

N-Effizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitrateintrages ins Grundwasser (Projekt NitroGäu)

Abschlussbericht Ackerbau: Kurzfassung



Else Bünemann-König, FiBL (else.buenemann@fibl.org)

August 2022

Mit Beiträgen von

Hannah Wey, Daniel Hunkeler u.a., Universität Neuenburg

Hanna Frick, Bernhard Stehle, Florian Hediger u.a., FiBL

Wolf Bischoff, Andreas Schwarz u.a., TerrAquat

NitroGäu

Impressum

Auftraggeber: Amt für Umwelt des Kantons Solothurn

Auftragnehmer: Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, Agroscope, ETH Zürich, Université de Neuchâtel, Gutachterbüro TerrAquat

Autoren: Else Bünemann-König, Hannah Wey, Daniel Hunkeler, Hanna Frick, Wolf Bischoff

Datum: 11.8.2022

Dieser Bericht wurde mit Unterstützung folgender Institutionen verfasst:

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)

Amt für Umwelt Solothurn

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzbeschrieb Projekt NitroGäu	4
1.1 Ziel des Teilpakets 3.1	5
1.2 Ansprechpersonen	5
2. Zusammenfassung der Resultate	5
3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	17
3.1 Beantwortung der Hauptfragen	17
3.2 Vorschläge zur Umsetzung in einem neuen Massnahmentool	18
4. Hintergrund: Region und Projekt	22
4.1 Region Gäu: Naturraum und Landwirtschaft	22
4.2 Grundwasser in der Region Gäu-Olten	23
4.3 Projekt NitroGäu: Struktur und Hauptfragen	24
4.4 Publikationen aus dem Projekt NitroGäu	25
5. Material und Methoden	26
5.1 Literaturstudie und Nmin-Kampagnen (1.1)	26
5.2 Monitoring und Hydrologie (1.2)	26
5.2.1 <i>Felder, Bodeneigenschaften und Witterung</i>	26
5.2.2 <i>Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung</i>	28
5.2.3 <i>Ertragserhebungen und N-Bilanzierung</i>	28
5.2.4 <i>Methoden zur Erfassung der Nitratauswaschung</i>	30
5.3 Hofdüngermanagement (1.3)	31
5.3.1 <i>Mikroplotstudie</i>	31
5.3.2 <i>Natürliche Abundanz</i>	34
5.4 Hochrechnung der Ergebnisse auf die Region	34
6. Literatur	35
7. Danksagung	36

I. Kurzbeschrieb Projekt NitroGäu

Gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) gilt in der Schweiz für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, eine **numerische Anforderung von maximal 25 mg/l Nitrat** (=5.6 mg NO₃-N/l). Dieser Wert wurde zwischen 2007 und 2014 jährlich an 15-20% der nationalen Messstellen überschritten, die meist unter intensiver landwirtschaftlicher Nutzung insbesondere durch Ackerbau liegen (BAFU, 2019). Der Höchstwert aus dem Schweizer Lebensmittelgesetz (TBDV) von 40 mg NO₃/l für Trinkwasser wurde an 2-4 % der Messstellen überschritten.

In der **Region Gäu-Olten** liegt die Konzentration von Nitrat im zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasser meist über dem Qualitätsziel von 25 mg/l. Im regionalen **Nitratprojekt nach Art. 62 a GSchG** verpflichten sich seit dem Jahr 2000 die teilnehmenden Landwirte zu einer nitratarmer Bewirtschaftung. Dies erfolgt im Ackerbau nach den Vorgaben des Nitratesindex, zusätzlich wird Ackerland in extensive Wiesen umgewandelt.

Das Auswaschungspotential von Nitrat aus landwirtschaftlich genutzten Ackerbau-Flächen wird anhand eines Punktesystems, genannt „**Nitratesindex**“, beurteilt. Dabei werden die **Faktoren Fruchtfolge, Bodenbearbeitung im Herbst, Saatzeitpunkt im Herbst und Winterbedeckung** beurteilt. Die Berechnung beginnt mit der **Basispunktzahl** für jede Parzelle, wobei jeweils die Kombination von Vorkultur und Hauptkultur im Zeitraum Anfang August bis Ende Juli betrachtet wird (oder Ernte Vorkultur bis Ende Juli des folgenden Jahres). Die Basispunktzahl kann Werte zwischen 4 und 60 annehmen, und je höher der Wert, desto höher das Nitratauswaschungspotential. Die Basispunktzahl wird anschliessend noch faktoriell für Bodenbearbeitung, Winterbedeckung und Saatzeitpunkt korrigiert, die Basispunktzahl hat aber den grössten Einfluss auf die resultierende Punktzahl.

Eine eigentliche Wirkungskontrolle der im Nitratprojekt Gäu-Olten umgesetzten Massnahmen und eine wissenschaftliche Überprüfung des Nitratesindex fehlten bislang. Im Gemüsebau wurden bis Ende 2021 keine Massnahmen umgesetzt.

Die zwei **Hauptziele des Projekts NitroGäu** (2017-2021) waren daher

1. die **wissenschaftliche Aufarbeitung der Wirksamkeit des Nitratesindex** einschliesslich Evaluierung von Methoden zur Erfolgskontrolle (Messungen und/oder Modellierungen)
2. die **Erarbeitung weiterer Anpassungen der Bewirtschaftung** zur Verbesserung der N-Effizienz und Reduktion der Nitratauswaschung inklusive Vorschläge zur Abbildung in einem neuen Massnamentool, das künftig den heutigen Nitratesindex ablösen soll.

Die Untersuchungen fanden sowohl im **Ackerbau** als auch im **Gemüsebau** statt. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen im Ackerbau zusammen.

1.1 Ziel des Teilpakets 3.1

Die Ergebnisse der Teilpakete 1.1 (Literaturanalyse), 1.2 (Hydrologie und Bewirtschaftung) und 1.3 (Hofdüngermanagement) sollten in einem **Abschlussbericht Ackerbau** zusammengefasst werden. Während der Bericht zum Teilpaket 1.1 primär auf Literatur beruhte, sollten in die Synthese auch die **Ergebnisse aus den Feldstudien** einfließen, einschliesslich der Evaluierung zusätzlicher Bewirtschaftungsmassnahmen. Anhand der gewonnenen Daten zu **Nitratfrachten unter Ackerbau in der Region Gäu-Olten** sollte eine Hochrechnung auf die ganze Region erstellt werden.

Die Ergebnisse der Teilpakete zur Nitratauswaschung im Ackerbau sollten so in Vorschlägen zu einer **Überarbeitung des Nitratindex** resultieren. Das neue Massnahmentool, das den heutigen Nitratindex ablösen soll, könnte auch in anderen Regionen als Bewirtschaftungsgrundlage für eine grundwasserschonende Landwirtschaft dienen. Die eigentliche Entwicklung eines neuen Massnahmentools war aber nicht Teil dieses Projektes, sondern wird im Nachgang vom Kanton Solothurn gestützt auf dieses Projekt angegangen.

1.2 Ansprechpersonen

Else Bünemann-König, FiBL (else.buenemann@fibl.org)

Das Forschungsprojekt NitroGäu wurde finanziell und inhaltlich durch das Bundesamt für Landwirtschaft, den Kanton Solothurn sowie das Bundesamt für Umwelt unterstützt.

2. Zusammenfassung der Resultate

Im Projekt NitroGäu wurde die Nitratauswaschung im Ackerbau durch eine Literaturlauswertung, verschiedene Messungen auf 11 Feldern in der Region Gäu-Olten sowie eine vertiefte Studie zu Ausnutzung und Nachwirkung von Hofdünger untersucht. Daneben wurden weitere potentielle Massnahmen im Feld evaluiert. Dazu wurden auf 6 Feldern Streifen mit folgender Bewirtschaftung angelegt:

N (Neutral): betriebsübliche Düngung (wie bisher)

M1 (Massnahme 1): Optimierung der Düngermenge und des Düngzeitpunktes

M2 (Massnahme 2): Weitere Reduktion der Düngermenge oder CULTAN oder ENTEC

Auf den beiden Massnahmenstreifen wurde die N-Düngung im Mittel um 36 kg N/ha verringert.

Während in anderen lokalen bis regionalen, der Region Gäu-Olten bezüglich Klima, Boden und Ackerkulturen möglichst ähnlichen Nitratprojekten zur Verringerung der Nitratauswaschung unter landwirtschaftlich genutzten Flächen Massnahmen im Bereich Düngung am häufigsten angewendet werden (Abbildung 1), setzt der Nitratindex eine bedarfs- und zeitgerechte Düngung gemäss ÖLN voraus und berücksichtigt daher primär Massnahmen in den Bereichen Fruchtfolge und Bodenbearbeitung.

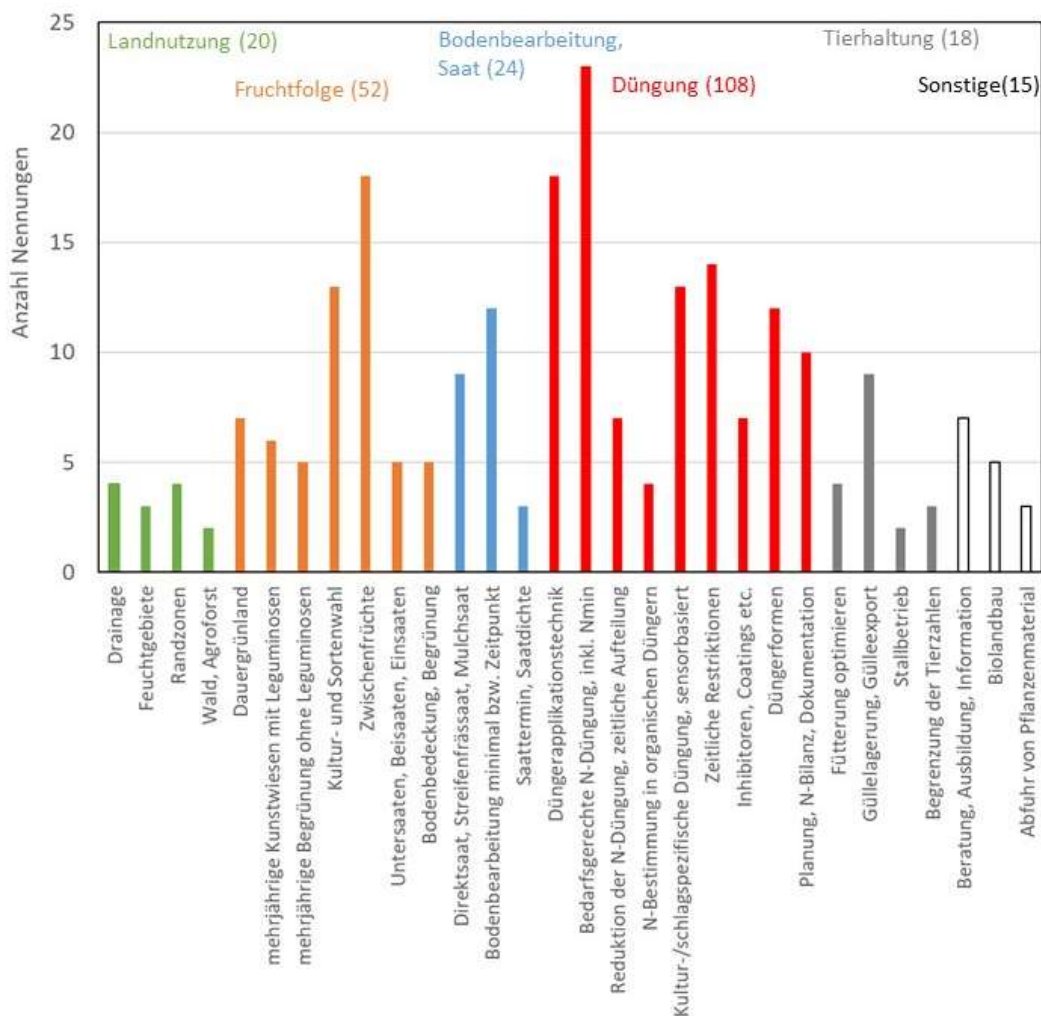


Abbildung 1: Anzahl Nennungen von Massnahmen in den Bereichen Landnutzung, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung und Tierhaltung und Sonstige in 12 anderen Projekten zur Verringerung der Nitratauswaschung.

Die wichtigste Massnahme zur weiteren Reduktion der Nitratauswaschung ins Grundwasser wäre gemäss der Literaturstudie die Einführung verschiedener Düngungsmassnahmen. Weitere vielversprechende Massnahmen sind gemäss der Literaturstudie neben der Umwandlung in Dauergrasland der Einsatz von Zwischenfrüchten in Kombination mit Sommerkulturen, Untersaaten im Mais sowie eine Umstellung auf Biolandbau.

Die mittleren Nmin-Herbstvorräte, die 2017-2020 unter verschiedenen Kulturen im Gäu erfasst wurden, lagen zwischen 50 kg N/ha bei extensiver Wiese und 200 kg N/ha bei Mais (Abbildung 2). Damit waren sie für jede Kultur deutlich höher als in verschiedenen Regionen in Deutschland. Eine mögliche Erklärung sind die hohen Gehalte an organischer Substanz im Oberboden von meist > 2% organischem Kohlenstoff und > 0.2% Stickstoff. In Kombination mit den hohen Sickerwassermengen von etwa 400 mm/Jahr entsteht eine hohe potentielle Nitratauswaschung.

