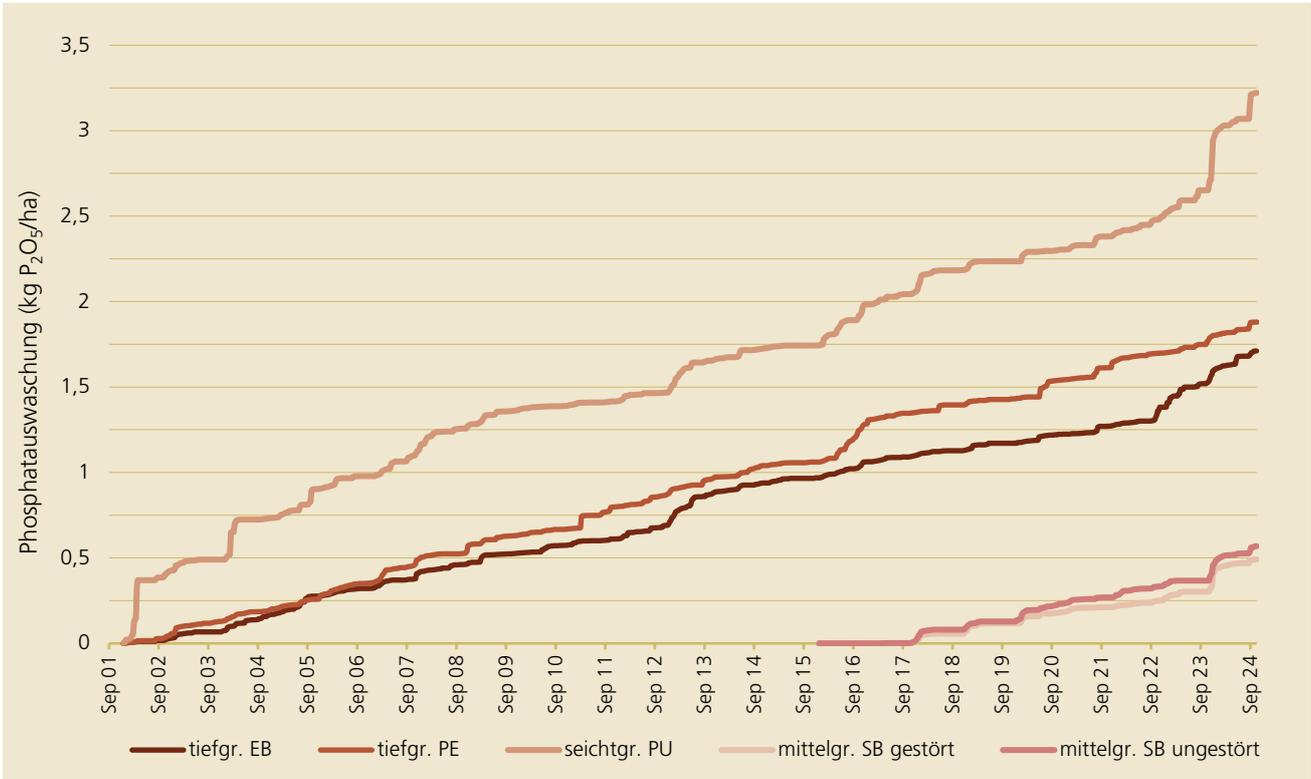


Abb. 5-45: Summe der ausgewaschenen P₂O₅ Menge.

6 Hydrographische Auswertung der UZ-Messstelle Pettenbach

6.1 Allgemeines

Seit 2013 läuft die hydrographische Bodenwasser-messstelle der Ungesättigten Zone Pettenbach. Sie besteht aus einem mit Gipsblöcken, Tensiometern (für die Matrixpotentialmessung), Temperatursensoren und Wassergehaltssensoren in den Tiefen 10, 35, 60, 90, 120, und 140 cm unter Grund bestückten Freilandprofil sowie aus einem Schwerkraftlysimeter, welches seit 1995 im Zuge des Forschungsprojektes betrieben wird. Auch dieses Lysimeter wurde in den gleichen Tiefen mit Matrixpotential- und Wassergehaltssensoren bestückt. Die seit 2001/2 betriebene Klimastation liefert kontinuierliche Niederschlags-, Temperatur-, Globalstrahlungs-, Luftfeuchte- und Windgeschwindigkeitswerte.

6.2 Hydrographische Messergebnisse

Die (mindestens) 10-jährige Laufzeit der verschiedenen Geber erlaubt eine vergleichende Gegenüberstellung des Jahres 2024 mit den bisherigen Messergebnissen. Dies erfolgt in Darstellungen, in welchen die Bandbreite der bisherigen Messergebnisse – also die je beobachteten Tagesmaxima und Tagesminima der dargestellten Zeitreihe - bis incl. 2023 als Hintergrund fungiert, das Vergleichsjahr (2023, blau) und das Bearbeitungsjahr (2024, rot) farblich unterschieden werden.

Da die Messstelle im ersten Halbjahr 2024 außer Betrieb war, sind die Auswertungen lückenhaft, die meteorologischen Auswertungen erfolgten mit Hilfe von benachbarten Messstellen.

In Abb. 6-1 bis Abb. 6-2 werden solcherart die Niederschlags- und Lufttemperaturverhältnisse, teilweise inkl. der Vergleichsmessstelle in Vorchdorf, dargestellt. 2024 war im 1. Halbjahr ein mitteltrockenes Jahr, ab Mitte Juli bis Anfang September extrem trocken mit

dem anschließenden Starkregenereignis im September. Dieses führte die Jahressummenlinie wieder in den mittleren Bereich, in welchem das Jahr 2024 wohl auch abschließen wird.

