



ERA-NET **SUSAN**

Abschlussbericht

| | |
|---|---|
| Zuwendungsempfänger: Leibniz Institut für Nutztierbiologie (FBN); ➤ Institut für Genombiologie, AG Genomik, Prof. Dr. K. Wimmers | Förderkennzeichen: 2817ERA02D |
| Vorhabenbezeichnung: PEGaSus – Phosphor-Effizienz bei Gallus gallus und Sus scrofa: Überbrückung der Lücken in der Phosphorverwertungskette (<i>Phosphorus efficiency in Gallus gallus and Sus scrofa: Bridging the gaps in the phosphorus value chain</i>) | |
| Bewilligungszeitraum/Planzeitraum: 01.09.2017 – 28.02.2021 | Berichtszeitraum: 01.09.2017 – 28.02.2021 |

Inhalt

| | |
|---|----|
| Vorwort | 3 |
| 1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen | 4 |
| 2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, Nebenergebnisse und wesentlichen Erfahrungen | 4 |
| 3. Darstellung und Erläuterung der Angemessenheit von Aufwand und Zeit | 12 |
| 4. Aufführen von Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben | 12 |
| 5. Darstellung und Erläuterung der wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit für eine mögliche nächste Phase | 12 |
| 6. War der Einsatz der Bundesmittel für die Erreichung des geplanten Vorhabenziels ursächlich oder wäre dieses Ziel auch ohne Bundesmittel erreicht worden? | 14 |
| 7. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer und Darstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen | 14 |
| 8. Vergleich der entstandenen Ausgaben mit dem verbindlichen Gesamtfinanzierungsplan. Erläuterung der Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 15 |
| Anhang A | 16 |
| Anhang B | 18 |
| Kurzfassung zum Abschlussbericht | 20 |
| Project summary | 21 |

Vorwort

Der vorliegende Abschlussbericht, angefertigt durch das Forschungsinstitut für Nutztierbiologie Dummerstorf (FBN), bezieht sich auf das im Rahmen des ERA-Net “Sustainable Animal Productions” (ERA-NET SusAn) geförderte Projekt PEGaSus. Das Gesamtprojekt wurde zusammen mit vier weiteren Europäischen Partnern bearbeitet. Die Projektleiter der Partner waren Elizabeth Ball (Agri-Food and Biosciences Institute, UK), Hanne Damgaard Poulsen (Department of Animal Science, Aarhus University, DK), Arno Rosemarin (Stockholm Environment Institute, SE) und Paolo Sckokai (Department of Agricultural and Food Economics, Università Cattolica del Sacro Cuore, IT). Das FBN fungierte unter Leitung von Klaus Wimmers als Koordinator des PEGaSus Projektes. Nachfolgend werden die Ergebnisse des Gesamtprojekts dargestellt, wobei die Einzelleistungen und Themenfelder, die vom FBN bearbeitet wurden, explizit ausgeführt sind. Das ERA-Net “Sustainable Animal Productions” hat den Schwerpunkt auf den folgenden Forschungsfeldern:

Forschungsbereich 1: Verbesserung der Produktivität, Widerstandsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Tierproduktion.

Forschungsbereich 2: Verbesserung und Management der Ressourcennutzung zur Reduzierung von Abfällen und zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit der europäischen Tierproduktion

Forschungsbereich 3: Verbesserung der landwirtschaftlichen Praxis zur Erhöhung der Verbraucherakzeptanz und zur Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen im Zusammenhang mit Tierschutz, Produktqualität und -sicherheit, Biodiversität und Erbringung von Ökosystemleistungen.

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

PEGaSus ist ein im Rahmen des ERA-Net “Sustainable Animal Productions” (ERA-NET SusAn) gefördertes Projekt. Mit dem Fokus auf eine nachhaltige Nutzung von Phosphor im landwirtschaftlichen Kreislauf und den damit verbundenen Aspekten der Wettbewerbsfähigkeit, Umweltwirkung und der sozialen Akzeptanz der europäischen Tierproduktion adressiert PEGaSus alle drei Forschungsschwerpunkte des ERA-NET SusAn Netzwerkes. Mit dem Schwerpunkt auf Nutztiere, insbesondere Schweinen und Geflügel, hat das Projekt zu einem verbesserten Verständnis der Variation der Phosphornutzung beigetragen. Es sind neue Strategien entwickelt und getestet worden, um die nachhaltige Intensivierung von europäischen Schweine- und Geflügelbeständen und die effizientere Nutzung von Phosphor im agrarischen Zyklus zu fördern. Die darauf aufbauenden bioökonomischen Szenarien, die ökologische, politische und soziale Aspekte miteinander verbinden, haben wesentlich dazu beigetragen, die Auswirkungen alternativer Phosphor-Management-Strategien und -Politiken auf die Betriebswirtschaft und den ökologischen Fußabdruck ganzheitlich zu bewerten.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, Nebenergebnisse und wesentlichen Erfahrungen