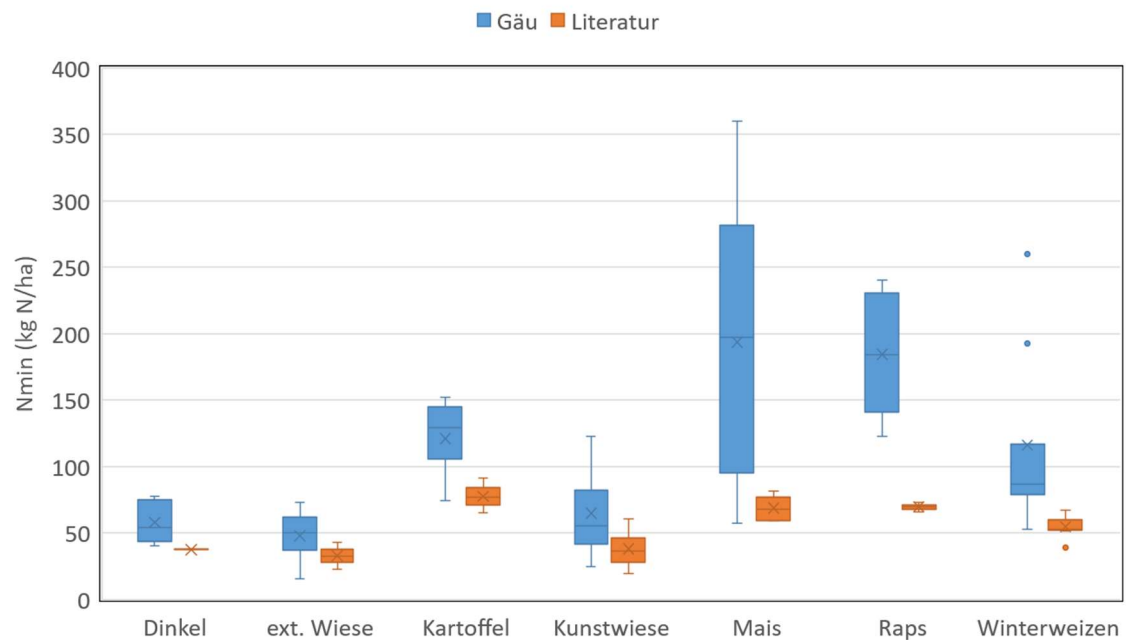


Abbildung 2: $N_{\min}$ -Herbstvorräte im Gäu (nach Vorkultur) und in verschiedenen Regionen Deutschlands (König et al., 2011; Finck, 2017; Beisecker et al., 2018). X = Mittelwert (bzw. Einzelwert), Boxplots: Rahmen zeigt 25-75%-Bereich, horizontale Linie im Boxplot: Median, Fehlerbalken zeigen Minimum bzw. Maximum, abgesehen von Ausreißern (Kreis).

Die mit Ionenaustauschern gemessene Nitratauswaschung auf 11 Feldern im Gäu lag in den Jahren 2017-2021 im Mittel zwischen 40 und 160 kg N/ha*Jahr (Abbildung 3). Die grössten jährlichen Nitratverluste wurden unter Wintergetreide verzeichnet (115 kg N/ha), während die Mittelwerte für Kunstwiese, Raps (ohne Untersaat) und den Übergang Kunstwiese/Mais zwischen 37 und 44 kg N/ha betrugen (Abbildung 4). Die Unterschiede zwischen den vier Messperioden waren geringer, mit einer mittleren Nitratauswaschung zwischen 55 und 88 kg N/ha.

Die Nitratauswaschung wurde offensichtlich vom hohen N-Nachlieferungspotential der Böden dominiert, wie auch die hohen $N_{\min}$ -Werte zeigen. So wurden auf drei Streifen mit 0 kg N-Düngung dem Boden 170-380 kg N/ha mit der Ernte entzogen, von denen mindestens 100-145 kg N/ha aus der Boden-N-Mineralisierung stammten. Diese überdeckte daher die relativ kleinen Unterschiede in den N-Gaben der Düngevarianten von im Mittel 36 kg N/ha. Der Einfluss des Standorts (Feldebene) bzw. der Fruchtfolge war somit grösser als die relativ geringe Reduktion der Düngung oder die Verwendung eines anderen N-Düngers (ENTEC, CULTAN).

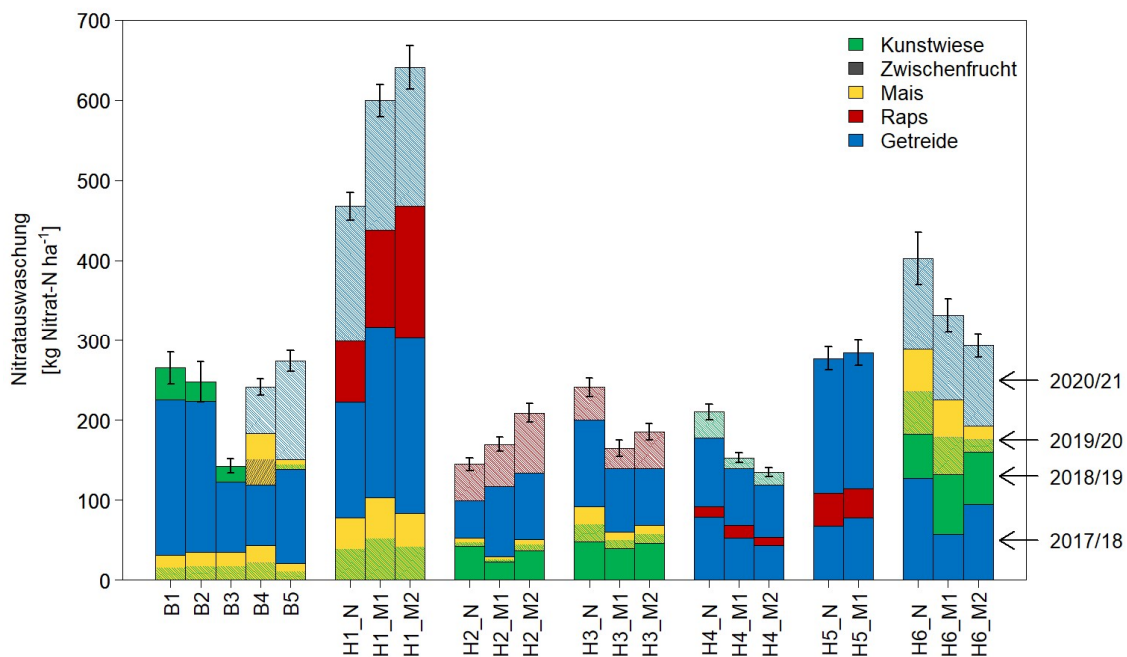


Abbildung 3: Nitratauswaschung gemessen mit der SIA-Methode für die Jahre 2017/18, 2018/19, 2019/20, 2020/21, wobei im letzten Jahr auf den Flächen B1, B2, B3 und H5 keine SIA mehr installiert waren. Mittelwerte aus je 12 SIA, die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler der kumulierten Werte. Kulturen farblich gekennzeichnet, mit dem Übergang von Kunstwiese bzw. Zwischenfrucht zu Mais als Schraffur (gelb/grün bzw. gelb/schwarz). Die N-Düngungsmassnahmen auf den Streifen M1 (Massnahme 1) und M2 (Massnahme 2) wurden ab April 2019 implementiert. Die Kulturen der letzten Messperiode (2020/21) sind schraffiert dargestellt, um deutlich zu machen, dass diese Werte nicht auf allen Flächen erhoben wurden.

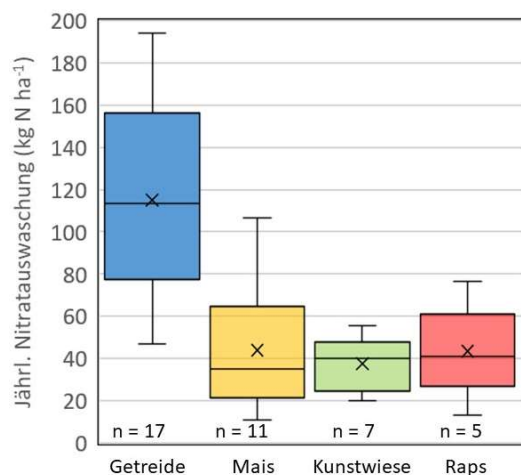


Abbildung 4: Boxplot der Nitratauswaschung mit der SIA-Methode auf den Streifen ohne Massnahmen (N) nach Hauptkultur. Median als Linie, Mittelwert als x gekennzeichnet. Der Kasten symbolisiert 2. und 3. Quartil, die Enden der Fehlerbalken zeigen Maximum bzw. Minimum.

Die Nmin-Herbstvorräte auf 11 Feldern im Gäu variierten stark zwischen den Jahren. Im Herbst 2018 betrugen sie im Mittel 242 kg N/ha, und im Herbst 2017, 2019 und 2020 zwischen 96 und 128 kg N/ha. Allerdings wurde 2018 die Mehrzahl der Felder unter Mais als Vorkultur beprobt, mit mittleren Nmin-Vorräten von 215 kg N/ha, verglichen mit 183, 126, und 75 kg N/ha unter Raps, Wintergetreide und Kunstwiese (Abbildung 5). Da die gemessene Nitratauswaschung, die v.a. im Winter nach der Herbst-Nmin-Beprobung auftrat, signifikant mit den Nmin-Vorräten korreliert war (Abbildung 6), könnte der Nmin-Vorrat im Herbst (0-90 cm) als (regionaler) Indikator für die Auswaschung verwendet werden.

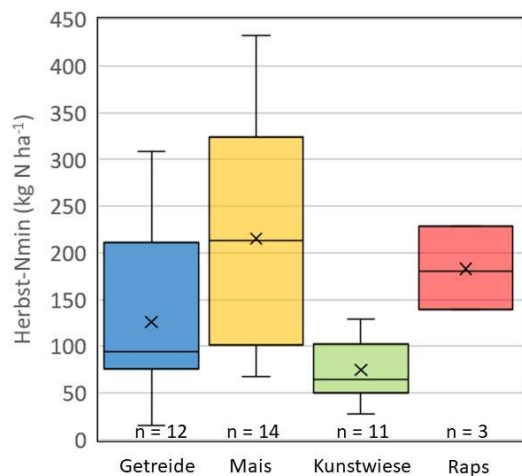


Abbildung 5: Boxplot des Herbst-Nmin-Vorrats (0-90 cm) in den Jahren 2017-2020 auf den Streifen ohne Massnahmen (N) nach Vorkultur. Median als Linie, Mittelwert als x gekennzeichnet.

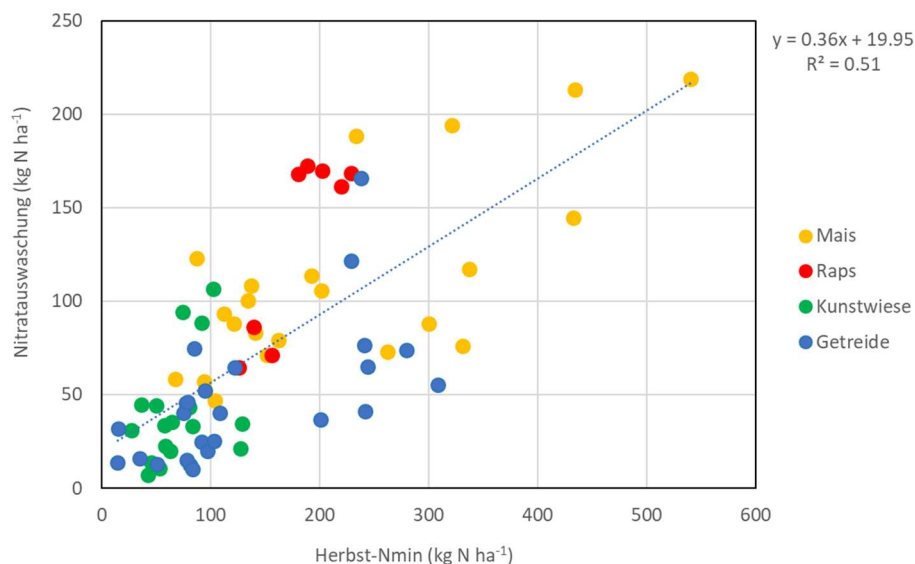


Abbildung 6: Korrelation zwischen Nitratauswaschung mit SIA gemessen und Herbst-Nmin-Vorrat (0-90 cm). Daten von vier Herbstbeprobungen (2017-2020) und vier SIA-Messperioden (2017/18 bis 2020/21) auf allen Feldern inklusive Massnahmenstreifen (n=72). Farbe zeigt Vorkultur an.

Die hohen Nmin-Vorräte nach Mais als Vorkultur und die hohe Nitratauswaschung unter Wintergetreide (Abbildung 6) sind in erster Linie als Folge von Hofdüngergaben zu Kunstwiese mit wesentlichem Anteil an organischem Stickstoff und der anschliessenden Beendigung der Kunstwiese vor Mais zu betrachten. Hinzu kommt eine nur sehr geringe N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse vor dem Winter bei Wintergetreide (Abbildung 7).

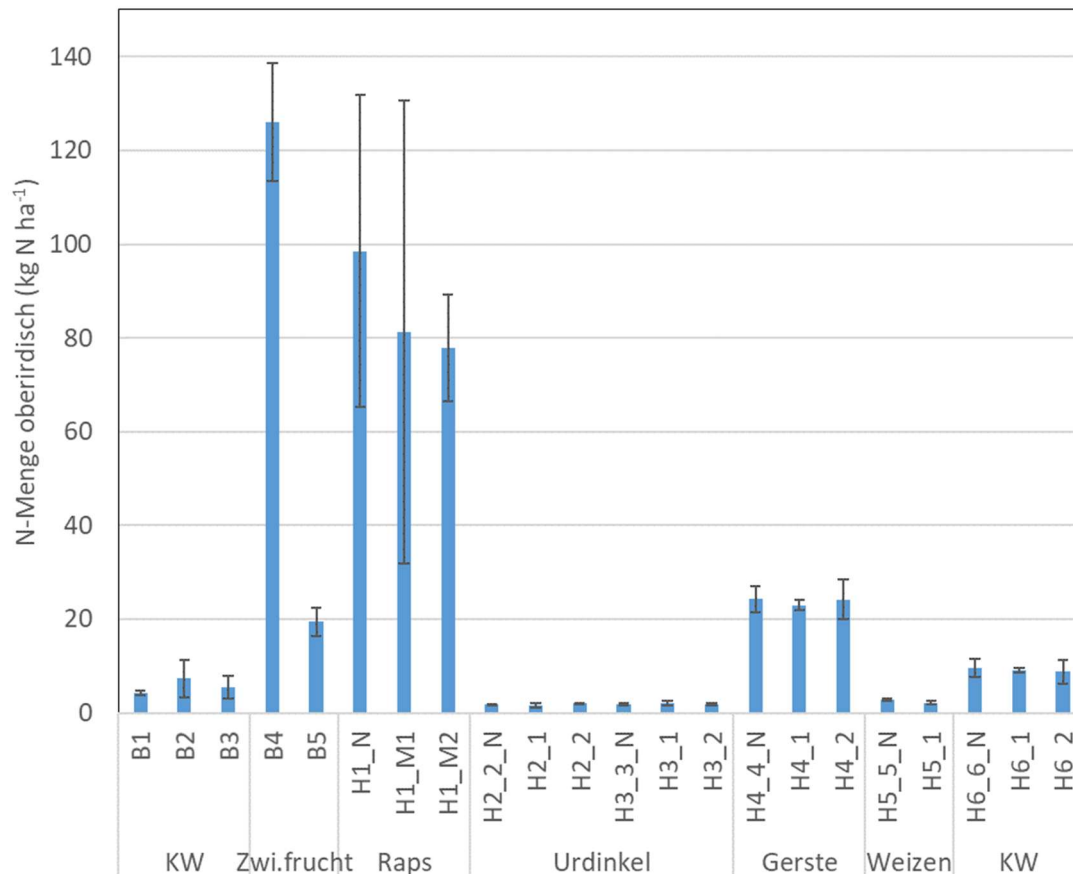


Abbildung 7: In der oberirdischen Pflanzenbiomasse gespeicherter Stickstoff auf allen Feldern und Massnahmenstreifen (Anfang Dezember 2019). Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, n = 3.