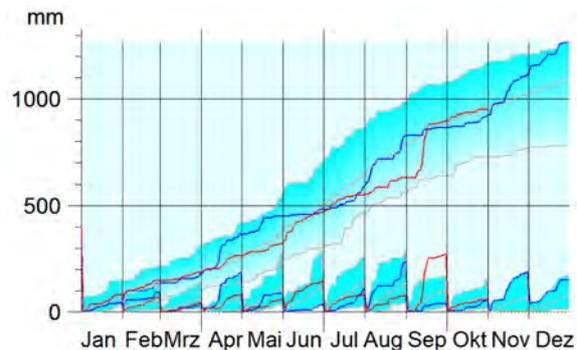


Abb. 6-1: Niederschlags-Jahres- und Monatssummenlinien 2023 (blau) und 2024 (rot) in Pettenbach interpoliert

Die Lufttemperaturen (Abb. 6-2) zeigen frostfreien Winter sowie extrem warmen Februar und März, wodurch die Jahressummenlinie bereits in eine saisonale Maximallage gebracht wird. Dort verbleibt sie durch anschließende normalwarme Monate, bis der sehr warme August sie endgültig oberhalb der bisherigen saisonalen Bandbreite verschiebt. Da auch die Temperaturen aus umgebenden Messstellen interpoliert wurden, sind die Extrema-Aussagen mit Unsicherheit behaftet.

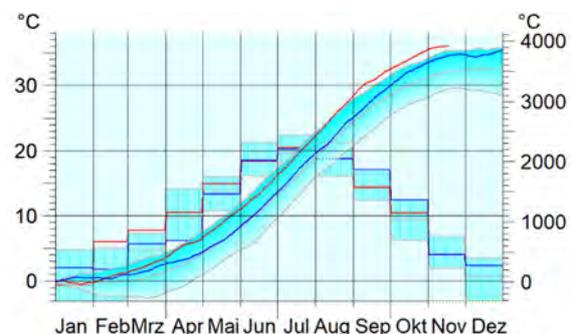


Abb. 6-2: Lufttemperatur-Jahres- und Monatssummenlinie und Monatsmittel 2023 (blau) und 2024 (rot) in Pettenbach interpoliert

Globalstrahlung (Abb. 6-3) und Wind (Abb. 6-4) sind die maßgeblichen Treiber der Verdunstung und Versickerung. Am besten lassen sich diese Größen über Wochenmittelwerte vergleichen. 2024 war der Jänner des normal trüben Frühjahres hell, bereits Anfang April sowie Mai, Juni und August außergewöhnlich Strahlungsreich, ehe der Septembereinbruch die Summenlinie wieder in den Mittelbereich brachte. Wintersturm gab es Anfang und Ende Jänner, das Frühjahr danach ausgesprochen windarm. April, Juni, September und November zeigen viel Wind. Insgesamt scheint 2024 in der ersten Jahreshälfte ein windarmes Jahr gewesen zu sein, in der 2. Jahreshälfte liegt es bis auf den September-Sturm im mittleren Bandbreiten-Bereich und somit deutlich über dem sehr windarmen Jahr 2023. Die Luftfeuchte befand sich das ganze Jahr bis zum September-Ereignis im niedrigen Bereich, insbesondere im März, in welchem jeglicher Niederschlag fehlte.

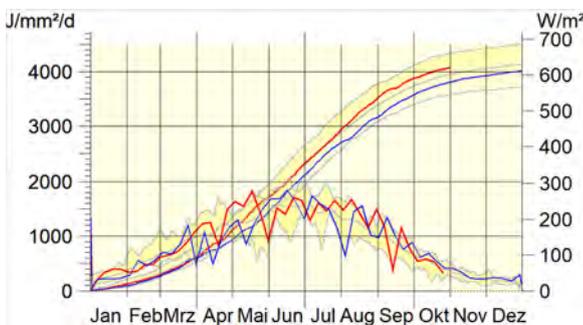


Abb. 6-3: Globalstrahlungs-Jahressummenlinie und Wochenmittel 2023 (blau) und 2024 (rot) der Station Pettenbach

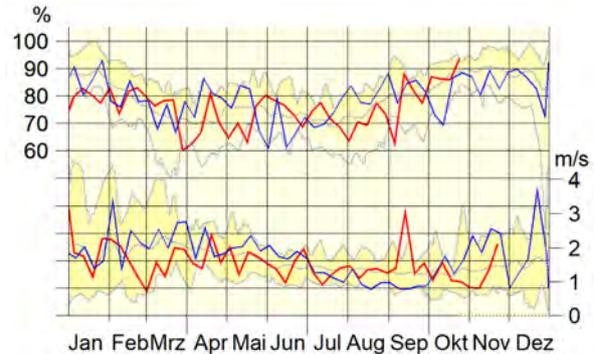


Abb. 6-4: Luftfeuchte- (oben) und Windgeschwindigkeits- (unten) Wochenmittel 2023 (blau) und 2024 (rot)

6.3 Grundwasserneubildung

Die Auswirkungen der klimatischen Verhältnisse auf die Grundwasserneubildungen der Lysimeterstandorte in Pucking, Eberstallzell und Pettenbach werden in den Abb. 6-5 bis Abb. 6-7 dargestellt. Der Vergleichszeitraum startet jeweils 1995. Die Unterschiede sind den unterschiedlichen Böden, im Fall Pucking, den stark unterschiedlichen Niederschlagsdargeboten sowie etwaigen Lysimeterimmanenten Messunsicherheiten geschuldet. Jedenfalls betätigen die 3 Lysimeter einander in den wichtigsten Versickerungsphasen.

Es sind alle Wippen (Pettenbach, Pucking und Eberstallzell) bzw. deren Logger aus unterschiedlichen Gründen 2024 zeitweise ausgefallen – und zwischenzeitlich wieder repariert, sodass auch auf wöchentliche manuelle Ausliterungen zurückgegriffen wurde.