Im Rahmen von PEGaSus wurde der Verbleib von Phosphor in verschiedenen Tier- und Umweltproben nachverfolgt, um die Phosphorflüsse in der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette abzubilden. Rund um das Thema Phosphor leistete das Projekt einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit (bioökonomische Modellierung für Futtermittelpflanzen, technische und institutionelle Einschränkungen), zum Umweltschutz (Effizienz der Phosphorverwendung, Phosphorumsatz, Phosphorausscheidungsraten nach alternativen Fütterungsstrategien) und zur Bewertung politischer/regulatorischer Aspekte (Phosphor-Governance). In PEGaSus wurden Untersuchungen zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Phosphor in verschiedenen Fütterungsszenarien durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den Aspekten der Bioverfügbarkeit, Verdaulichkeit und Effizienz von Phosphor in der Hühner- und Schweineernährung. Zusammen mit den Projektpartnern wurde die ökonomische Relevanz alternativer Fütterungsstrategien erarbeitet. Außerdem wurden technische, politische und Governance-Strategien entwickelt, um die Umweltwirkungen von Phosphor entlang der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette zu minimieren. Es verdeutlichte auch die Notwendigkeit strengerer Phosphor-Vorschriften innerhalb der EU, wenn es um die Ausbringung von gelagertem Dung auf Ackerflächen geht (wie die Nitratrichtlinie für Stickstoff).

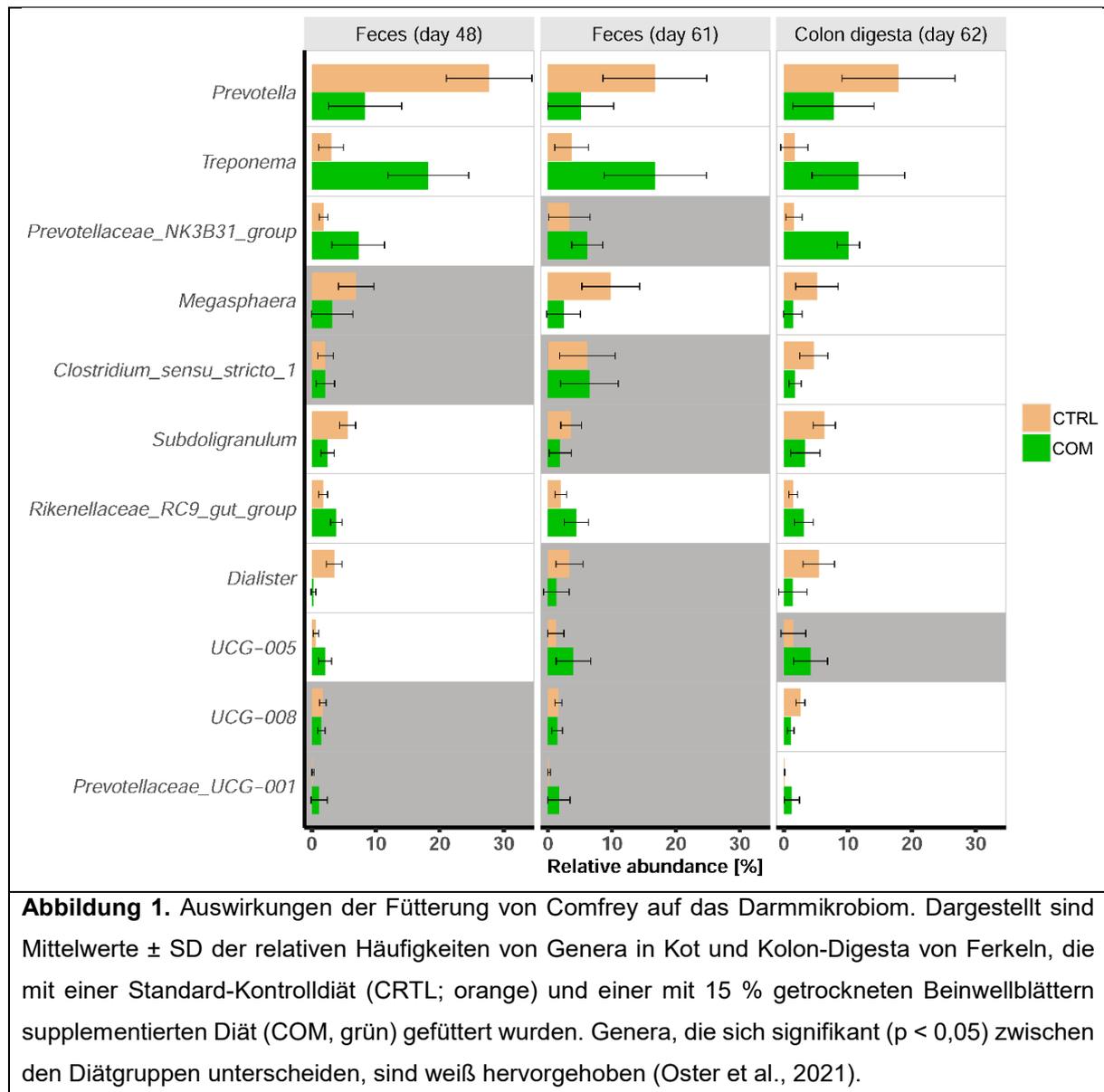
Das FBN lieferte in allen drei Arbeitspaketen Beiträge zu PEGaSus (Anhang A). Die Ergebnisse umfassen neben der Aufklärung der genetischen Vielfalt des