Monatliche Messungen der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser mittels Saugkerzen unter drei Feldern zeigten, dass Nitrat hauptsächlich zwischen November und März ausgewaschen wird (Abbildung 8). Die Daten bestätigten besonders hohe Konzentrationen unter Wintergetreide und deuteten auf eine Wirksamkeit der Düngungsreduktion hin, z.B. im Winter 2019/2020 auf Feld H2. Im Unterschied zu den Ionenaustauschern erfassen die Saugkerzen in erster Linie diffuse Transportprozesse in der Bodenmatrix und nicht den präferentiellen Fluss. Unsere Daten zeigen zudem, dass sie die Auswirkungen der Düngungsmassnahmen durch die monatliche Auflösung sensitiver abbilden als die mit den SIAs ermittelten Jahresfrachten.

Unter einem einzelnen Feld wurde Sickerwasser bis in 5.9 m Tiefe beprobt. Diese Untersuchungen zeigten exemplarisch, dass es einen präferenziellen Transport von Nitrat durch Risse in dichten Bodenschichten geben kann und dass das Porenwasser in darunterliegenden Bodentiefen aus einer Mischung von Wasser besteht, das zu unterschiedlichen Zeitpunkten in die Tiefe gelangt ist.

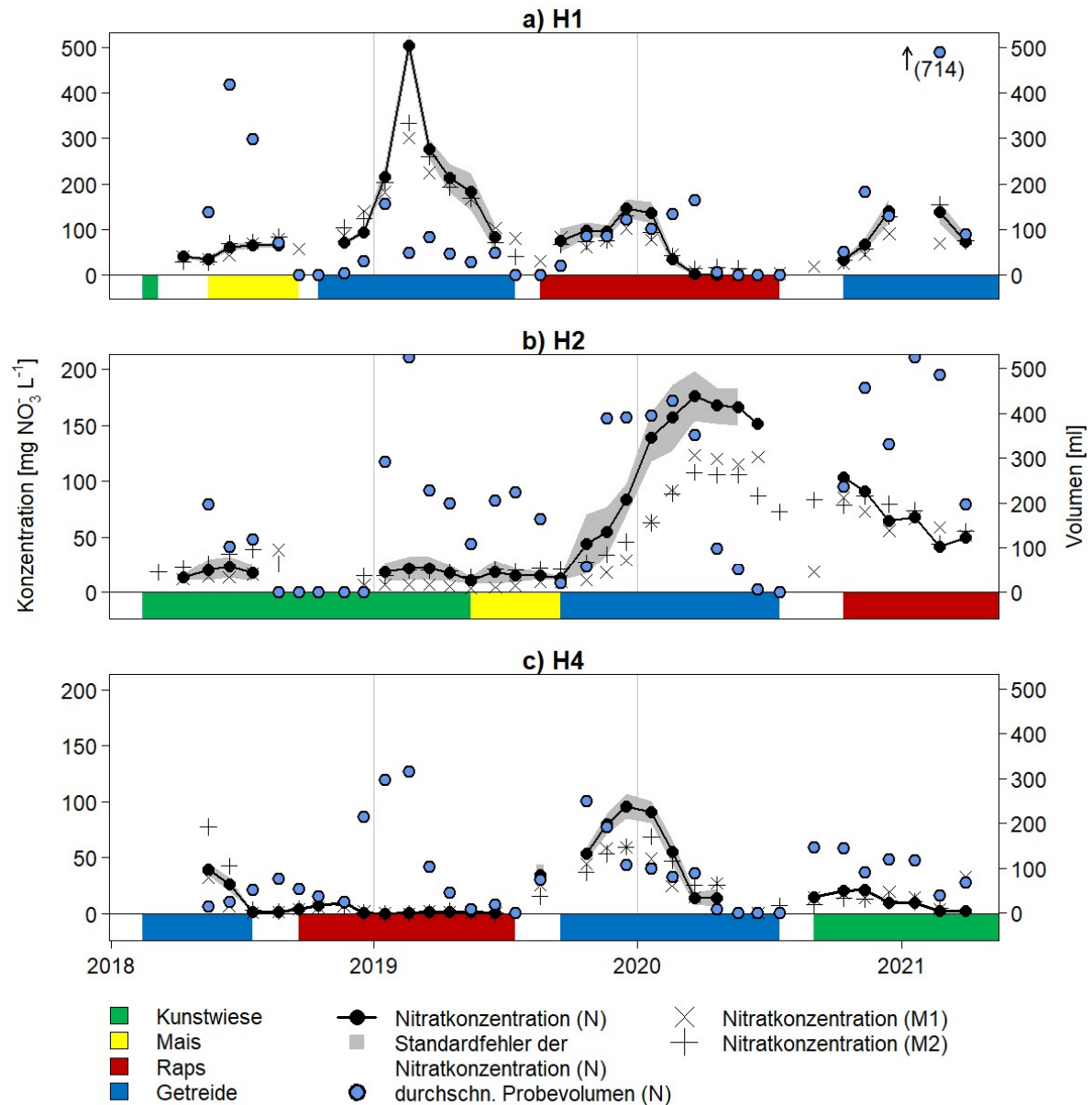


Abbildung 8: Mit Saugkerzen gewonnenes Probenvolumen im neutralen Streifen (N) sowie Nitratkonzentrationen in den Streifen N, M1 (Massnahme I) und M2 (Massnahme 2). Standardfehler grau gekennzeichnet. Unterschiedliche Skalen für die erste y-Achse beachten. Darstellung der Nitratkonzentration in mg Nitrat / l, um direkt mit gesetzlichen Vorgaben vergleichen zu können.

Tabelle 1: N-Oberflächenbilanzen pro Periode und Streifen in kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ und kumulative Werte zur Abschätzung der Boden-N-Mineralisierung. Die jeweilige Hauptkultur während einer Periode ist durch die Farbe in der Spalte Bilanz angezeigt (Kunstwiese grün, Mais gelb, Getreide blau, Raps rot). Nitrat Auswaschung mit SIA erhoben. B1-B3: biologisch bewirtschaftet.

Feld	Periode 1 2017/18							Periode 2 2018/19							Periode 3 2019/20							Kumulative Werte (Periode 1-3)				
	Deposition	BNF	Düngung (Nges.)	Entzug	Bilanz	Auswaschung	Bilanz - Auswaschung	Deposition	BNF	Düngung (Nges.)	Entzug	Bilanz	Auswaschung	Bilanz - Auswaschung	Deposition	BNF	Düngung (Nges.)	Entzug	Bilanz	Auswaschung	Bilanz - Auswaschung	Bilanz	Bilanz - Auswaschung	Boden-N- Mineralisierung *	Nmin-Vorrat Herbst 2017	Boden-N- Mineralisierung korrigiert **
B1	27	6	121	-166	-11	31	-42	19	13	138	-215	-45	194	-239	29	186	347	-438	123	40	83	67	-198	198	27	171
B2	27	0	121	-217	-68	35	-103	19	13	138	-207	-37	188	-225	29	174	347	-421	129	25	104	24	-224	224	64	160
B3	27	17	164	-257	-48	35	-83	19	13	260	-213	80	88	-8	29	168	378	-464	111	20	91	142	-1	1	129	-128
B4	27	28	85	-384	-244	43	-287	19	0	163	-157	24	76	-52	29	37	110	-220	-45	64	-110	-264	-448	448	80	368
B5	27	24	48	-249	-150	21	-171	19	0	247	-148	118	117	1	29	97	396	-380	142	12	130	109	-42	42	127	-86
H1_N						78	-247	19	0	142	-182	-21	145	-166	25	0	133	-207	-50	77	-127	-240	-539	539		447
H1_M1	27	35	166	-398	-169	103	-272	19	0	142	-185	-24	213	-237	25	0	133	-203	-46	121	-167	-239	-677	677	92	585
H1_M2						84	-253	19	0	88	-160	-53	219	-272	25	0	0	-170	-145	166	-311	-368	-836	836		744
H2_N						42	174	23	49	175	-260	-14	11	-25	21	0	63	-171	-87	47	-134	115	16	-16		-74
H2_M1	27	323	281	-415	216	22	194	23	58	146	-296	-70	7	-77	21	0	45	-133	-67	88	-155	79	-38	38	58	-20
H2_M2						37	179	23	66	100	-263	-75	14	-89	21	0	18	-111	-72	83	-155	69	-65	65		7
H3_N						48	135	23	68	175	-289	-24	44	-68	21	0	63	-140	-56	108	-164	104	-97	97		60
H3_M1	27	269	281	-394	183	40	143	23	58	146	-297	-70	20	-90	21	0	45	-126	-60	79	-139	53	-86	86	37	49
H3_M2						46	137	23	58	100	-298	-117	23	-140	21	0	18	-90	-50	71	-121	16	-124	124		87
H4_N						79	-97	23	0	230	-190	63	13	50	25	0	149	-236	-62	86	-148	-17	-196	196		128
H4_M1	23	0	66	-107	-18	53	-71	23	0	199	-223	-1	15	-17	25	0	126	-223	-72	71	-143	-91	-213	213	67	146
H4_M2						44	-62	23	0	189	-200	12	10	2	25	0	134	-203	-44	65	-109	-50	-150	150		93
H5_N						68	-57	23	0	104	-193	-66	41	-107	25	0	130	-326	-170	168	-338	-225	-502	502		240
H5_M1	23	0	104	-115	11	78	-67	23	0	104	-249	-122	37	-159	25	0	140	-265	-100	170	-270	-210	-495	495	262	233
H6_N						127	-145	23	232	192	-471	-25	55	-80	29	45	190	-213	51	106	-55	8	-281	281		168
H6_M1	23	0	121	-163	-18	58	-76	23	253	0	-384	-108	74	-182	29	58	164	-218	33	94	-61	-94	-319	319	112	207
H6_M2						95	-113	23	263	0	-375	-90	65	-155	29	60	127	-218	-2	33	-35	-110	-303	303		190

* Es wird angenommen, dass die kumulative Bilanz, die in den meisten Fällen negativ ist, durch Boden-N-Mineralisierung ausgeglichen wird.

** Die geschätzte Boden-N-Mineralisierung wird um den anfänglichen Nmin-Gehalt korrigiert.

Die N-Oberflächenbilanzen waren für Jahre mit Kunstwiese als Hauptkultur fast immer positiv und für alle anderen Kulturen meist negativ (Tabelle 1). Die untersuchten Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung hatten einen variablen Einfluss auf die N-Bilanz. Wenn die über drei Jahre gemessene Nitratauswaschung von der kumulierten N-Bilanz abgezogen wird, ergeben sich in den meisten Fällen negative Werte, die auf die Mineralisierung von organischem Bodenstickstoff als zusätzliche N-Quelle im System hinweisen.

Tatsächlich zeigten die vertieften Untersuchungen mit ^{15}N -markierten Düngern (Mineraldünger, Rindergülle) auf zwei Feldern, dass Boden-N-Mineralisierung für die Pflanzen die wichtigste N-Quelle ist. Anhand der natürlichen Isotopenzusammensetzung (^{18}O und ^{15}N) von Nitrat im Sickerwasser wurde die Mineralisierung von Boden-N als Hauptquelle des ausgewaschenen Nitrats identifiziert (Abbildung 9). Eine frühere Studie zur natürlichen Isotopenzusammensetzung im Grundwasser (Hunkeler *et al.*, 2015) kam zum selben Ergebnis.

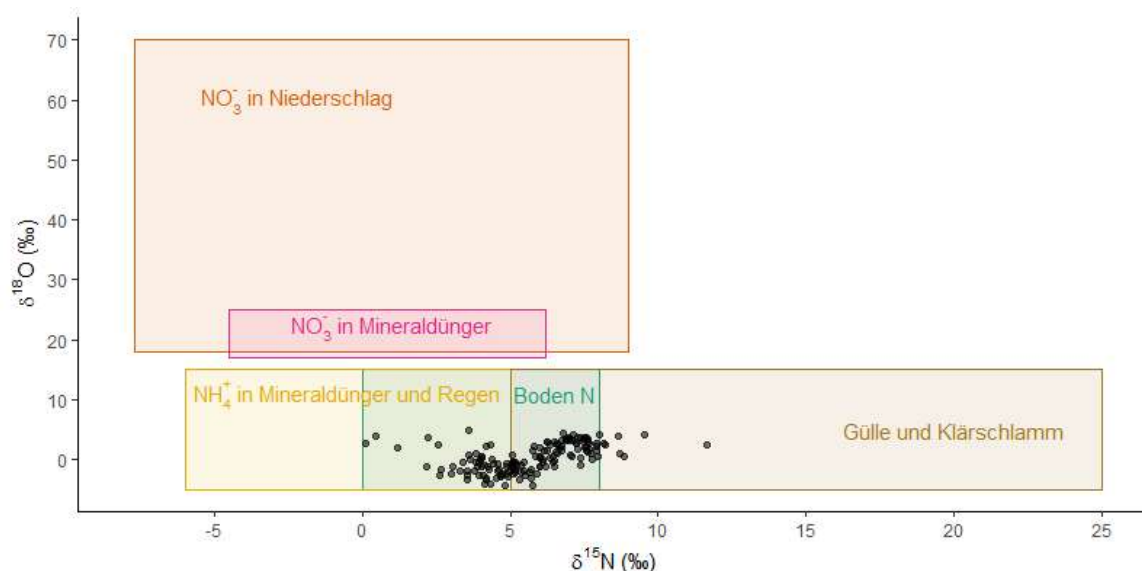


Abbildung 9: Natürliche Abundanz von ^{18}O und ^{15}N in SIA (Punkte) und mögliche Herkunft des ausgewaschenen Nitrats (nach Kendall (1998), aktualisiert mit Werten aus Xue *et al.* (2009)). Aus Gilbert (2021).