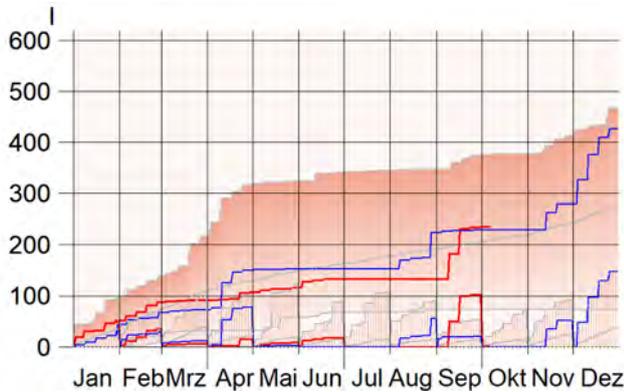


Abb. 6-5: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Pucking 2023 (blau) und 2024 (rot)

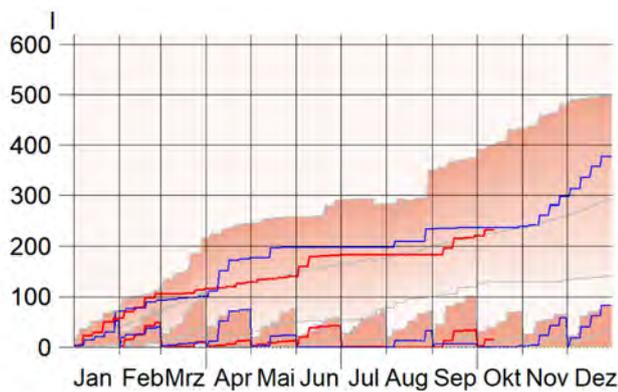


Abb. 6-6: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Eberstalzell 2023 (blau) und 2024 (rot)

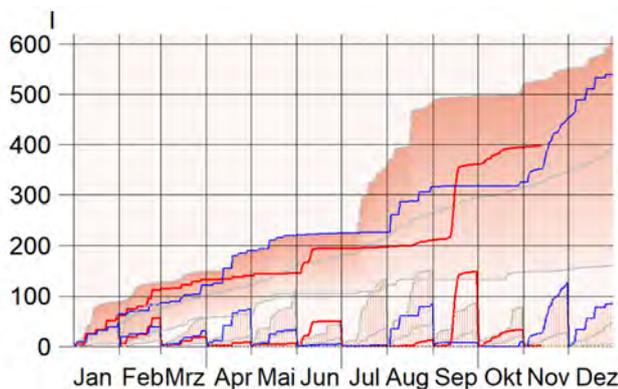


Abb. 6-7: Grundwasserneubildungs-Jahres- und Monatssummenlinien in Pettenbach 2023 (blau) und 2024 (rot)

Aus der Differenz von Niederschlag und Versickerung – zuzüglich einer Winterkorrektur (Okt-Februar-Verdunstung 30 20 10 0 10 gesetzt; Restwerte gesammelt und zu 30-50-20% zu März April Mai dazugezählt), da der Schnee erst verzögert im Frühjahr versickern kann - ergibt sich rechnerisch die Verdunstung, deren Monatssummen der bilanzierten Verdunstung bei der Messstelle Pettenbach in Abb. 6-8 dargestellt ist. Ihre Jahressumme liegt 2024 etwa gleich hoch wie im Vorjahr, wobei der nasse April und das Starkregenereignis im September dafür verantwortlich sind. Juli und August zeigen sehr geringe Verdunstungen, was auf Mangel an Niederschlag und ausgetrockneten Boden zurückzuführen ist.

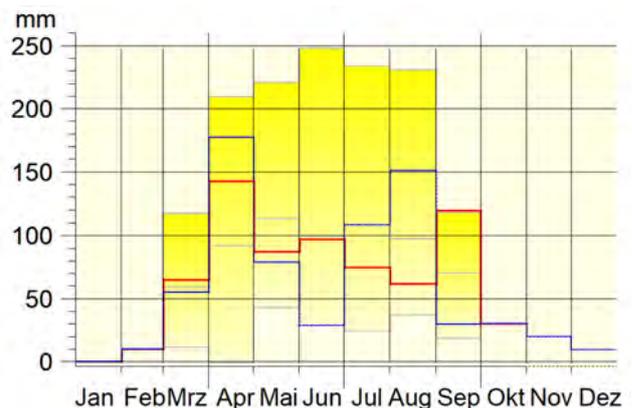


Abb. 6-8: Bilanzierte Verdunstungs-Monatssummen 2023 (blau) und 2024 (rot)

Vernachlässigt wurde bei diesen Bilanzierungen die Änderung des Wasservolumens im Boden. Abb. 6-9 4-Tagesmittel der Wassermenge im Gesamtprofil von 0-160 cm. Es lässt sich abschätzen, dass der Boden in der 1. Jahreshälfte eine deutlich unter der Mittellinie gelegene Wassermenge beinhaltet, die rechnerische September-Verdunstung um 75l durch Bodenwasservolumszunahme reduziert wurde.

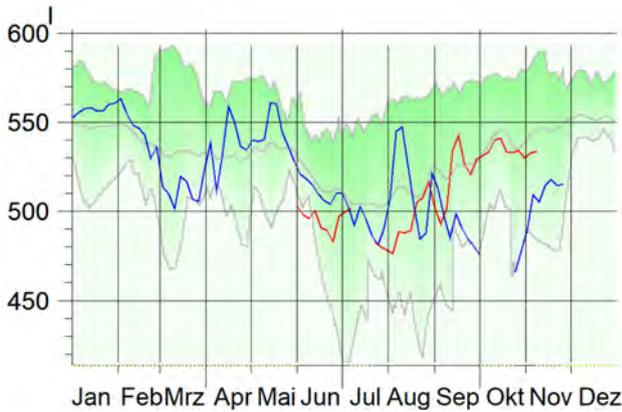


Abb. 6-9: Profilwassermengen (4Tagesmittel) im Bodenprofil Pettenbach 2023 (blau) 2024 (rot)

Abb. 6-10 zeigt auf Basis von Monatssummen und Monatsmitteln die Größenordnung des bei der Bilanzierung vernachlässigten Beitrags des Bodenwasservolumens. Da der Niederschlag und die Versickerung Messgrößen sind, bedeutet ansteigendes Bodenwasservolumen eine Überschätzung der Verdunstung, eine negative Monatsdifferenz eine Unterschätzung der Verdunstung. Naturgemäß gleichen sich diese Beiträge über das Jahr aus, bedeuten also lediglich eine – weitere, zusätzlich zur Winterkorrektur – Verschiebung der Verdunstungssummen.