Phosphorstoffwechsels auch die Herausstellung relevanter Stoffwechselfade für eine effiziente Phosphornutzung in der Nutztierhaltung. Dafür wurden am Standort Tierstudien mit alternativen Fütterungsregimen durchgeführt und deren Auswirkungen auf die Knochenentwicklung und die P-Homöostase auf verschiedenen Ebenen untersucht. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse zu den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

WP1: Phosphor-Management im landwirtschaftlichen Betrieb

Arbeitspaket 1 ("die Tierfarm") befasste sich mit ökonomischen und biologischen Aspekten des P-Managements in landwirtschaftlichen Betrieben. Unter der Leitung des Arbeitspakets von UCSC wurden alle geplanten Tierversuche durchgeführt und die Leistungs- und Stalldaten sowie die Wissensdatenbanken der Partnerinstitute in bioökonomische Szenarien integriert. Die durchgeführten Fütterungsversuche bei Schweinen und Hühnern umfassten (i) den Zusatz verschiedenen Phytasekonzentrationen, (ii) die Flüssigfütterung, (iii) die Verfütterung von phytasearmen Getreide, (iv) die Supplementierung von Beinwell, (v) die Supplementierung von Leguminosen und (vi) variable Gehalte an mineralischem Phosphor. Auf dieser Basis wurde eine Gewebesammlung aufgebaut, die von den Projektpartnern für spätere Laboranalysen genutzt wurde. Das bioökonomische Modell für Schweine- und Geflügelbetriebe wurde entwickelt und auf die aktuelle Situation in der EU kalibriert. Das Modell wurde angewandt, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit und die Umweltleistung alternativer Fütterungsstrategien und potenzieller staatlicher Maßnahmen zu bewerten und zu vergleichen.

Der **Beitrag des FBN** zum Arbeitspaket 1 bestand in der Durchführung von Fütterungsexperimenten beim Schwein und Huhn. Die experimentellen Studien umfassten Experimente zur besseren Nutzung von Pflanzen-gebundenen Phosphor (Comfrey, Leguminosen) mit dem Ziel, weitgehend auf eine Supplementierung von mineralischem Phosphor verzichten zu können. Insbesondere die Nutzung der Beinwellpflanze (Comfrey, *Symphytum spp.*) ist nicht nur als Futtermittel interessant, da ihr ausgedehntes Wurzelsystem auch zu regionalen Nährstoffkreisläufen beitragen kann, z.B. durch die Bindung von Nährstoffen in überdüngten Böden. Tatsächlich ist die Verhinderung des P-Verlustes eine der größten Herausforderungen in der landwirtschaftlichen Praxis. Nach der Analyse des Profils von Mikro- und Makronährstoffen in Beinwellblättern wurden in den Fütterungsversuchen 4 % und 15 % Beinwellblätter im Futter von Masthähnchen bzw. Mastschweinen supplementiert (Abbildung 1).