Im Ausbringungsjahr war die Wiederfindung der ^{15}N -markierten Dünger (Mineraldünger, Rindergülle) bezogen auf die Gesamt-N-Menge in den Düngern (Abbildung 10) in der oberirdischen Pflanzenbiomasse deutlich höher für Mineraldünger (45-48%) als für Rindergülle (17-22%). Die Nachwirkung der beiden Dünger lag im zweiten Jahr bei 3.6-4.6% und im dritten Jahr bei 1.6-2.4%. Die Wiederfindung im Boden war dagegen deutlich höher für Rindergülle (50-67%) als für Mineraldünger (28-45%), wobei für beide Verfahren der Grossteil des verbleibenden Düngerstickstoffs in nicht-mikrobieller organischer Form vorlag. Der nicht von den Pflanzen aufgenommene N insbesondere aus Hofdüngern wird also in die organische

Bodensubstanz eingebaut. Durch fortlaufende mikrobielle Mineralisierungsprozesse und besonders bei Mineralisierungsschüben, die beispielsweise durch Kunstwiesenumbbruch ausgelöst werden, wird dieser Stickstoff wieder freigesetzt. Wenn die N-Bilanzen negativ sind, kann dies längerfristig zu einem Abbau von Boden-N führen. Auf der anderen Seite zeigen diese Ergebnisse, dass die Düngung einen indirekten Einfluss auf die Nitratauswaschung hat, da sie den Boden-N-Pool aufbaut.

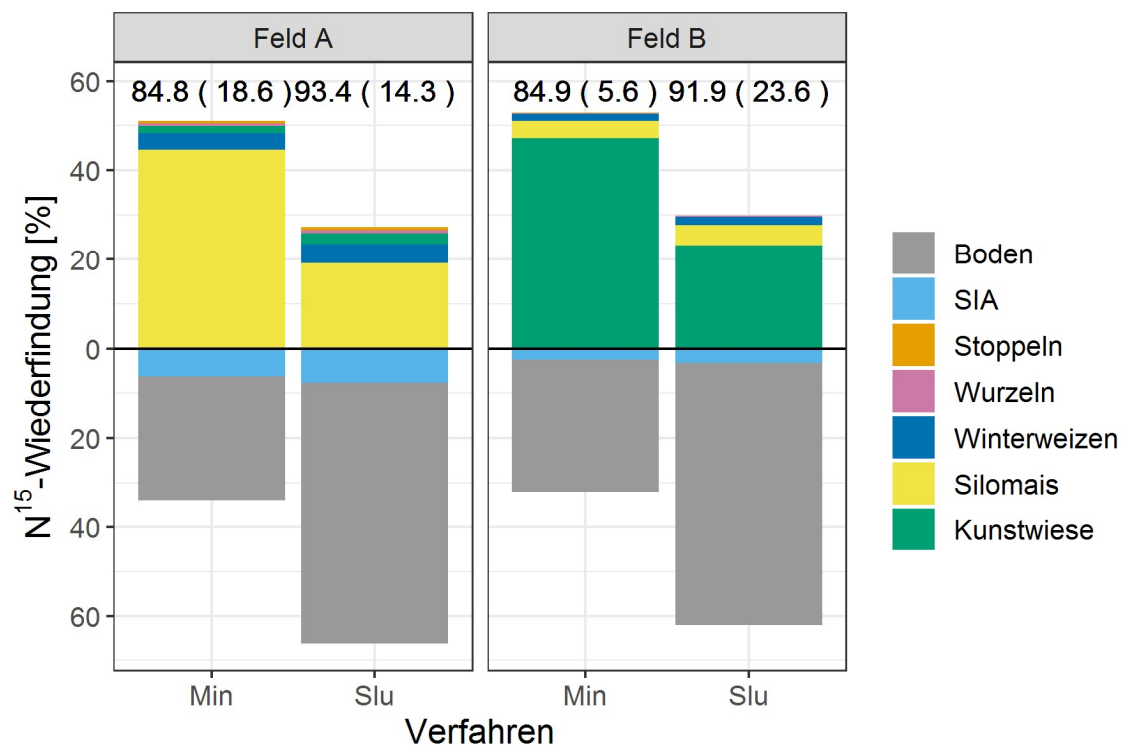


Abbildung 10: ^{15}N -Bilanz auf den beiden Feldern über die gesamte Versuchslaufzeit (2018 – 2020). Die Zahlen zeigen die kumulierte mittlere ^{15}N -Wiederfindung von ^{15}N -markiertem Mineraldünger (Min) und Rindergülle (Slu); Standardabweichung in Klammern, 4 Feldreplikate. Ammoniakemissionen sind in dieser Darstellung nicht enthalten, sie lagen auf Feld A für Min bei ~0 %, für Slu bei 6.6 % und auf Feld B für Min bei 3.4 % und für Slu bei 10.1 % der ausgebrachten N-Mengen.

Die Tiefenverlagerung der markierten Dünger innerhalb des Bodenprofils war gering, und der Anteil der ^{15}N -markierten Dünger an der Gesamtauswaschung während 2 Jahren entsprach weniger als 5% des ausgewaschenen Nitrats (Abbildung 11). Es wurde zwar signifikant mehr Gülle-N als Mineraldünger-N ausgewaschen, die Auswaschung aus den markierten Düngern betrug aber maximal 8 kg N ha⁻¹. Die Gesamtauswaschung während zwei Jahren lag dabei mit 120-205 kg N/ha in einem ähnlichen Bereich wie auf den 11 Feldern der hydrologischen Studie.

Ein Versuch im Gewächshaus zeigte, dass anaerobe Vergärung von Rindergülle die N-Ausnutzung durch die Pflanze verbessern kann. Die Zugabe eines Nitrifikationsinhibitors bzw. Pflanzenkohle hatte dagegen keine deutlichen Auswirkungen auf die N-Ausnutzung.

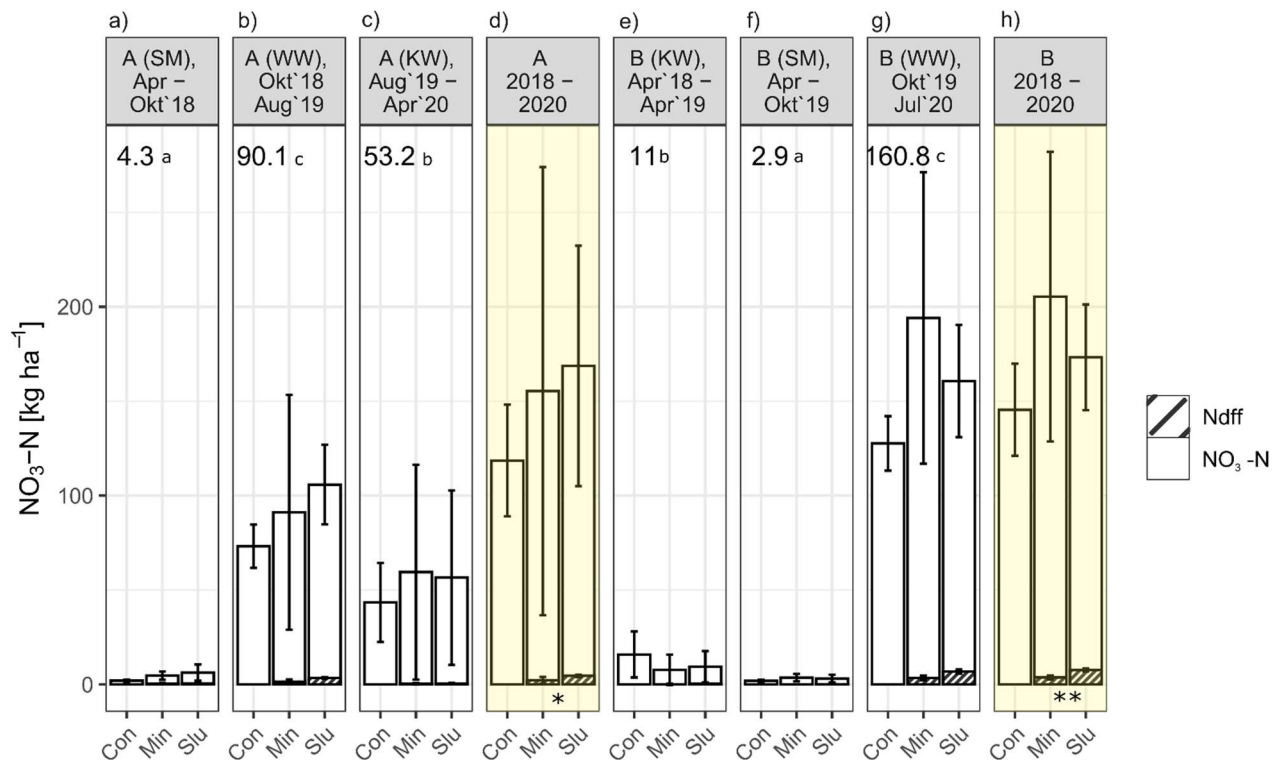


Abbildung 11: Nitratauswaschung unter Mikroplots für die verschiedenen Kulturen und kumuliert über die gesamte Versuchsdauer auf Feld A (a-d) und Feld B (e-h) mit den Verfahren ungedüngte Kontrolle (Con), Mineraldünger (Min) und Rindergülle (Slu). Ndff = N derived from fertilizer (Anteil der Nitratauswaschung aus ¹⁵N-Dünger); Mittelwert ± Standardabweichung (n = 4); signifikante Unterschiede in Ndff sind gekennzeichnet mit *; Zahlen zeigen die über die Düngeverfahren gemittelten Auswaschungen während einer Kultur. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen dabei signifikante Unterschiede über die Zeit (p < 0.05) im Mittel über die drei Verfahren.

Die sechs Ackerkulturen, unter denen zwischen 2017 und 2021 Nitratauswaschung gemessen wurde, bedeckten im Jahr 2020 knapp 800 ha (entsprechend 87% der Ackerfläche) im Perimeter des Nitratprojekts Gäu-Olten (Tabelle 2). Im flächengewichteten Mittel betrug die Nitratauswaschung unter diesen sechs Kulturen 71 kg N/ha*Jahr, wobei unter Winterweizen gut 50% der gesamten Nitratfracht ausgewaschen wurde. Bei einer mittleren Versickerung von 400 mm im Jahr ergibt sich daraus eine Nitratkonzentration von 17.8 mg N l⁻¹ bzw. 78.6 mg NO₃⁻ l⁻¹ im Sickerwasser. Auch wenn beim Transport ins Grundwasser N-Verluste durch Denitrifizierung auftreten könnten, Versickerung unter extensiven Wiesen, Stilllegungsflächen und

überbauten Flächen nicht berücksichtigt wurden und die Versickerung nur etwa 50-70% Anteil an der direkten Grundwasserneubildung hat, so zeigen diese Werte doch, dass die aktuellen, im Rahmen des Nitratesindex umgesetzten Massnahmen nicht ausreichend sind, um die Nitratkonzentration im Grundwasser so weit zu verringern, dass das gesetzliche Qualitätsziel an Grundwasser wieder erreicht wird. Berechnungen mit Modiffus ergeben für die Region Gäu-Olten eine tiefere N-Fracht von 46 kg N/ha unter Ackerflächen (R. Hug, persönliche Mitteilung) als im Projekt NitroGäu gemessen wurde. Möglicherweise trugen die milden Winter und warmen, trockenen Sommer im Untersuchungszeitraum zu einer überdurchschnittlichen Nitratauswaschung bei. Allerdings entsprechen diese Witterungsbedingungen dem, was für die Schweiz im Zuge des Klimawandels prognostiziert wird. Umso wichtiger ist es, wirksame Massnahmen umzusetzen.

Tabelle 2: Flächenanteile wichtiger Ackerkulturen im Perimeter des Nitratesprojekts Gäu-Olten, mittlere jährliche flächenbezogene Nitratauswaschung (mit SIA gemessen) unter Ackerkulturen und resultierende Nitratfracht (Diederichs, 2021)

Kultur	Fläche	Flächen- anteil ²	Jährliche Nitratauswaschung		Jährliche Nitratfracht	
	ha	%	kg NO ₃ -N ha ⁻¹	n ³	t N	%
Winterweizen ¹	223	28	134 ± 40	10	30	53
Wintergerste	76	10	77 ± 13	2	6	10
Dinkel	10	1	78 ± 31	3	1	1
Silomais	167	21	44 ± 29	11	7	13
Winterraps	59	7	43 ± 23	5	3	5
Kunstwiese	261	33	37 ± 13	7	10	17
Gesamt	796	100	71 ± 49	38	56	100

¹Brot- und Futterweizen

²Anteil an der Gesamtfläche unter den sechs Kulturen

³Anzahl der gemessenen Flächenwerte (Kombination aus Kultur und Messperiode)

3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

3.1 Beantwortung der Hauptfragen

Der Projektteil zum Ackerbau hat gemäss Auftrag des BLW und AfU folgende Fragen beantwortet:

1. Wie wirksam ist der Nitratindex in Bezug auf Nitratauswaschung?

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der aktuell im Nitratprojekt Gäu-Olten angewandte Nitratindex nicht ausreichend wirksam ist, um die Nitratauswaschung auf ein grundwasserverträgliches Mass zu begrenzen. Die flächengewichtete Nitratfracht unter Ackerflächen ist ohne Berücksichtigung einer Verdünnung durch Versickerung unter allen anderen Flächen sowie durch Flusswasser und Zuflüsse etwa dreimal so hoch, wie sie zum Erreichen des Zielwertes von 25 mg Nitrat pro l im Grundwasser sein dürfte.