Abb. 6-10: Monatsbilanzierungen

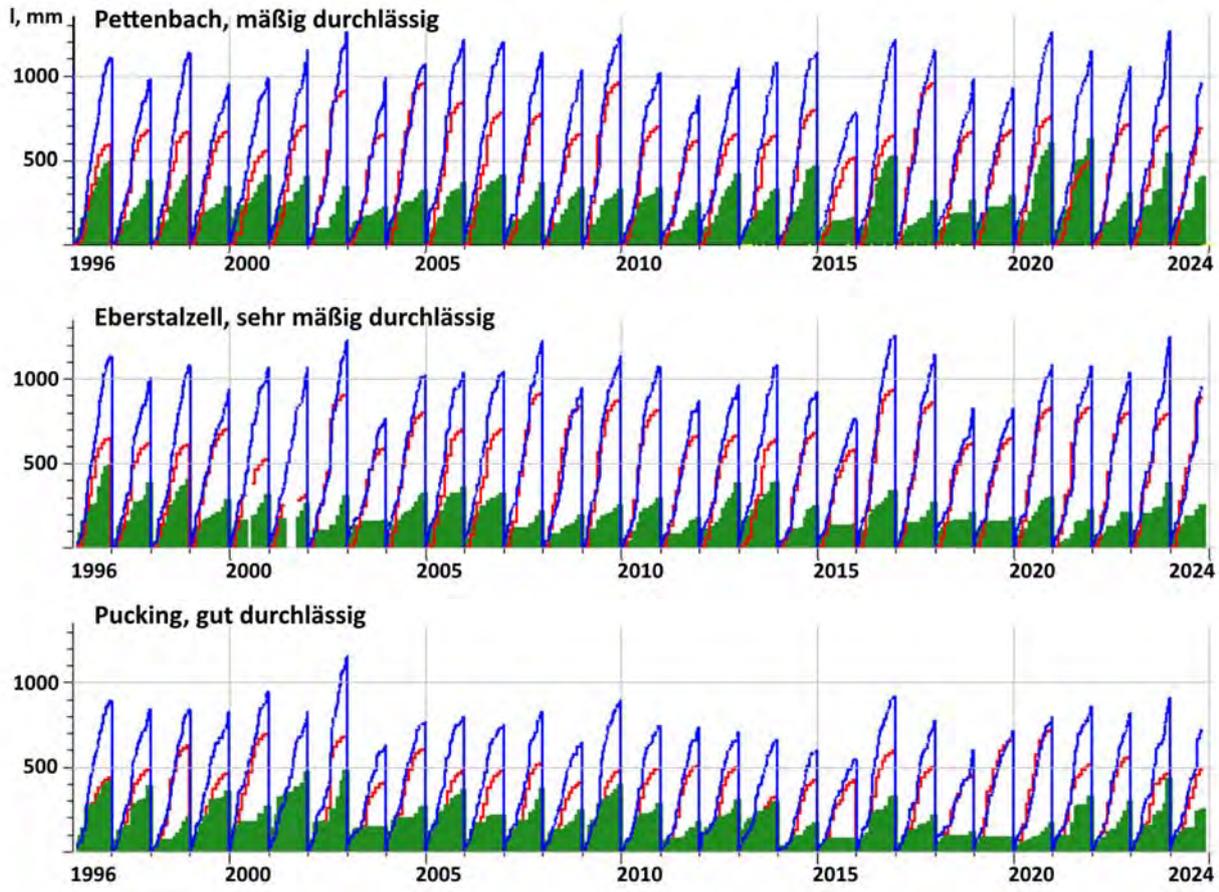


Abb. 6-11: Jahressummen der Versickerungen, bilanzierten Verdunstungen und des Niederschlages der Messstellen Pettenbach (oben), Eberstalzell (Mitte) und Pucking (unten)

Die langjährige Entwicklung der Versickerungen und Verdunstungen wird durch Abb. 6-11 wiedergegeben, in welcher die gemessenen Versickerungen grün, die mit Winterkorrektur bilanzierten Verdunstungen rot und der Niederschlag blau dargestellt sind. Da es seit 1996 durchgehende Versickerungsmessungen in den 3 Lysimetern des Forschungsprojekts gibt, lassen sich gewisse dem Klimawandel zuzurechnende Aussagen treffen.

Zunächst ist es wichtig, die mengenmäßig stark variierenden Niederschlagsverhältnisse im Projektgebiet zu berücksichtigen. Eberstalzell und Pettenbach liegen in der Traun-Enns-Platte und können mit rund einem

Drittel mehr Jahresniederschlag rechnen als Pucking in der Raumeinheit „Unteres Trauntal“.

Dennoch ist allen 3 Standorten gemeinsam, dass die Relation Verdunstung/Versickerung sich ab 1996 von >1 in Pettenbach und Eberstalzell bzw. 1 in Pucking nach 2-3 in den jüngeren Jahren verschiebt. Während in Eberstalzell und Pucking der negative Trend der Versickerung ins Auge springt, wird er in Pettenbach durch einzelne Jahre mit hohen Versickerungssummen wie 2014, 2016, 2020 und 2021 unterbrochen.

In Pettenbach hat die Variabilität der Jahresversickerungen seit 2015 sehr augenscheinlich zugenommen,

wobei sich dieses Phänomen auch in Pucking und abgeschwächt in Eberstallzell zeigt.