Weiterhin kann der Einsatz von heimischen Leguminosen zur Versorgung moderner Nutztierassen beitragen. In dem vom FBN durchgeführten Fütterungsversuch mit Leguminosen bei Schweinen wurde daher Wert darauf gelegt vorrangig einheimische Futterkomponenten einzusetzen. Insgesamt wurde ein 15%iges Leguminosengemisch aus Erbsen, Ackerbohnen und Linsen im Schweinefutter supplementiert. Gegenstand einer weiteren Fütterungsstudie (P-Conditioning) war der leistungsabhängige mineralische Phosphorbedarf. Ziel dieser Untersuchung war die Abklärung, inwieweit eine verminderte bzw. erhöhte Phosphor-Supplementierung in Sauen und deren Ferkeln einen Einfluss auf Wachstum und Stoffwechselfgesundheit nimmt und ob aufgrund etwaiger Veränderungen der Knochenmineralisierung und des Knochenmarks immunmodulatorische Effekte beobachtet werden können (Abbildungen 2-4).

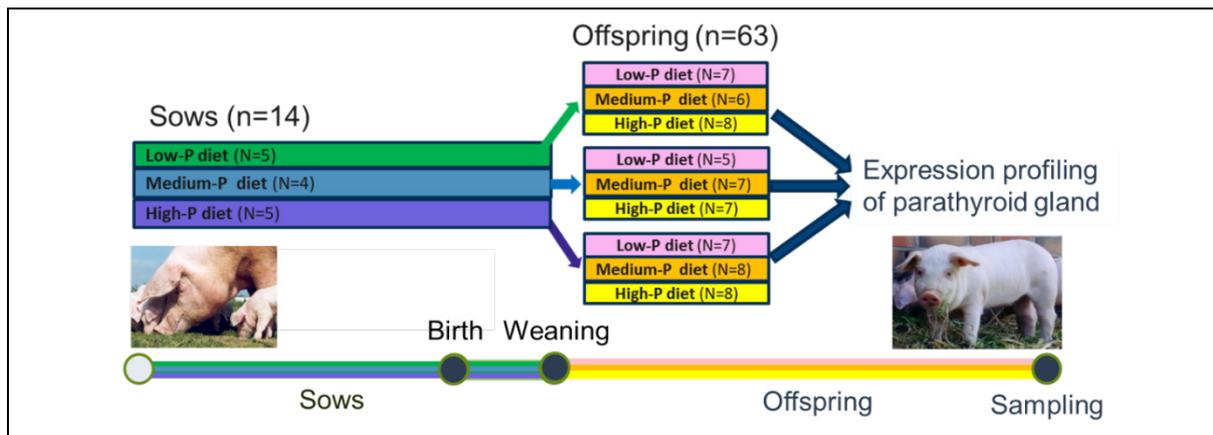


Abbildung 2. Experimentelles Design – differentielle Fütterung von Sauen während der Trächtigkeit und ihrer Nachkommen nach dem Absetzen.

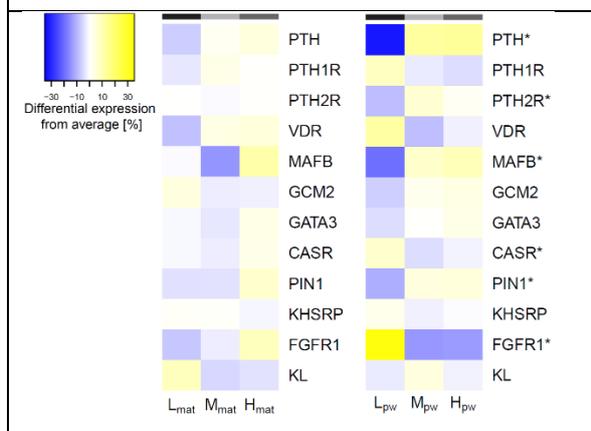


Abbildung 3. Differentielle Expression von Schlüsselgenen der Mineralstoffhomöostase in der Nebenschilddrüse in Abhängigkeit von Fütterung der Mütter (links) und nach dem Absetzen (rechts). Signifikante Unterschiede zwischen den experimentellen Gruppen sind durch * gekennzeichnet (Oster et al. 2021).