2. Welche Methoden eignen sich für eine Überwachung der Nitratauswaschung und zur Erfolgskontrolle von Massnahmen zu ihrer Verringerung?

Die gemessene Nitratauswaschung war mit den Herbst-Vorräten an mineralischem Stickstoff im Boden korreliert ($r^2 = 0.51$). Für ein langfristiges Monitoringprogramm zur Überwachung der Nitratauswaschung im Gäu wird daher die Untersuchung der Herbst-Nmin-Vorräte empfohlen. Dieser Ansatz könnte allenfalls auch zur langfristigen Erfolgskontrolle von Massnahmen eingesetzt werden. Dabei sollte die gefundene Beziehung zur tatsächlichen Auswaschung regelmässig überprüft werden, zum Beispiel mit Ionenaustauschern.

3. Wo verbleibt überschüssiger Stickstoff, und kann der Boden-N-Pool längerfristig aufgebaut werden?

Als Hauptquelle der Nitratauswaschung im Gäu wurde auf den Untersuchungsflächen die Mineralisierung von organischem Bodenstickstoff identifiziert, in Kombination mit der hohen Sickerwassermenge. Die grossen Gehalte an organischer Substanz und Stickstoff in vielen Böden im Gäu sind sowohl durch pedogenetische Faktoren (Tallagen, Auenböden etc.) als auch durch die Bewirtschaftung in den letzten Jahrzehnten bedingt, wobei der tatsächliche historische und aktuelle N-Überschuss der Landwirtschaft im Gäu noch genauer bestimmt werden sollte. Von den Pflanzen im Ausbringungsjahr nicht genutzter Stickstoff aus Mineraldünger oder Hofdünger wird hauptsächlich in den organischen Bodenstickstoff eingebaut und nur zu einem sehr kleinen Teil direkt (im gleichen Jahr) ausgewaschen. Bezogen auf die ausgebrachte Gesamtmenge an Stickstoff verbleibt von organischen Düngern ein grösserer Anteil im Boden, der langsam durch Mineralisierungsprozesse freigesetzt wird und bei der Nährstoffbilanzierung und Düngungsplanung berücksichtigt werden müsste, was aktuell nicht der Fall ist. Der grösste Mineralisierungsschub erfolgt nach dem Ende der Kunstwiese, das als kritischer Zeitpunkt in der Fruchtfolge identifiziert wurde, selbst bei reduzierter, nicht-wendender

Bodenbearbeitung. Eine allfällige Zunahme des Boden-N-Pools ist aus Sicht des Grundwasserschutzes im Gäu nicht sinnvoll.

In der Suisse-Bilanz wird der Gesamtstickstoff in den anfallenden Hofdüngern über den N-Ausnutzungsgrad rechnerisch so reduziert, dass nur der pflanzenverfügbare N im Ergebnis erscheint. Das führt dazu, dass trotz ausgeglichener Bilanz eine erhebliche N-Menge in Form von organisch gebundenem N im Boden verbleibt, ohne in der Bilanz sichtbar zu werden. Aus Umweltsicht wird hier dringend eine Verbesserung benötigt.

4. Welche Massnahmen können zu einer Verbesserung der N-Effizienz und einer Verringerung der Nitratauswaschung führen?

Die Literaturstudie und die Feldmessungen haben gezeigt, dass die Düngung künftig in einem Massnahmenpaket berücksichtigt werden sollte. Zugleich weisen die Ergebnisse der Feldmessungen auf die grosse Bedeutung der Boden-N-Mineralisierung für die Nitratauswaschung hin. Diese beiden Erkenntnisse können in einem verbesserten Düngungsmanagement kombiniert werden, bei dem der aktuelle Bodenvorrat an mineralischem N bei der Düngung berücksichtigt wird.

Es wird empfohlen, ein verbessertes Düngungsmanagement mit Massnahmen im Bereich der Fruchtfolge zu kombinieren. Eine Düngungsreduktion wird mittelfristig zu einem gewissen Abbau der Boden-N-Vorräte führen, der aber durch konsequente Überwachung der Nmin-Vorräte begrenzt wird. Viele der vorgeschlagenen Massnahmen können sofort umgesetzt werden, während für andere die nötigen Voraussetzungen erst geschaffen werden müssen. Dies gilt insbesondere für die Bereitstellung einer raschen Boden- und Hofdüngernalytik als auch für Empfehlungen zum Anbau neuer Kulturen, einschliesslich einer vermehrten Integration von Dauerkulturen in den Ackerbau. Die Bereitstellung einer zeitnahen Nmin-Analytik ist bereits umgesetzt worden.

Für eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Gäu auf andere Regionen der Schweiz wäre es wichtig, die Höhe der unvermeidbaren Auswaschung (z.B. unter extensivem Grasland) in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften und Klimabedingungen zu erheben. Zudem sollte die Erfassung der Nitratauswaschung in typischen Fruchtfolgen über viele Jahre erfolgen, um längerfristige, belastbare Daten zu erhalten und Veränderungen rechtzeitig erkennen zu können.

3.2 Vorschläge zur Umsetzung in einem neuen Massnahmentool

Für die Weiterentwicklung des Nitratindex ist es wichtig, insbesondere die Wirksamkeit der Massnahmen (Verringerung der Nitratauswaschung, d.h. «grosse vs. kleine Schrauben») und die Umsetzbarkeit (schnell umsetzbar oder zukünftige Massnahme) zu kennen. Die Zusammenstellung in Tabelle 3 zeigt auf, dass mehrere als vielversprechend beurteilte Massnahmen gut bekannt, wirksam und sofort umsetzbar sind. Für andere Massnahmen müssen noch Voraussetzungen geschaffen und Anwendungsempfehlungen erarbeitet werden. Dies gilt insbesondere für die

Bereitstellung einer schnellen Boden- und Hofdüngeranalytik als auch für Empfehlungen zum Anbau neuer Kulturen, einschliesslich einer vermehrten Integration von Dauerkulturen in den Ackerbau. Die Bereitstellung einer zeitnahen Nmin-Analytik ist bereits umgesetzt worden. Bei allen Massnahmen muss zudem beachtet werden, dass sich ihre Wirkung über die Zeit verändern kann (Liu *et al.*, 2017). Daher ist ein begleitendes Monitoring unerlässlich.

In der Literaturstudie wurden detaillierte Vorschläge für die Bewertung verschiedener Kulturen und Faktoren wie Bodenbearbeitung und Saatzeitpunkte gemacht. Basierend auf allen Arbeitspaketen von NitroGäu im Bereich Ackerbau sollten v.a. die in Tabelle 3 aufgeführten Massnahmen im Zentrum eines neuen Massnahmenpakets stehen. Dieses sollte auf alle Landnutzungsarten anwendbar sein (Ackerbau, Gemüsebau, Stilllegungsflächen etc.). Seit 2021 können Gemüseproduzenten am Nitratprojekt teilnehmen, in den Verträgen ist die Winterbegrünung im Gemüsebau enthalten. Daneben sollten weitere Massnahmen nach ihrer Wirkung über die gesamte Fruchtfolgeperiode (meist 4-6 Jahre) beurteilt werden, da die Nitratauswaschung häufig zeitlich verzögert auftritt. Gleichzeitig benötigen Landwirte eine möglichst grosse Flexibilität, um kurzfristig auf Witterungsverhältnisse reagieren zu können. Dies muss im Massnahmenpaket und beim Abschliessen von allfälligen Verträgen berücksichtigt werden.

Unter diesen Gesichtspunkten scheint es schwierig, das aktuelle Punktesystem des Nitratindex weiterzuführen. Der aktuelle Nitratindex suggeriert eine falsche Genauigkeit, setzt einen einseitigen starken Fokus auf die Kombination aus Vor- und Hauptkultur, und bildet die zeitlich versetzt auftretende Nitratauswaschung nicht richtig ab. Auch berücksichtigt er die relevante Nachlieferung aus dem Boden-N-Pool nicht. Ein Massnahmenkatalog mit einer Kombination aus verbindlichen und wählbaren Massnahmen scheint besser umsetzbar zu sein. **Dabei stellen Düngungsmassnahmen, die den flächen- oder betriebsspezifischen N-Überschuss begrenzen, die Basis dar.** Zusätzlich können im Bereich Fruchtfolge Grundanforderungen aufgestellt und mit freiwilligen zusätzlichen Massnahmen ergänzt werden.

Für eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Gäu auf andere Regionen der Schweiz wäre es wichtig, die Höhe der unvermeidbaren Auswaschung (z.B. unter extensivem Grasland) in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften und Klimabedingungen zu erheben. Zudem sollte die Erfassung der Nitratauswaschung in typischen Fruchtfolgen über viele Jahre erfolgen, um längerfristige, belastbare Daten zu erhalten und Veränderungen rechtzeitig erkennen zu können. Dabei muss die Nitratauswaschung im Sickerwasser bzw. direkt im/unter dem Bodenprofil gemessen werden. Rückschlüsse über die Erfassung der Nitratkonzentration im Grundwasser bzw. in den Pumpwerken sind wegen der grossen zeitlichen Verzögerung und der Flächenintegration nicht möglich.

Tabelle 3: Vergleich vielversprechender Massnahmen hinsichtlich Wirksamkeit (gegenüber der jeweiligen Negativkontrolle) und Umsetzbarkeit (mit Produktionsminderung gelb, ohne grün, unklar weiss)

Massnahme	Wirksamkeit (geschätzte Reduktion der jährlichen Nitratauswaschung)	Voraussetzungen für die Umsetzung
Umwandlung von Kunstwiesen-Fruchtfolgen in Dauergrasland (extensiv oder intensiv)	Im Mittel 50, max. 70 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Sofort möglich, erfordert aber grössere Anpassungen in der Tierproduktion
Standortangepasste, parzellen-spezifische Düngung (Nmin-Methode oder korrigierte Normen)	8-26 kg N/ha (gemäss Liebisch, 2021 ¹), im Mittel 20, max. 30 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Infrastruktur für Nmin-Analytik oder zuverlässige sensorbasierte Ansätze
Verbot von N-Düngung im Spätsommer/Herbst	Im Mittel 10, max. 20 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Verbessertes Gülle-Management während des Jahres, kein Hofdünger-Import aus anderen Regionen, Erhöhung der Güllelagerkapazitäten oder Hofdüngeraufbereitung
N-extensive Kulturen wie Braugerste, Öllein etc.	Im Mittel 10, max. 20 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Sofort möglich, Beratung und Absatz sichern
Biolandbau	Im Mittel 20, max. 50 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007); Reduktion um 30% (Sanders and Hess, 2019); Reduktion N-Überschuss um ca. 20 kg N/ha (Jan <i>et al.</i> , 2013)	Betriebsanpassungen nötig, Intensität muss begrenzt werden
Hofdüngeranalysen, evtl. in Kombination mit -aufbereitung	Im Mittel 10, max. 40 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Verfügbarkeit schneller Analytik / Schnelltests
Keine N-Düngung von Kunstwiesen im letzten Jahr	0-50 kg N/ha (Ergebnisse NitroGäu)	Sofort möglich

Verlängerung der Kunstwiesenphase	?	Anpassungen in der Tierfütterung
Bis 1.9. eingesäte winterharte Zwischenfrüchte vor spät eingesäten Sommerkulturen	Im Mittel 40, max. 60 kg N/ha (Osterburg <i>et al.</i> , 2007)	Sofort möglich
Alternative Sommerkulturen wie Quinoa, Hirse, Sonnenblumen	?	Anbauempfehlungen erarbeiten, Absatz sichern
Integration von Dauerkulturen, Hecken, Baumreihen in das Anbausystem	?	Anbauempfehlungen erarbeiten, Absatz sichern

¹ Präsentation am Workshop zur Erarbeitung des Nitratindex 2.0, 6.12.2021

4. Hintergrund: Region und Projekt

4.1 Region Gäu: Naturraum und Landwirtschaft

Die Region Gäu Olten ist zwischen Oensingen und Olten auf etwa 450 m ü.M. angesiedelt. Die mittlere Jahrestemperatur (1981-2010) beträgt 9.0°C, der durchschnittliche Jahresniederschlag 1129 mm (MeteoSchweiz). Die Böden der Region sind vor allem glaziär geprägte Parabraunerden, teilweise mit Stauwassereinfluss, und zeigen eine ausgeprägte kleinräumige Heterogenität (Hauert *et al.*, 2017). Auffallend ist der hohe Gehalt an organischer Substanz in den Böden in der gesamten Region, besonders im Vergleich mit anderen Regionen des Kantons. Auch ackerbaulich genutzte Böden im Gäu/Untergäu haben mehrheitlich einen Humusgehalt über 3.5 Prozent (Hauert *et al.*, 2017). Die im Projekt untersuchten Flächen bestätigen dies mit Gehalten an organischem Kohlenstoff in 0-30 cm von meist 1.9-2.6%.

Die Region ist durch intensive landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet und ist zugleich ein nationaler Verkehrsknotenpunkt mit grossen Lager- und Verteilzentren. Die 97 Betriebe im Kanton Solothurn mit Flächen im Projektperimeter weisen eine mittlere landwirtschaftliche Nutzfläche von 29 ha auf, davon sind im Mittel 42% offene Ackerfläche (Tabelle 4). Etwa 85% der Betriebe halten Tiere, bei einer mittleren Viehdichte von 1.1 Grossvieheinheiten pro Hektar. Zwei Drittel der Betriebe haben Rindviehhaltung, dazu kommen bei etwa einem Viertel der Betriebe noch Pferde, wobei 11 Betriebe einen Schwerpunkt in der Pferdehaltung haben. Während zwei Betriebe hauptsächlich Schweine halten, gibt es keinen Betrieb mit Schwerpunkt auf Geflügel.