Ungeachtet etwaiger Lysimeterfehler lässt sich die Aussage treffen, dass in der Messstellenregion Versickerungen tendenziell abnehmen, Verdunstungen bei ausreichendem Niederschlagsangebot zunehmen und daher aktuell in dieser Region in trockenen Jahren die Versickerung mit 20-30% des Niederschlags, in feuchten mit 30-35 % anzusetzen ist. Begünstigen einzelne Starkregenereignisse die Grundwasserneubildung wie 2024, kann die Versickerung bis auf über 40% des Niederschlags steigen.

Abb. 6-12 zeigt die langjährigen Verläufe der Bodenwassermengen: linksskaliert ist die Wassermenge des Gesamtprofils von 0-160 cm rot und jene unter der Durchwurzelungstiefe braun, rechts skaliert die Wassermenge im Durchwurzelungsbereich von 0-40 cm. Ab 2016 gibt es einen generellen leichten Abwärtstrend im Bodenwasservolumen. Auch das Starkregenereignis im September 2024 konnte die Bodenaustrocknung des 1. Halbjahres (hier mangels Daten nicht sichtbar) nicht vollständig kompensieren, wobei die Aussagen 2024 mit großer Unsicherheit behaftet sind. Gemäß Abb. 6-12 findet dieser permanente Bodenwasserverlust mehr im Boden unterhalb der Durchwurzelungstiefe statt als im Oberboden.

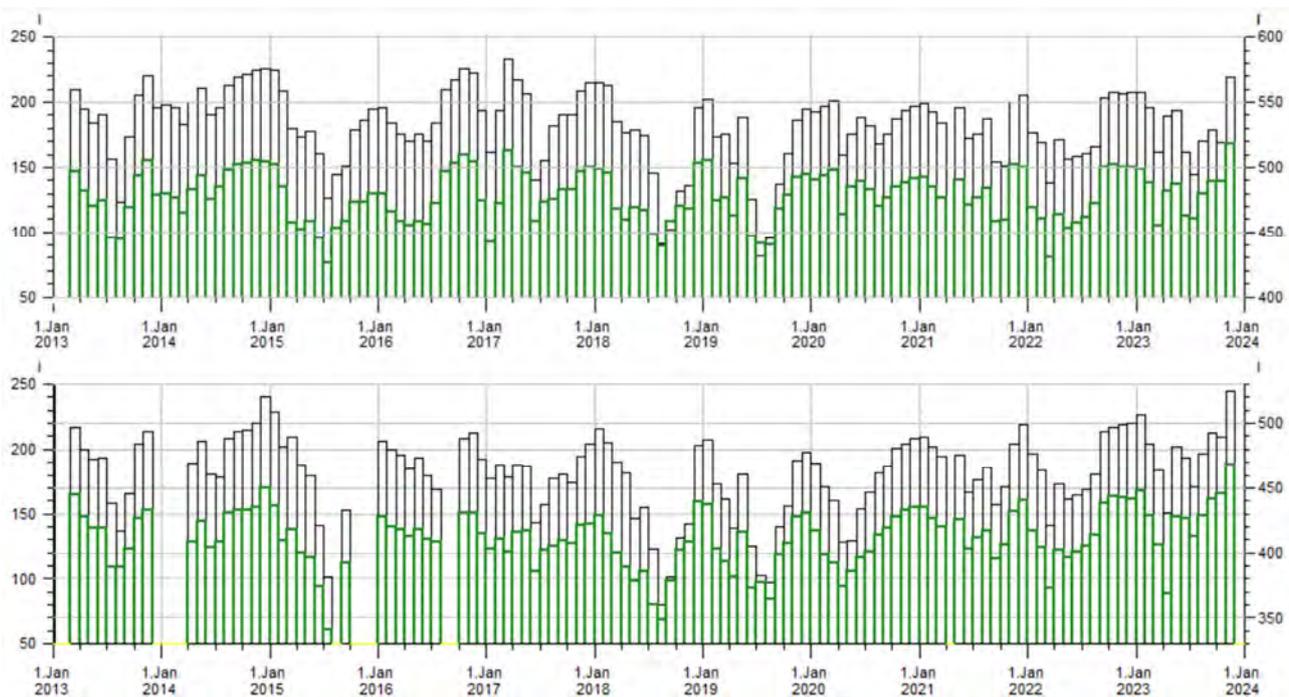


Abb. 6-12: Monatsmittel der Gesamtprofilwassermengen (grün, rechts skaliert) und Wassermenge des durchwurzelten Profilsbereichs (0-40 cm; schwarz, links skaliert) in Pettenbach seit 2013: oben Freiland, unten Lysimeter

6.4 Bodenwasserverhältnisse

Die Messungen der Temperatur, der Saugspannung und des Wassergehaltes in den 6 bis 7 Messebenen des Freilandes werden zu Oberboden (0-25cm; entspricht der AB-Horizontgrenze), Unterboden (25-160cm, das bedeutet 20cm unter den tiefsten Sensor extrapoliert) bzw. durchwurzelter Bereich (0-40cm) und Boden unterhalb des durchwurzelten Bereiches (40-160cm) zusammengefasst, rot dargestellt und wiederum dem Jahr 2023 (blau) gegenübergestellt. Die Ober/Unterbodenunterscheidung ist sinnvoll für die Temperatur- und Saugspannungsauswertungen, die SWI-Auswertungen unterscheiden zwischen durchwurzeltem Bereich und darunter, da die verfügbare Wassermenge direkt in Bezug zu den Pflanzenaktivitäten steht.

Die Lücken in den blauen und roten Jahresganglinien sind entweder auf Entnahmen der obersten Messfühler zu Zeiten der Ackerbearbeitung oder durch Sensor-/Loggerausfälle zu erklären. Wo möglich, werden Messlücken aber durch Interpolationswerte – gedämpfte Phasen-verschobene Werte einer höheren Tiefe oder in Parallelaufzeiten gewonnene Wertepaarverbindungen zweier Sensoren – geschlossen.

6.4.1 Bodentemperatur

Abb. 6-13 zeigt im oberen, links skalierten Diagrammteil die Temperaturen des durchwurzelten Bereiches von 0-40 cm mit den Lufttemperaturen und im unteren, rechts skalierten Diagrammteil die Temperaturen des Bodens im Bereich unter der Durchwurzelung von 40-160cm.