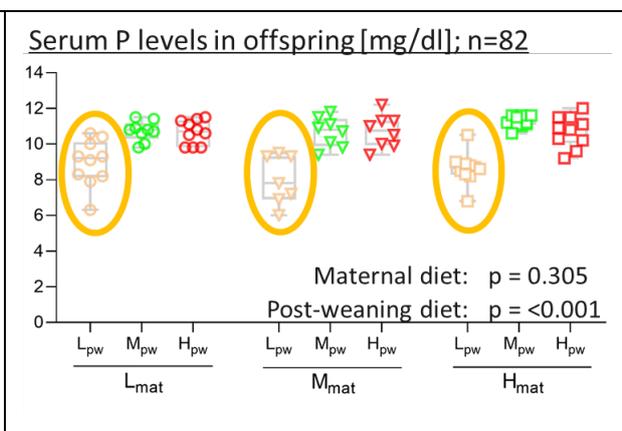


Abbildung 4. Serum Phosphorkonzentration von Ferkeln in Abhängigkeit von der Fütterung der Mütter und nach dem Absetzen. Nachkommen von Müttern, die mit niedrigem P gefüttert wurden, sind tendenziell den Tieren der anderen Gruppen bezüglich der P-Homöostase und weiterer Leistungsmerkmale überlegen, wenn sie eine P-arme Diät erhalten. Dies deutet auf eine subtile Konditionierung auf niedrigen P hin.

Alle Arbeitsziele des ersten Arbeitspaketes wurden erreicht und neben der Erfassung der zootecnischen Parameter wurde eine entsprechend umfangreiche Proben- und Gewebesammlung generiert.

WP2: Tierseitige Faktoren der Phosphoreffizienz

Arbeitspaket 2 ("das Labor") umfasste die eingehende Phänotypisierung der Tiere der verschiedenen Fütterungsstudien und stand unter der Leitung von AU (DK). Hier wurden Daten zur Phosphorhomöostase (z.B. Hormonspiegel), Tierschutzindikatoren (z.B. Blutprofile, Knocheneigenschaften), molekulare Phänotypen (z.B. Expressionsprofile von Darm, Niere, Nebenschilddrüsen), mikrobielle Zusammensetzung (z.B. Digesta, Kot, mit Dung behandelte Bodenproben), Verdaulichkeit (Phytatabbau, Phytaseaktivität) und Morphologie (z.B.

Darmstruktur, Nebenschilddrüsenschliffe, Knochenstruktur) erfolgreich erfasst und in Datenbanken und wissenschaftliche Publikationen aufgenommen.

In einer ersten genetischen Studie wurde der genetische Beitrag an der Variation der Phosphorhomöostase bei Schweinen erforscht. Die Analysen unterstrichen einerseits die hohe individuelle Vielfalt im Phosphathaushalt und andererseits die komplexe genetische Architektur des Merkmals. Darüber hinaus zeigten Schweine beträchtliche Unterschiede in den physiologischen Parametern, die die Phosphor-Homöostase nach einer diätetischen Phosphorreduzierung aufrechterhalten, einschließlich der endokrinen Kontrolle des Mineralstoffhaushalts, der Expression von Phosphortransportern und der nachfolgenden Phosphorausscheidungsraten. Die Ergebnisse der Flüssigfütterungsversuche zeigten, dass recht hohe Mobilisierungsraten von phytatgebundenem Phosphor aus Pflanzenmaterial erreicht werden können. In diesem Zusammenhang weisen die Ergebnisse der mikrobiellen Zusammensetzung nach verschiedenen Fütterungsregimen, die im Gesamtprojekt durchgeführten wurden, auf die Fähigkeit der intestinalen Mikrobiota hin, die Verbesserung der Phosphorverwertung in Schweinen und Geflügel zu unterstützen. Die gezielte Ausnutzung der systemspezifischen Grenzen kann für die Umwelt- und Tierforschung im Hinblick auf eine nachhaltige Lebensmittelproduktion und eine verbesserte Phosphoreffizienz, aber auch für Fragen der Governance und Ökonomie von Bedeutung sein.