Tabelle 4: Kennzahlen der landwirtschaftlichen Betriebe im Kanton Solothurn mit Flächen im Projektperimeter (Agrardatenstelle, Wallierhof)

Parameter	Einheit	Bandbreite (min-max)	Mittelwert ± Standard- abweichung	Anzahl Betriebe
Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN)	ha pro Betrieb	0.3-133	29 ± 19	97
Anteil offene Ackerfläche	% von LN	0-99.7	42 ± 27	97
GVE gesamt	GVE/ha LN	0-14	1.1 ± 1.6	97
Betriebe mit Rindvieh	GVE/ha LN	0.02-3.5	1.1 ± 0.8	66
Pferden	GVE/ha	0.01-12.6	0.8 ± 2.4	27 *
Schweinen	GVE/ha	0.004-3.3	0.9 ± 1.4	7 *
Geflügel	GVE/ha	0.002-0.16	0.03 ± 0.04	30
viehlos				16

* 11 Betriebe mit Schwerpunkt Pferdehaltung, 2 mit Schwerpunkt Schweinehaltung

4.2 Grundwasser in der Region Gäu-Olten

Unter dem Tal liegt ein grosser Grundwasserkörper, aus dem Trinkwasser für 75'000 BewohnerInnen der Region gewonnen wird. Eine Beschreibung der hydrologischen Situation im Gäu findet sich in Hunkeler *et al.* (2015). Die Nitratkonzentrationen in fünf Trinkwasser-Pumpwerken im Gäu (Abbildung 12, PW Bornstrasse in Wangen b.O. nicht dargestellt) werden seit fast 30 Jahren regelmässig überprüft (Abbildung 13, ohne PW Bornstrasse). Die Werte liegen in vier von fünf Pumpwerken oberhalb des Zielwertes (numerische Anforderung, 25 mg NO₃⁻ l⁻¹) und erreichen in einem Pumpwerk fast den gesetzlichen Grenzwert (40 mg NO₃⁻ l⁻¹). Seit Beginn des Nitratprojekts im Jahr 2000 ist eine Stabilisierung der Konzentrationen, aber keine deutliche Abnahme zu beobachten.

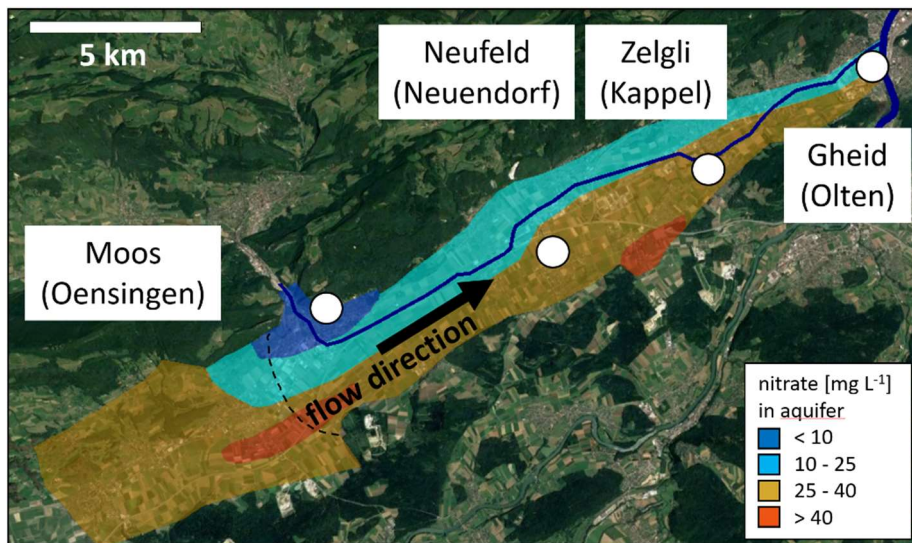


Abbildung 12: Geografische Übersicht über das Gäu, Nitratkonzentrationen im Grundwasser und Lage von vier Trinkwasser-Pumpwerken in der Region Gäu-Olten (Wey, 2021).

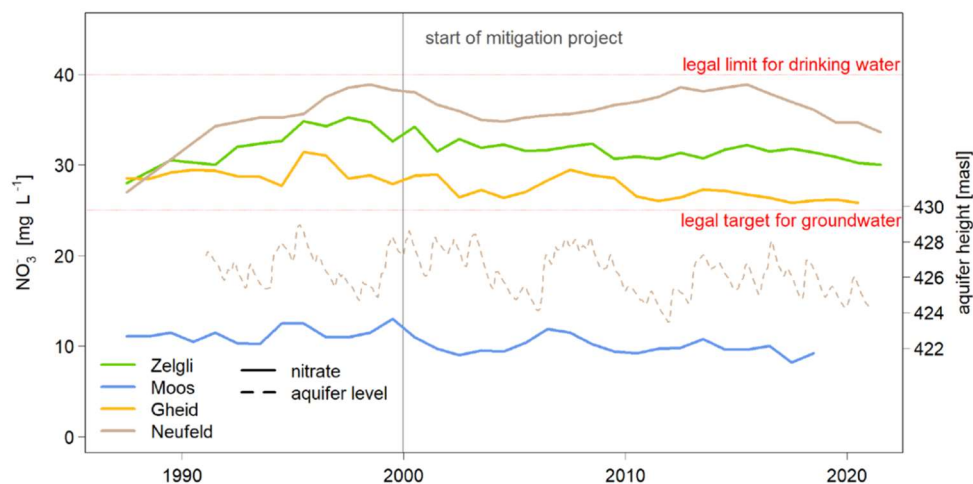


Abbildung 13: Nitratkonzentrationen in den vier regionalen Trinkwasser-Pumpwerken in der Region Gäu-Olten. Daten vom Amt für Umwelt Solothurn (Wey, 2021)

4.3 Projekt NitroGäu: Struktur und Hauptfragen

Das Projekt „NitroGäu“ war ein umfangreiches Forschungsprojekt (2017-2021), das aus anwendungsorientierten Teilen zur Überprüfung und Weiterentwicklung des Nitratindexes und aus prozessorientierter Forschung im Rahmen von zwei Dissertationen bestand (Abbildung 14). Das Projekt gliederte sich in die Bereiche Ackerbau (1), Gemüsebau (2) und Synthese (3). In jedem dieser Bereiche gab es verschiedene Arbeitspakete und einen hauptverantwortlichen Projektpartner.

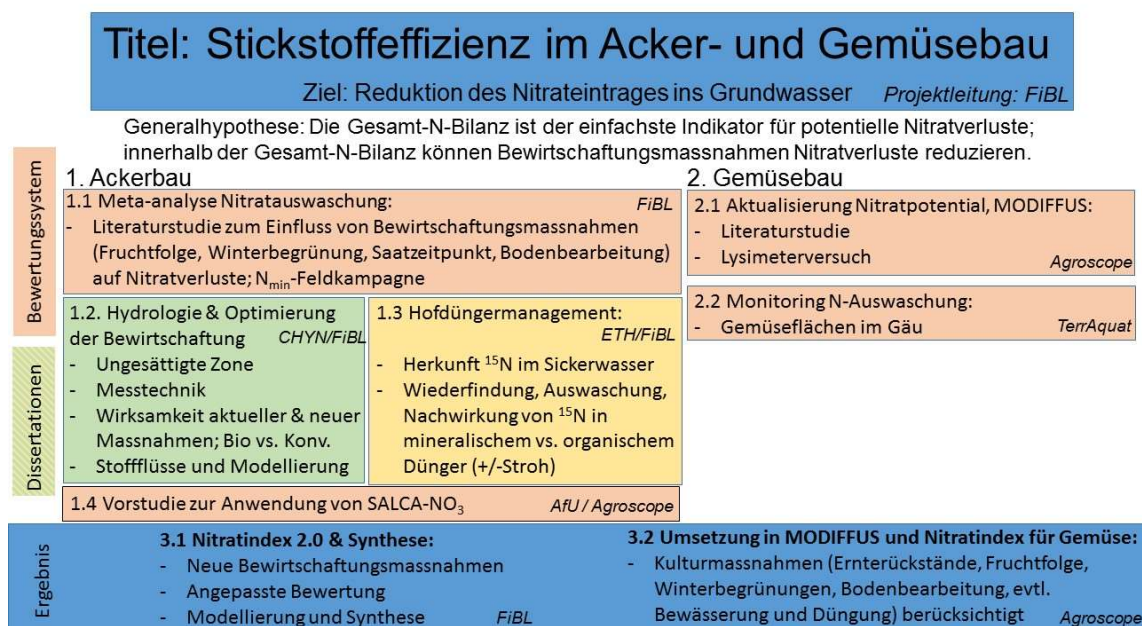


Abbildung 14: Projektschema des Projekts NitroGäu

Im Projektteil zum Ackerbau sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie wirksam ist der Nitratindex in Bezug auf Nitratauswaschung?
2. Welche Methoden eignen sich für eine Überwachung der Nitratauswaschung und zur Erfolgskontrolle von vermindernden Massnahmen?
3. Wo verbleibt überschüssiger Stickstoff – kann der Boden-N-Pool längerfristig aufgebaut werden?
4. Welche Massnahmen können zu einer Verbesserung der N-Effizienz und einer Verringerung der Nitratauswaschung führen?

4.4 Publikationen aus dem Projekt NitroGäu

Diese Kurzfassung enthält die wichtigsten Ergebnisse der Arbeitspakete 1.1-1.3 des Projekts NitroGäu. Im Rahmen des Projekts sind zwei Dissertationen, fünf Masterarbeiten und bislang drei Publikationen bei begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften entstanden. Diese Publikationen zeigen die ausführlichen Ergebnisse der genannten Arbeitspakete und werden daher als weiterführende Literatur aufgeführt:

Andrade, Ines (2021): Impact of agriculture on groundwater quality. MSc thesis, Universität Neuenburg.

Cormann, M. (2020): Application of ^{15}N labelled slurry in a microplot field study: Ammonia volatilization and plot N balance. MSc thesis, University of Bayreuth.

Diederichs, A. (2021): Modeling nitrate leaching in the Gäu region using the farm model and the DAISY model. MSc thesis, Technical University Munich.

Frick, H. (2022): Nitrate leaching from animal manure – Insights from on-farm and greenhouse studies using ^{15}N labelled cattle slurry. PhD thesis, ETH Zurich.

Frick, H., Oberson, A., Cormann, M., Wettstein, H.-R., Frossard, E., Bünemann, E.K. (2022): Similar distribution of ^{15}N labelled cattle slurry and mineral fertilizer in soil after one year. Nutrient Cycling in Agroecosystems. doi.org/10.1007/s10705-022-10205-5

Frick, H., Oberson, A., Frossard, E., Bünemann, E.K. (2022): Leached nitrate under fertilised loamy soil originates mainly from mineralisation of soil organic N. Agriculture, Ecosystems and Environment 338, 108093. doi.org/10.1016/j.agee.2022.108093

Fuchs, M. (2021): Fate of ^{15}N -labelled amendments in physical soil fractions two years after application. MSc thesis, Wageningen University & Research.

Gilbert, L. (2021): Tracing sources of nitrate leaching using the natural abundance of ^{15}N and ^{18}O . MSc thesis, Martin Luther University Halle-Wittenberg.

Wey, H. (2021): Nitrate leaching under arable land: Monitoring, mitigation measures and memory effects. PhD thesis, University of Neuchâtel.

Wey, H., Hunkeler, D., Bischoff, W.-A., Bünemann, E.K. (2022): In-situ monitoring of nitrate leaching in agriculture: Assessment of three field methods. Environmental Monitoring & Assessment 194. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09605-x>

5. Material und Methoden

5.1 Literaturstudie und Nmin-Kampagnen (I.1)

In der Literaturstudie wurden:

- i) Massnahmen in anderen lokalen bis regionalen Grundwasserprojekten zusammengetragen,
- ii) publizierte Literaturstudien und Metaanalysen zu den Faktoren Faktoren Klima (Niederschlag, Klimaveränderung), Landnutzung (Ackerbau vs. Grasland, Pufferstreifen, Agroforstsysteme), Anbausystem (Bio vs. Konventionell), Fruchtfolge (Zwischenfrüchte, Untersaaten, spezifische Kulturen), Bodenbearbeitung (pfluglos oder reduziert vs. Pflug), Saatzeitpunkt (Saattermin von Zwischenfrüchten), Düngung (N-Düngungsniveau, zeitliche und räumliche Aspekte, Düngerformen, Nitrifikationsinhibitoren und Pflanzenkohle) und Mulch (Plastik- oder Strohmulch) ausgewertet
- iii) Daten zur kulturspezifischen Nitratauswaschung in einem quantitativen Review zusammengetragen.

Im Rahmen der Nmin-Feldkampagnen in der Region Gäu-Olten wurden auf den 11 Ackerflächen, auf denen das NitroGäu-Projekt seit 2017 die Nitratauswaschung mit Hilfe von SIA untersucht (Abbildung 15), wurden im Oktober 2017, 2018 und 2019 (jeweils ca. 20. Oktober) Bodenproben in 0-90 cm Tiefe für die Bestimmung des Nmin-Vorrats vor dem Winter entnommen. Anfang November 2020 wurden ebenfalls im Rahmen der Verlängerung der Messungen noch einmal Proben entnommen, mit Ausnahme der Flächen B1-3 und H5. Auf diesen Flächen wurden Kunstwiese, Mais, verschiedene Wintergetreide und Winterraps angebaut. Um Fruchtfolgen mit weiteren Gäu-typischen Kulturen wie extensive Wiese, Kartoffel, Eiweisserbse, Ackerbohne, Gründüngung und Zwischenfutter abzubilden, wurden in den ersten beiden Jahren je 10 bzw. 11 zusätzliche Felder im Gäu beprobt. Im Oktober 2020 wurden noch 3 extensive Wiesen beprobt. Insgesamt entstanden so 64 Datenpunkte zu N_{min}-Herbstvorräten.

5.2 Monitoring und Hydrologie (I.2)

5.2.1 Felder, Bodeneigenschaften und Witterung

Die Untersuchungen zur Nitratauswaschung unter Ackerflächen in der Region Gäu-Olten wurden im Zeitraum September 2017 bis April 2021 auf 11 Feldern durchgeführt (Abbildung 15). Die Felder B1-B6 dienten für den Vergleich der Nitratauswaschung unter biologischer und konventioneller Bewirtschaftung mit möglichst einheitlicher Fruchtfolge, während auf den Feldern H1-H6 vertiefte hydrologische Untersuchungen durchgeführt sowie Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung geprüft wurden. Das Feld H1 entsprach dabei dem Feld B6, und H2 und H3 waren benachbarte Felder, die vom gleichen Landwirt als Wiederholungen bewirtschaftet wurden.