Diese 4Tagesmittel der gewichtet gemittelten Temperaturen des Profils zeigen 2024 im durchwurzelten Bereich 2 Abwärtsspitzen Anfang Juli und im September, deren 2. sich auch gedämpft und zeitverzögert im Boden unter der Durchwurzelung ausmachen lässt. Die präzise Verlaufs-Übereinstimmung mit übertiefen

Abwärtsspitzen der türkis geplotteten Lufttemperaturen – ebenfalls 4-Tagesmittel – mit den Bodentemperaturen im durchwurzelten Bereich überrascht.

Im unteren Boden ist die für den Klimawandel charakteristische Rechtsverschiebung der temperaturextreme – in diesem Fall Septemberwärme – gut sichtbar.

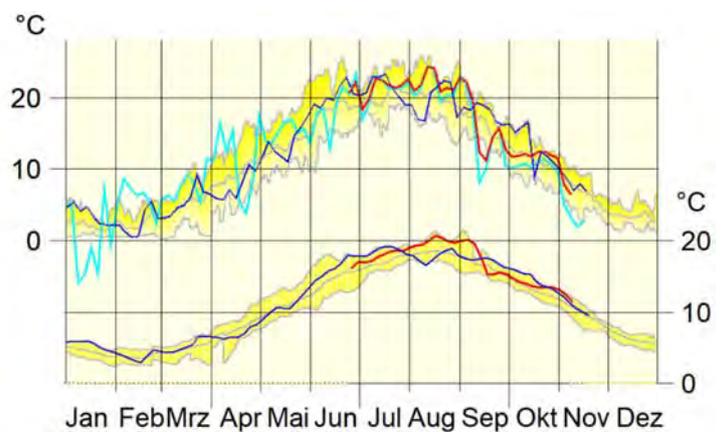


Abb. 6-13: Profil- und Lufttemperaturen (Daten bis Juni fehlend)

6.4.2 Matrixpotential

Das Matrixpotential ist eine unattraktive Größe mit chaotischem Aussehen. Das liegt daran, dass 2 Messsysteme überlagert werden müssen: Tensiometer für den feuchten Bereich mit Obergrenzen von SOLL-800, IST oft 300-400 hPa, und Gipssensoren (Watermark) mit Messbereich bis 4000 hPa für die Quantifizierung von Austrocknungen.

Abb. 6-14 zeigt gewichtet gemittelte Profil-Matrixpotentiale: im oberen Diagrammteil wird der durchwurzelte Boden von 0-40cm links skaliert dargestellt, im unteren Diagrammteil der Boden unter der Durchwurzelungstiefe von 40-160cm rechts skaliert.

Zusätzlich zum Komplettausfall der ersten Jahreshälfte fehlten 2024 wegen Wartungsproblemen auch in der 2. Jahreshälfte wichtige Sensoren und wurden rudimentär rekonstruiert. Sowohl die funktionierenden

Matrixpotentialsensoren als auch die Wassergehalte signalisieren eine nicht extreme Sommeraustrocknung mit Trockenstress erst Anfang September. Im Oberboden wurden sehr bedauerlicherweise die Gipsensoren nicht an den Logger angeschlossen, sodass es kaum Messdaten gibt.

Im Boden unterhalb der Durchwurzelungstiefe haben immerhin 2 Tensiometer halbwegs funktioniert, jenes in Tiefe 4 ist wegen der vorangegangenen Trockenphase bereits bei 150 hPa abgerissen, ließ sich aber in Relation zu Tensiometer 6 rekonstruieren. Tensiometer 5 ist gänzlich unbrauchbar, driftet ohne die sicher stattgefundenen Saugspannungszusammenbrüche anzuzeigen in unplausible Höhen und wurde rudimentär rekonstruiert.

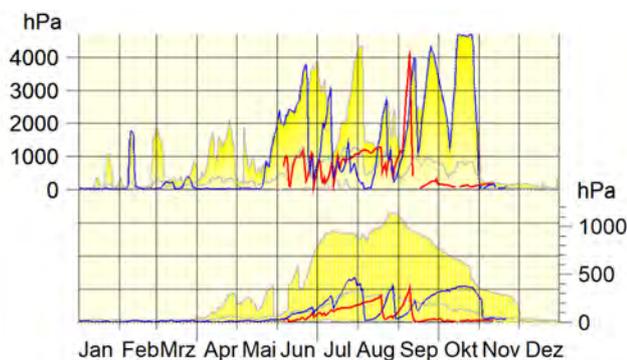


Abb. 6-14: gemittelte Profil-Matrixpotentiale (Daten bis Juni fehlend)

6.4.3 Bodenwassermenge: Wassergehalt und SoilWaterIndex

Der SWI (soil-water-index) wird als auf die nutzbare Feldkapazität (Feldkapazität – Welkepunkt) bezogener volumetrischer Wassergehalt definiert. Maßgeblich sind die für die einzelnen Bodenschichten angenommenen Wassergehalte bei Welkepunkt und Feldkapazität. Diese wurden in einer Kombination aus Literaturangaben, Messergebnissen und Laborauswertungen wie in Tabelle 1 gezeigt angenommen:

Abb. 6-15 zeigt den gewichtet gemittelten SWI-Verlauf des durchwurzelten Bereiches von 35-40 cm im oberen Diagrammteil links skaliert und jenen des Bereichs unterhalb der Durchwurzelung von 40-160 cm im unteren Diagrammteil rechts skaliert.

Zunächst zum **durchwurzelten Bereich**: es ist anzunehmen, dass die Niederschläge des Novembers und Dezember 2023 eine merkbare Bodendurchfeuchtung brachten und das Jahr 2023 im mittleren Bereich (graue Linie) endete. Im 1. Halbjahr 2024 sank die SWI-Kurve aber vermutlich insgesamt ab – vermutlich wegen der fehlenden März- und Aprilniederschläge im März und April in den Bereich der saisonalen Minima. Die Rekonstruktionen ab Juni 2024 – es gab verrauschte auf falschem Niveau befindliche Daten – signalisieren mäßig trockene Sommerverhältnisse, die die Septemberregen lediglich in den mittleren Bereich heben konnten.