Der **Beitrag des FBN** zum zweiten Arbeitspaket bestand in der Durchführung von Expressionsanalysen in Abhängigkeit von verschiedenen Fütterungsfaktoren sowie Analysen der genetischen Biodiversität vor dem Hintergrund variabler Phosphoreffizienz. Die Supplementierung von Schweine- und Hühnerdiäten mit Beinwellblättern erwies sich als durchaus realisierbar und könnte aufgrund der phytogenen Inhaltsstoffe auch biopositive Effekte auf die Darmgesundheit haben. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Beinwellblätter als Futterkomponente in integrierten landwirtschaftlichen Systemen zur Etablierung regionaler Nährstoffkreisläufe dienen könnten. Mit den Studien zur Nebenschilddrüse, als wichtiges Organ für die Aufrechterhaltung der Mineralstoffhomöostase, konnten sowohl methodische Fortschritte bei der Probennahme beim Schwein als auch wichtige neue Erkenntnisse auf molekularer Ebene gewonnen werden. Natrium/Phosphat-Cotransporter gelten als wichtige Mediatoren der P-Homöostase.

Die Expression spezifischer Natrium/Phosphat-Cotransporter wird routinemäßig als unmittelbare Reaktion auf diätetische Interventionen bei verschiedenen Spezies verwendet. Es ist jedoch ein allgemeines Verständnis ihrer Gewebespezifität erforderlich, um ihren besonderen Beitrag zur P-Homöostase aufzuklären. Es wurde der gewebeweite Genexpressionsstatus aller derzeit annotierten Natrium/Phosphat-Co-Transporter in zwei Schweineversuchen untersucht, die sich auf ein handelsübliches Standardfutter oder auf

abweichende P-haltige Futtermittel konzentrierten. Eine breite Palette von Geweben einschließlich des Gastrointestinaltrakts (Magen, Zwölffingerdarm, Jejunum, Ileum, Caecum und Dickdarm) und von Nieren-, Leber-, Knochen-, Muskel-, Lungen- und Aortaprobe wurden analysiert (Abbildung 5 und 6).

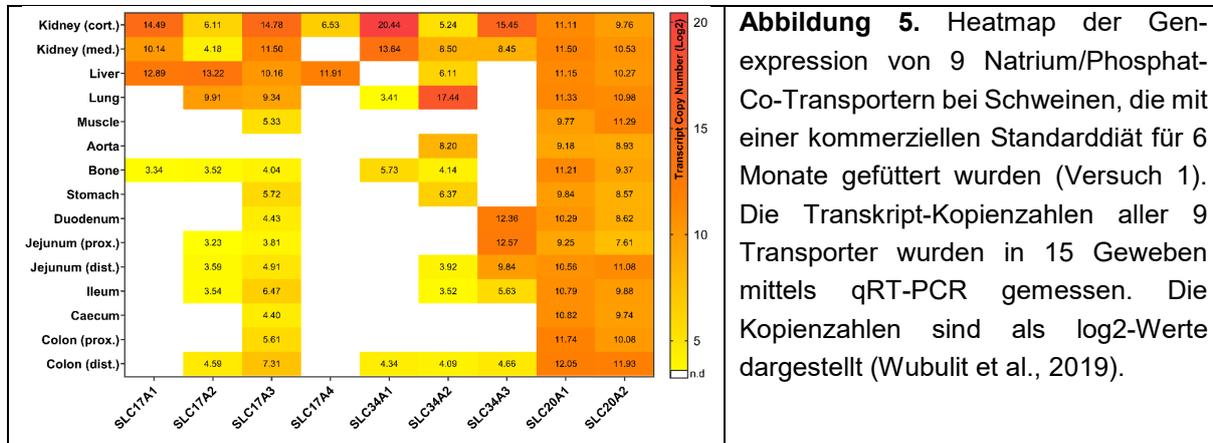


Abbildung 5. Heatmap der Genexpression von 9 Natrium/Phosphat-Co-Transportern bei Schweinen, die mit einer kommerziellen Standarddiät für 6 Monate gefüttert wurden (Versuch 1). Die Transkript-Kopienzahlen aller 9 Transporter wurden in 15 Geweben mittels qRT-PCR gemessen. Die Kopienzahlen sind als log₂-Werte dargestellt (Wubulit et al., 2019).