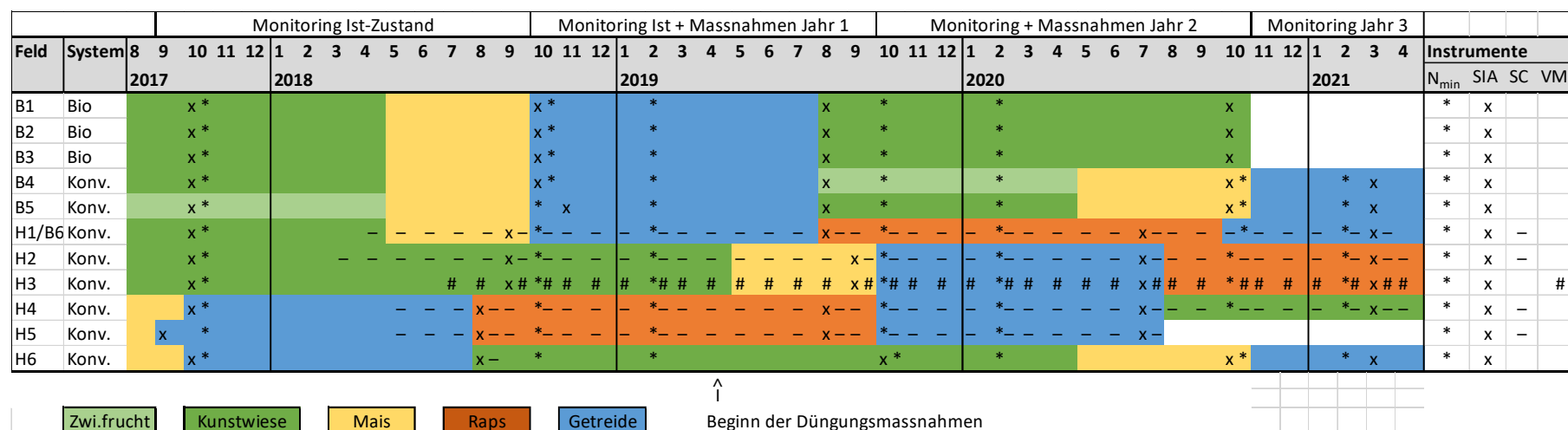


Abbildung 15: Fruchtfolgen und Messungen auf den 11 Untersuchungsflächen. N_{min} = mineralischer N, SIA = selbst-integrierende Akkumulatoren, SC = Saugkerzen (suction cups), VMS = Vadose Zone Monitoring System. Fruchtfolgen sind farblich gekennzeichnet.

5.2.2 Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung

Auf den Flächen HYD1-HYD6 wurden zusätzlich zur normalen Bewirtschaftung durch den Landwirt verschiedene Massnahmen für eine Verringerung der Nitratauswaschung untersucht:

N (Neutral): betriebsübliche Düngung (wie bisher)

M1 (Massnahme 1): Optimierung der Düngermenge und des Düngezeitpunktes

M2 (Massnahme 2): Weitere Reduktion der Düngermenge oder CULTAN oder ENTEC Verfahren

In der Anbausaison 2017/2018 wurde jedes Feld einheitlich bewirtschaftet. Ebenso wurde jedes der Felder B1-B5 bis zum Ende der Untersuchungen im Frühjahr 2021 einheitlich bewirtschaftet. Auf den Feldern H1-H6 dagegen wurden ab dem zweiten Untersuchungsjahr (2018/2019) Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung geprüft. Dazu wurden jeweils 2 (H5) oder 3 (H1-4 und H6) je nach Betrieb 9 bzw. 12 m breite Streifen angelegt. Auf dem ersten Streifen (N) wurde die Düngung betriebstypisch fortgesetzt. Auf dem zweiten Streifen (M1) wurde die Düngung in Absprache mit Bernhard Strässle, Wallierhof, und den Landwirten auf eine noch als vertretbar angesehene Menge reduziert (H1-4, H6) oder in Kombination mit einem Nitrifikationsinhibitor (DMPP) als ENTEC ausgebracht (H5). Auf dem dritten Streifen (M2) wurde die N-Düngung noch weiter reduziert (H1, H2, H3, H6) oder es wurde ein alternativer Düngertyp verwendet (CULTAN, H4).

Die tatsächlich ausgebrachten N-Mengen (Tabelle 5) betrugen in der Regel für M1 zwischen 80-100% der betriebsüblichen Menge (Streifen N) und für M2 60-80%. Die geplante N-Düngung wurde allerdings nicht immer ganz wie geplant umgesetzt, so dass einige Streifen in manchen Jahren gar keine N-Dünger oder die volle Menge erhielten.

5.2.3 Ertragserhebungen und N-Bilanzierung

In den Jahren 2018-2020 wurden auf allen Flächen und Streifen wann immer möglich Ertragserhebungen durchgeführt, um den N-Entzug mit dem Erntematerial zu bestimmen. In den meisten Fällen waren dies manuelle Probenahmen mit je 4 Wiederholungen, wobei im Getreide und bei Mais je 1 m entlang einer Reihe geschnitten wurde und bei Raps und Kunstwiesen auf einer Fläche von 0.25 m².

Um die N-Aufnahme verschiedener Kulturen vor dem Winter abzuschätzen, wurden Anfang Dezember 2019 die Bestände auf allen 11 Feldern beprobt. Dabei wurde pro B-Feld bzw. auf den H-Feldern pro Massnahmenstreifen je dreimal eine Fläche von 0.25 m² möglichst bodennah abgeschnitten. Mit der Trockenmasse und der N-Konzentration wurde die oberirdische N-Menge im Bestand berechnet.

Tabelle 5: N-Düngung (Gesamtstickstoff) auf den 11 untersuchten Feldern inklusive Massnahmenstreifen in den Jahren 2017-2020. Fruchtfolgen sind farblich gekennzeichnet.

Feld	Streifen	Gesamt-N-Eintrag mit Düngung (kg N ha ⁻¹ Periode ⁻¹)			
		- 2017	Periode 1 2017/18	Periode 2 2018/19	Periode 3 2019/20
B1		126	121	138	347
B2		189	121	138	347
B3		273	164	260	378
B4		210	85	163	110
B5		0	48	247	396
H1	N	208	166	142	133
	M1 (Reduktion 1)			142	133 ²
	M2 (Reduktion 2)			88	0 ²
H2/H3 ¹	N	239	281	175	63
	M1 (Reduktion 1)			146	45
	M2 (Reduktion 2)			100	18
H4	N	169	66	230	149
	M1 (Reduktion)			199	126
	M2 (CULTAN) ³			189	134
H5	N	141	104	104	140
	M1 (ENTEC) ⁴			104	130
H6	N	331	121	192	190
	M1 (Reduktion 1)			0 ⁵	164
	M2 (Reduktion 2)			0 ⁵	127

	Mais	Zwischenfrucht
Raps	Getreide	Kunstwiese

¹ für H2 und H3 war die Bewirtschaftung identisch, da die Felder nebeneinander liegen und demselben Landwirt gehören.

² Die geplante Massnahme wurde nicht umgesetzt.

³ In diesem Streifen (M2) sollte mit der CULTAN-Methode dieselbe N-Menge wie im Streifen M1 ausgebracht werden.

⁴ In diesem Streifen (M2) sollte mit dem ENTEC-Dünger dieselbe N-Menge wie im Streifen N ausgebracht werden.

⁵ Der Landwirt brachte keine Gülle aus, da es eine sehr trockene und heisse Periode war.

Um eine vollständige N-Oberflächenbilanz (Schlagbilanz) zu rechnen (Wey, 2022), wurden neben dem Gesamt-N-Eintrag mit der Düngung (FertN_{tot}) auch die atmosphärische Deposition (Dep), biologische N₂-Fixierung (BNF) über die Leguminosenanteile und die N-Entzüge mit dem Erntegut (N_{Ernte}) berücksichtigt:

$$\text{N-Bilanz} = \text{FertN}_{\text{tot}} + \text{Dep} + \text{BNF} - \text{N}_{\text{Ernte}},$$

wobei die Einheit immer kg ha⁻¹ pro Jahr (Messperiode) war. Die jährlichen N-Bilanzen (d.h. pro Messperiode) wurden anschliessend noch über die drei Jahre kumuliert. Mögliche Verluste durch Denitrifikation wurden nicht berücksichtigt.

Die N-Nachlieferung aus der Mineralisierung von organischer Substanz im Boden fehlt in der N-Oberflächenbilanz, lässt sich mit einem Bilanzierungsansatz aber grob abschätzen (Heumann *et al.*, 2013). Anhand der über drei Jahre kumulierten N-Bilanz und der kumulierten N-Auswaschung wurde daher abgeschätzt, wieviel mineralischer N in den drei Jahren aus dem Boden nachgeliefert wurde, wobei der Herbst-Nmin-Gehalt zu Beginn des Projekts noch abgezogen wurde:

Kumulierte N-Mineralisierung (in kg/ha)

= – kumulierte N-Bilanz + kumulierte N-Auswaschung – Herbst-Nmin(2017).

5.2.4 Methoden zur Erfassung der Nitratauswaschung

Insgesamt wurden vier verschiedene Methoden zur Erfassung der (potentiellen) Nitratauswaschung auf den 11 Flächen getestet (Tabelle 6).

Tabelle 6: Überblick über die verwendeten Untersuchungsmethoden zur Erfassung der (potentiellen) Nitratauswaschung

	SIA	Nmin	Saugkerzen	VMS
Messgrösse	Massenfluss der Nitrat-auswaschung	Nmin-Gehalt im Boden	Konzentration von Nitrat in der Bodenlösung	Konzentration von Nitrat in der Bodenlösung
Einheit	kg N ha ⁻¹ Periode ⁻¹	kg N ha ⁻¹	mg N l ⁻¹	mg N l ⁻¹
Zeitliche Auflösung ... allgemein	Integrierend (kumulativ) für Messperiode	Moment-aufnahme	Mittelwert der Messperiode	Mittelwert der Messperiode
... in diesem Projekt	Etwa jährlich	Halbjährlich (Herbst, Frühjahr)	Monatlich	Monatlich

Die Methode SIA (Selbst-integrierender Akkumulator) ist eine patentierte passive Sammelmethode, die von der Firma TerraQuat entwickelt wurde (Bischoff, 2007). Die SIA wurden jeweils nach etwa einem Jahr zwischen zwei Kulturen ausgewechselt.

Die Beprobung und Analytik für die Bestimmung des Gehalts an mineralischem N (Nmin) in 0-90 cm Tiefe wurde bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben.

Für die Beprobung der Bodenlösung wurden im Herbst 2017 Saugkerzen (SIC20 von UMS Meter, mit Keramikkopf, Porengrösse 2 μm) installiert. Die Keramikköpfe der Saugkerzen lagen in einer Bodentiefe von etwa 1.20 m. Die Proben wurden monatlich genommen und auf Nitrat analysiert.

Das im Juli 2018 auf H3 installierte Vadose Zone Monitoring System (VMS) bestand aus drei flexiblen PVC-Schläuchen (je einer für die Streifen N, M1 und M2). Die Wasserprobenahme erfolgte in den Tiefen 172, 311, 451 und 590 cm, wobei der unterste Probenahmepunkt direkt über dem maximalen Grundwasserstand lag. Die Proben wurden zweimal pro Monat entnommen und als volumengewichtetes monatliches Mittel präsentiert.

5.3 Hofdüngermanagement (I.3)

5.3.1 Mikroplotstudie

Um die Stickstoffausnutzungseffizienz und das Nitratauswaschungspotential von Rindergülle im Vergleich zu Mineraldünger unter Feldbedingungen zu untersuchen, wurde im Zeitraum April 2018 bis Juli 2020 eine Mikroplotstudie auf zwei benachbarten Feldern durchgeführt (Abbildung 16). Beide Felder folgten in diesem Zeitraum einer gäu-typischen Fruchtfolge (Kunstwiese-Silomais-Winterweizen), die zwischen den Feldern um ein Jahr versetzt war.

Auf beiden Feldern wurden auf einem 3 m breiten Streifen Mikroplots (1.5 m $\times$ 2 m) angelegt, jeweils im Abstand von 5 m, und im Jahr 2018 praxisüblich mit Mineraldünger als Ammoniumnitrat (Min) oder mit Rindergülle (Slu) gedüngt. Ausserdem wurde ein Kontrollverfahren ohne Stickstoffdüngung (Con) angelegt.

Die eingesetzten Dünger waren mit dem stabilen Stickstoffisotop ^{15}N markiert, um eine quantitative Nachverfolgung über mehrere Jahre zu ermöglichen. Die N-Dosis im Mineraldüngerverfahren wurde an den Ammonium-N-Gehalt der Gülle angepasst: pro Gabe wurden 60 kg N ha⁻¹ Güllestickstoff bzw. 37 kg N ha⁻¹ Mineraldüngerstickstoff ausgebracht. Dabei wurde zu Silomais (Feld A) einmalig im 3- bis 4-Blattstadium ^{15}N -Dünger ausgebracht, während in einem späteren Stadium zusätzlich 69 kg N ha⁻¹ unmarkierter Harnstoff auf allen Mikroplots gestreut wurden. Zur Kunstwiese (Feld B) erfolgten insgesamt vier Gaben mit ^{15}N -markierten Düngern (jeweils nach dem Wiesenschnitt). Ab 2019 wurden alle Mikroplots (inklusive Kontrolle) durch den Landwirt mit unmarkierten Düngern gedüngt.

Um den Verbleib der ^{15}N -markierten Dünger zu verfolgen, wurden auf beiden Feldern regelmässig Boden- und Pflanzenproben genommen. Dabei erfolgte die Beprobung der Pflanzenbiomasse jeweils zur Ernte. Im Oktober 2018 und 2019 und bei der finalen Beprobung (Feld A: April 2020, Feld B: Juli 2020) wurden Bodenproben bis in 90 cm Tiefe gestochen, unterteilt in 3 Horizonte (0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 90 cm).