Die Wassergehaltssensoren des Bodens **unter der Durchwurzelung** funktionierten größtenteils (nur jener in Tiefe 6 ist defekt): der Septemberrain hat den bis dahin mittleren Verlauf des SWI in deutlich feuchteren Bereich gehoben, ab November verbleibt die SWI-Kurve 2024 im Mittelbereich.

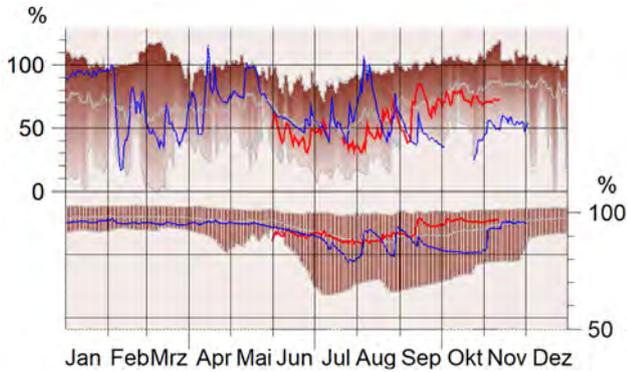


Abb. 6-15: gemittelte Profil-SWI-Zeitreihen

Mehrjährige **SWI-Diagramme** zeigen den Zeit-Tiefe-Verlauf des Soil-water-Indizes im Messprofil und erlauben somit den Vergleich der Jahre untereinander. Dunkelblau bedeutet Feldkapazität und mögliche Versickerung, rot bedeutet Trockenstreß in unmittelbarer Nähe zum Welkepunkt.

Das Zeit-Tiefen-Diagramm 2013-2024, welches exakt bis zum tiefsten Wassergehaltssensor in 140 cm Tiefe

reicht, wurde der besseren Sichtbarkeit wegen unterteilt in 4 untereinander-gestaffelte 3- Jahresdiagramme.

Der Beginn der Trockenjahre 2018 bis 2021 wird markiert durch die sich weit in die Tiefe erstreckende grün-türkise Bodenaustrocknung im 2. Halbjahr 2018. In den darauffolgenden Jahren 2019 bis 2021 ist die dunkelblaue Farbe der Feldkapazität an der Profilunterkante verschwunden. Sie taucht am Ende 2022 wieder auf und findet eine Fortsetzung im 1. Halbjahr 2023, wo sie in der 2. Jahreshälfte auch bereits wieder verschwindet. Dies sowie die tief reichende Bodenaustrocknung (grün-türkis) trotz der Niederschläge ist bemerkenswert und wohl eine Folge der Klimawandelbedingten (Erd-)Erwärmung. Die Sommeraustrocknung erstreckt sich etwas weniger tief in den Boden wie 2023, sie findet mit dem September-Niederschlag ein abruptes Ende.