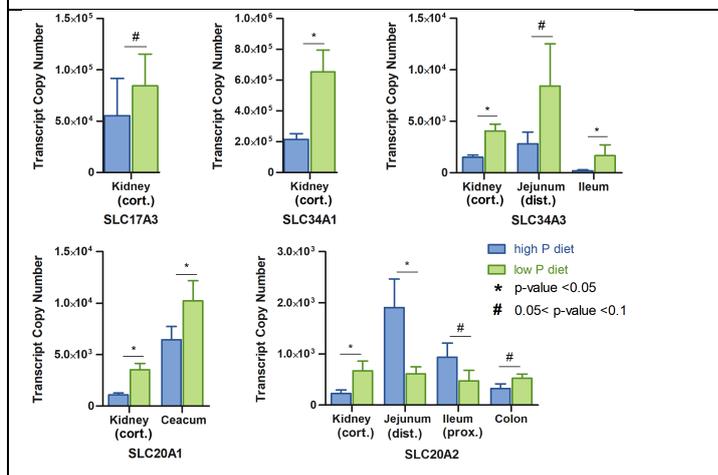


Abbildung 6. Unterschiede in der Transkriptkopienzahlen von P-Transportern in verschiedenen Geweben bei Schweinen, die unterschiedliche P-haltige Diäten gefüttert wurden (Versuch 2). Die Zeichen über den Balken zeigen statistische Signifikanz (*, p < 0,05) und Trends (#, p < 0,1) der Gruppenvergleiche an (Wubulit et al., 2019).

Beide Studien zeigten konsistente Muster in der gesamten gewebespezifischen Expression von P-Transportern. Während SLC34A2 bei anderen Spezies einschließlich des Menschen als wichtigster intestinaler P-Transporter angesehen wurde, erwies sich SLC34A3 als der prominenteste intestinale P-Transporter bei Schweinen. Darüber hinaus zeigten die P-Transporter der SLC17-Familie eine basale Expression im Schweinedarm und könnten einen Beitrag zur P-Homöostase leisten.

Auf der Basis verfügbarer Referenzpopulationen für Schweine wurden genomweite Assoziationsstudien (GWAS) am FBN durchgeführt, um DNA-Marker für Parameter der P-Homöostase zu ermitteln (Abbildung 7). Bei den durchgeführten genomweiten Analysen im Schwein wurden aus dem Blut stammende Proxies für die Calcium- und P-Homöostase verwendet, darunter Calcium, P, die Aktivität der alkalischen Phosphatase (ALP) und das jeweilige Calcium/P-Verhältnis. Die Studie klärt die genetischen Parameter von Calcium, P, Calcium/P und ALP auf und liefert eine Liste von positionellen und funktionellen Kandidatengenen und QTL-Regionen. Es wird angenommen, dass fast die Hälfte der Schwankungen des Phosphorgehalts im Blut von Schweinen auf genetische Faktoren

zurückzuführen ist. Die Berücksichtigung der Ergebnisse könnte sich in Bezug auf die Schweine- und Hühnerzucht sowohl für eine effizientere Nutzung von Nahrungsmineralien als auch für eine optimale Entwicklung und Erhaltung des Skelettsystems als vorteilhaft erweisen.