Zur Messung der Nitratauswaschung aus den ^{15}N -markierten Düngern wurden unter jedem Mikroplot drei SIA installiert. Der Wechsel erfolgte jeweils nach der Ernte, aber vor Aussaat der nächsten Kultur. Auch in den SIA-Extrakten erfolgte die Analyse der ^{15}N -Anreicherung mittels Mikrodifffusion.

Alle ^{15}N -Analysen sowie die Analyse auf Gesamt-N (N_{tot}) wurden auf einem Elementaranalysator gekoppelt mit einem Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (Pyro cube + isoprime100, Elementar, Deutschland) durchgeführt. Um den prozentualen Anteil des markierten Düngerstickstoffs an der Pflanzen-N-Aufnahme („N derived from fertilizer“ = N_{dff}) zu berechnen, wurde die ^{15}N -Anreicherung in der Biomasse durch die ^{15}N -Anreicherung der jeweiligen Dünger geteilt und mit 100 multipliziert. Aus dieser Angabe lässt sich die prozentuale ^{15}N -Wiederfindung („recovery“) in eine Probe errechnen.

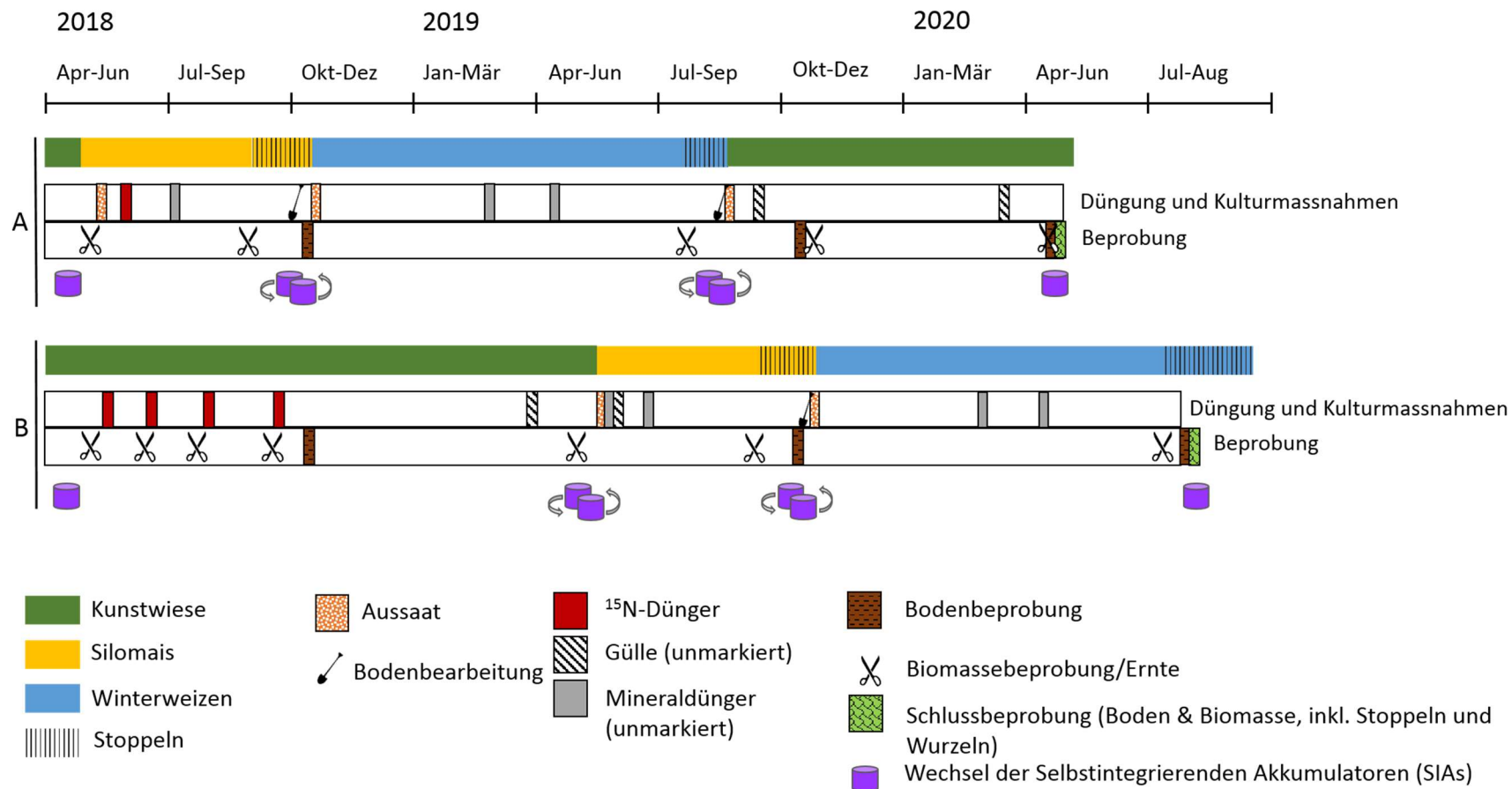


Abbildung 16: Zeitlicher Ablauf der Mikroplotstudie. Oben: Feld A, unten: Feld B. Die Darstellung zeigt die Fruchtfolge, Düngung und weitere Kulturmassnahmen inklusive ^{15}N -Düngung auf den Mikroplots, sowie die Beprobung der Mikroplots inklusive Wechsel der SIA. Die Beprobung des Oberbodens im Ausbringungsjahr ist nicht aufgeführt.

5.3.2 Natürliche Abundanz

Mittels der natürlichen Isotopenabundanz von ^{15}N und ^{18}O im Nitrat lassen sich Rückschlüsse auf die Herkunft des ausgewaschenen Nitrats ziehen (Kendall and Aravena, 2000). Dazu wurden insgesamt 154 SIA-Proben aus den Jahren 2018 und 2019 ausgewählt, die von 7 der 11 Felder stammten, die in Abbildung 15 aufgeführt sind.

Die Extrakte der ausgewählten SIA wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe für Aquatische und Isotopen Biogeochemie (Prof. Moritz Lehmann, Universität Basel) mithilfe der sogenannten Denitrifizierer-Methode aufbereitet (Sigman *et al.*, 2001; Casciotti *et al.*, 2002). Die $\delta^{15}\text{N}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im entstandenen N_2O wurden auf einem Isotopenverhältnis-Massespektrometer (Delta V Plus, Thermo Fischer Scientific) verbunden mit einer GasBench II bestimmt. Die Daten wurden mit einem Bayesian mixing model (*simmr*) ausgewertet (Parnell and Inger, 2020), um die relativen Beiträge potentieller Nitratquellen unter landwirtschaftlichen Böden zu identifizieren.

5.4 Hochrechnung der Ergebnisse auf die Region

Die im Projekt NitroGäu unter allen 11 Feldern ohne Massnahmenstreifen (aber nach den Vorgaben des Nitratindex bewirtschaftet) mit den SIA gemessene Nitratauswaschung wurde für die wichtigsten Kulturen auf die Ackerbaufläche extrapoliert, die Teil des Nitratprojekts Gäu-Olten ist. Angaben zur Landnutzung auf den Vertragsflächen im Jahr 2020 wurde vom Amt für Umwelt Solothurn zur Verfügung gestellt. Die gesamte Ackerfläche (einschliesslich Kunstwiesen) betrug 919 ha, während die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche 1394 ha betrug (einschliesslich Dauergrasland und gartenbaulich genutzten Flächen). Das NitroGäu-Projekt erfasste die Nitratauswaschung unter sechs wichtigen Ackerkulturen: Winterweizen (Brot- und Futterweizen), Wintergerste, Dinkel, Silomais, Winterraps und Kunstwiese. Diese Kulturen bedeckten im Jahr 2020 eine Fläche von 796 ha, entsprechend 87% der Ackerfläche. Die mittlere mit den SIA gemessene Nitratauswaschung pro Kultur wurde mit der Gesamtfläche jeder Kultur multipliziert, um die gesamte Nitratauswaschung pro Kultur auf den Vertragsflächen zu ermitteln. Anschliessend wurde ein gewichtetes Mittel der Nitratauswaschung pro Hektar für die Fläche unter diesen 6 Kulturen berechnet. Mit einer mittleren Versickerung von 400 mm pro Jahr (Hunkeler *et al.*, 2015) wurde schliesslich die Nitratkonzentration im Sickerwasser unter Ackerland abgeschätzt.

6. Literatur

- BAFU, 2019. Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz - Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016 Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901: 138 S.
- Beisecker, R., Peter, M., Miller, R., 2018. Herbst-Nmin-Gehalte als Erfolgsindikatoren der Gewässerschutzberatung in Hessen. Korrespondenz der Wasserwirtschaft. Sonderdruck Nitrat im Grundwasser - ein unlösbares Problem? 6, 18-24.
- Bischoff, W.-A., 2007. Entwicklung und Anwendung der Selbst-Integrierenden Akkumulatoren: Eine Methode zur Erfassung der Sickerfrachten umweltrelevanter Stoffe. Technische Universität Berlin, p. 145.
- Casciotti, K.L., Sigman, D.M., Galanter Hastings, M., Böhlke, J.K., Hilkert, A., 2002. Measurement of the Oxygen Isotopic Composition of Nitrate in Seawater and Freshwater Using the Denitrifier Method. Anal. Chem. Vol. 74, 4905-4912.
- Diederichs, A., 2021. Modelling nitrate leaching in the Gäu region using the farm model and the Daisy model. MSc thesis. TUM School of Life Sciences. Technical University Munich.
- Finck, M., 2017. SchALVO Nitratbericht. Ergebnisse der Beprobung 2016. Ergebnisse der Nitratuntersuchungen von Böden aus Wasserschutzgebieten (WSG) gemäß der Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung Baden-Württembergs (SchALVO). Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg.
- Gilbert, L., 2021. Tracing sources of nitrate leaching using the natural abundance of ^{15}N and ^{18}O . MSc thesis, Martin Luther University Halle-Wittenberg.
- Hauert, C., von Rohr, G., Margreth, S., Schmidhauser, A., Gasche, T., 2017. Böden im Kanton Solothurn. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Solothurn, Heft 43, 2017, S. 49–175. Verfügbar unter https://www.so.ch/fileadmin/internet/bjd/bjd-afu/20_Boden/2_Boden/fb-17-04_Boeden_im_Kanton_Solothurn.pdf.
- Heumann, S., Fier, A., Hassdenteufel, M., Hoper, H., Schafer, W., Eiler, T., Bottcher, J., 2013. Minimizing nitrate leaching while maintaining crop yields: insights by simulating net N mineralization. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 95, 395-408.
- Hunkeler, D., Sonney, R., Paratte, D., Tallon, L., 2015. Nitratprojekt Gäu-Olten: Hydrochemische Erkundung des Grundwasserleiters und Bestimmung der Altersstruktur. https://so.ch/fileadmin/internet/bjd/bjd-afu/pdf/wasser/Bericht_Gäu_Schlussversion_Komplett.pdf.
- Jan, P., Calabrese, C., Lips, M., 2013. Bestimmungsfaktoren des Stickstoff-Überschusses auf Betriebsebene. Teil 1: Analyse auf gesamtbetrieblicher Ebene. Abschlussbericht zuhanden des Bundesamts für Landwirtschaft BLW. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, p. 1- 82.
- Kendall, C., 1998. Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments. In: Kendall, C., McDonnell, J.J. (Eds.), Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, pp. 519-576.
- Kendall, C., Aravena, R., 2000. Nitrate Isotopes in Groundwater Systems. 261-297.

- König, V., Höpfner, E., Wagner, S., 2011. N_{min}-Gehalte im Boden nach der Hauptfruchternte und ihre Bedeutung für die N-Düngung nachfolgender Winterungen. Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztag 2011. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, Heft 8, 108-114.
- Liu, Y., Engel, B.A., Flanagan, D.C., Gitau, M.W., McMillan, S.K., Chaubey, I., 2017. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities. *Sci Total Environ* 601-602, 580-593.
- Osterburg, B., Rühling, I., Runge, T., Schmidt, T.G., Seidel, K., Antony, F., Gödecke, B., Witt-Altfielder, P., 2007. Kosteneffiziente Massnahmenkombinationen nach Wasserrahmenrichtlinie zur Nitratreduktion in der Landwirtschaft. Braunschweig, Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser.
- Parnell, A., Inger, R., 2020. Stable Isotope Mixing Models in R with *simmr*. <https://Cran.RProject.Org/Web/Packages/Simmr/Vignettes/Simmr.html>.
- Sanders, J., Hess, J., 2019. Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Thünen Report Nr. 65. Johann Heinrich von Thünen-Institut. DOI:10.3220/REP1547040572000, Braunschweig.
- Sigman, D.M., Casciotti, K.L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M., Böhlke, J.K., 2001. A Bacterial Method for the Nitrogen Isotopic Analysis of Nitrate in Seawater and Freshwater. *Anal. Chem.* 73, 4145-4153.
- Xue, D., Botte, J., De Baets, B., Accoe, F., Nestler, A., Taylor, P., Van Cleemput, O., Berglund, M., Boeckx, P., 2009. Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater. *Water Res* 43, 1159-1170.

7. Danksagung

Viele Personen und Institutionen haben diese Studie direkt oder indirekt unterstützt:

- Das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und das Amt für Umwelt Solothurn (AfU) durch die Finanzierung des Projekts NitroGäu und die fortwährende Begleitung und Unterstützung des Projekts, insbesondere Ruth Badertscher (BLW) sowie Rainer Hug und Magdalena Gisiger (AfU).
- Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) durch die Finanzierung der Verlängerung der Messungen Gäu im Winter 2020/2021, insbesondere der Abteilung Wasser.
- Der Wallierhof für die Hilfe bei der Flächensuche für die N_{min}-Herbstvorräte und die fortwährende Begleitung und Unterstützung, insbesondere Anja Latscha und Bernhard Strässle.
- Florian Hediger und Tamas Mengesha für Literatursuche und Erstellung von Grafiken.
- Die beteiligten Landwirte durch die Bereitschaft, sich am Projekt zu beteiligen.