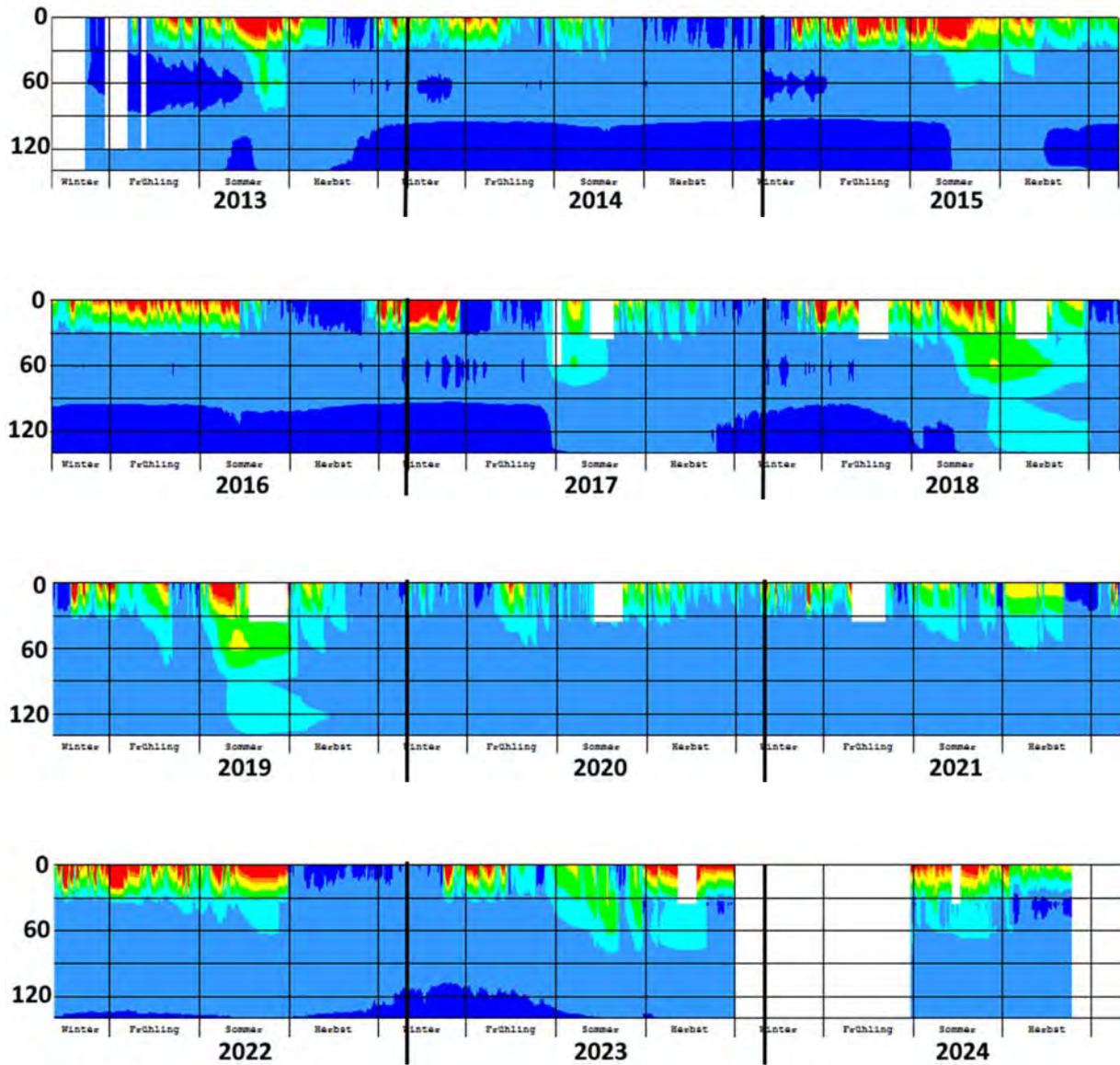


Abb. 6-16: SWI-3 Jahres Diagramme

7 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Immer häufiger bestimmt ein gegenüber früheren Jahren veränderter Witterungsverlauf das an den Lysimeterstandorten beobachtete Auswaschungsgeschehen.

Das hydrologische Jahr 2023/24 startete zunächst „normal“ mit Winterniederschlägen, die zu einer entsprechenden Sickerwasserbildung in diesem Zeitraum führten. So wie bereits in der Vergangenheit zeigte sich auch diesmal, dass Zwischenbegrünungen einen wirksameren Schutz vor einer Nitratverlagerung über den Winter darstellen als Winterweizen. Die Nitratkonzentration und die Nitrat Auswaschung unter Zwischenbegrünungen verlief selbst auf dem seicht- und mittelgründigen Standort zunächst auf niedrigerem Niveau als auf jenem tiefgründigen Standort, auf dem Winterweizen angebaut worden war, wobei angemerkt werden kann, dass dieser im Herbst keine Stickstoffdüngung erhalten hatte. Gut zu beobachten war jedoch anhand der N_{\min} Gehalte im Boden, dass mit dem Einarbeiten der Zwischenfrüchte, die von diesen aufgenommene Stickstoff mineralisiert wird und ein Auswaschungsrisiko darstellt, wenn keine entsprechenden Pflanzenentzüge stattfinden, wie im Folgenden beschrieben wird.

Das ansonsten typische Niederschlagsmaximum im Zeitraum April bis Juni fand diesmal nur an den tiefgründigen Standorten, vor allem in Eberstolz und moderater in Pettenbach statt. Dementsprechend gab es auf dem seichtgründigen und mittelgründigen Standort, wo Soja angebaut war, auch keine Nitrat Auswaschungsspitze in diesem Zeitraum, obwohl dies für Sommerungen ansonsten typisch wäre. Vielmehr setzte bereits relativ früh ein Niederschlagsdefizit ein, das insbesondere am seichtgründigen Standort zu einer Missernte bei Soja führte und am mittelgründigen nur einen moderaten Ertrag erlaubte, mit insgesamt geringer Stickstoffaufnahme. Bei einer Starkregphase im September standen dadurch größere

Nitratmengen zur Auswaschung zur Verfügung. An diesen Standorten gingen 2/3 bis über 3/4 der über das Jahr ausgewaschenen Stickstoffmenge bei diesem Ereignis verloren.

Immer extremere Trockenperioden im Sommer mit darauffolgenden stark erhöhten Niederschlägen im August oder September lassen seicht- und mittelgründige Standorte zunehmend ungünstig für den Anbau von Sommerungen wie Mais, Soja, etc. erscheinen. Die durch solche Witterungsverläufe verursachten Mindererträge stellen dann auch eine immer bedeutender werdende Ursache für Nitratverluste ins Grundwasser dar.

8 Literatur

- BMLFUW (2017). Richtlinie für die Sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland, 7. Auflage. BMLFUW Wien.
- Fank, J. (2004). Erfassung von Wasserbewegung und Stofftransport in der ungesättigten Zone durch tracer- und isopenhydrologische Untersuchungen. www.lysimeter.at Unterseite Research reports - Modelling/agricultural areas (1/2).
- Klaghofer, E., Murer, E. (2001). Erfassung und Bewertung der Sickerwasserquantität und-qualität im Grundwassersanierungs-Pilotprojekt „Obere Pettenbachrinne, OÖ“ und „Weißkirchen-Pucking, OÖ“; Abschlussbericht Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 3252 Petzenkirchen.
- Kuderna, M., Wolkerstorfer, G., Murer, E. (2007). Langfristige Lysimeteruntersuchungen in Oberösterreich. Berichtszeitraum 1995 – 2006. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Wolkerstorfer, G. (2009). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2008. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Schramm, C. (2010). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2009. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Haridy, S. (2011). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2010. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Haridy, S. (2012). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2011. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2013). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2012. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2014). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2013. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2015). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2014. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2016). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2015. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2017). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2016. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Murer, E. (2017) Forschungsprojekt Lysimeter, Langfristige Lysimeteruntersuchungen in Oberösterreich, Berichtszeitraum 1995-2016
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2018). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2017. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2019). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2018. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- wpa, JR-AquaConSol, AGES (2019). Schutz des Grundwassers vor Nährstoffeinträgen. Bewertung der Wirkung relevanter LE-Maßnahmen des österreichischen Programms für ländliche Entwicklung 2014-2020.
- Kuderna, M., Weinberger, C. (2020). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2019. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.

Kuderna, M., Weinberger, C. (2020). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2020. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.

Kuderna, M., Weinberger, C. (2021). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2021. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.

Kuderna, M., Weinberger, C. (2022). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2022. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.

Kuderna, M., Weinberger, C. (2023). Forschungsprojekt Lysimeter. Technischer Endbericht 2023. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.