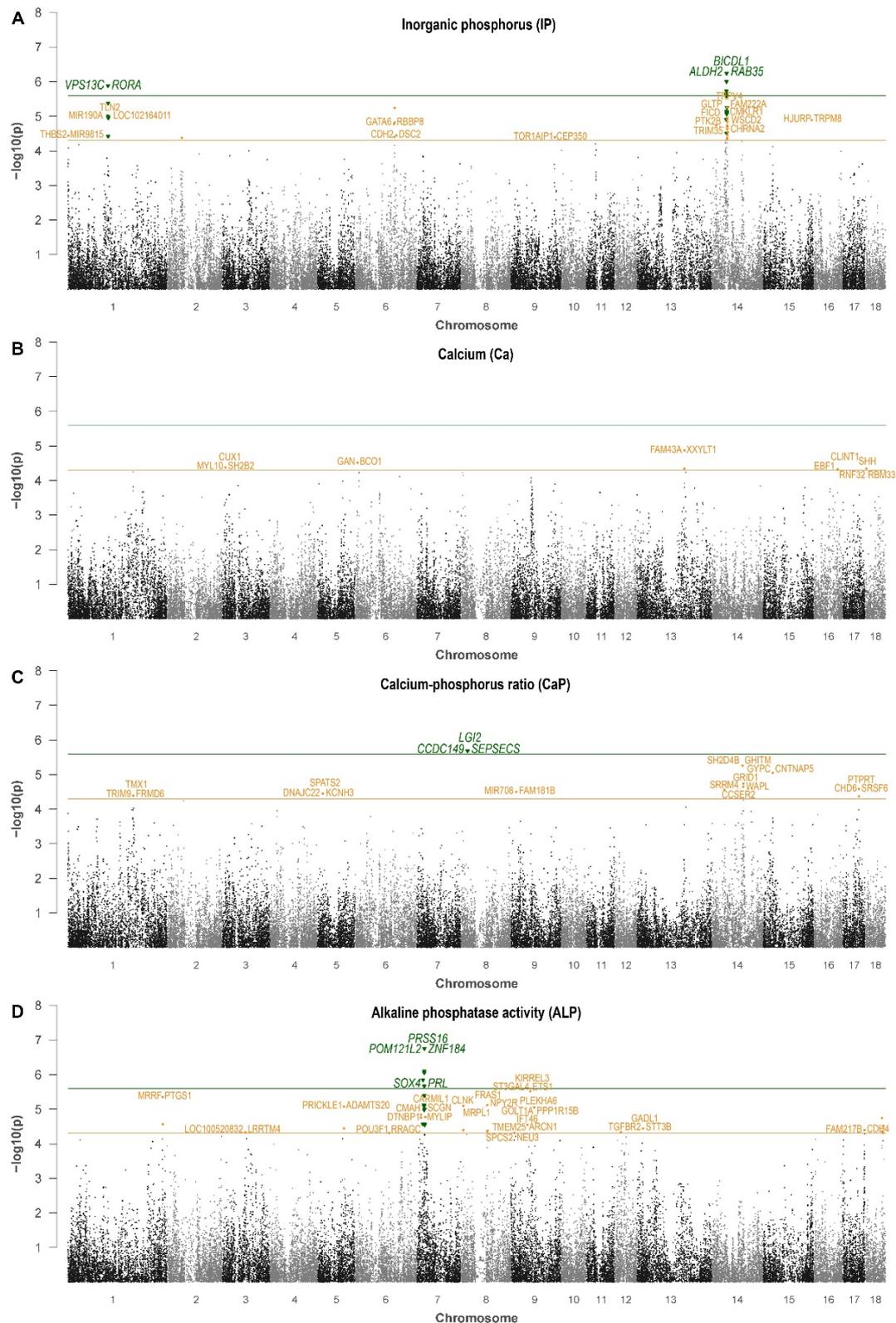


Abbildung 7. Assoziationsanalyse der hämatologischen Werte von anorganischen Phosphor (A), Calcium (B), Calcium/Phosphor-Verhältnis (C) und der alkalischen Phosphatase Aktivität (D). Orange und grüne Linien zeigen suggestive bzw. genomweite Signifikanz an. Gene, die dem Hauptmarker in dem entsprechenden Genabschnitt am nächsten liegen, sind angegeben (Reyer et al., 2019).

WP3: Verbesserte Phosphoreffizienz in der landwirtschaftlichen Produktionskette

Arbeitspaket 3 ("das Ökosystem") befasste sich mit der Interaktion von Tieren, Pflanzen und Boden über Futtermittel und Gülle/Dünger, indem die ökologischen Bewertungen und Empfehlungen verschiedener P-Managementsysteme (lokal und national) analysiert wurden und die Phosphorströme in der Nahrungskette und im Ökosystem verfolgt wurden. In diesem WP wurden die erhobenen Daten integriert, um die übergeordneten Ziele zu erreichen und zur Beantwortung folgender Fragen beizutragen:

- Wie viel Phosphor durchläuft typische Schweine- und Hühnerfarmen innerhalb des EU-Landwirtschaftssystems; wie viel wird recycelt?
- Wie wirken sich Stickstoffverluste aus Gülle auf die Überladung von Ackerflächen mit Phosphor aus?
- Wie effizient ist die Nutzung von Phosphor in Schweine- und Geflügelfarmen; was charakterisiert das Phosphorproblem in diesen Systemen?
- Was kann getan werden, um die Phosphoreinträge, -überschüsse und -verluste in der Schweine- und Geflügelhaltung zu reduzieren und welche Praktiken tragen am meisten zur Phosphorüberlastung bei?
- Welche Politiken und Vorschriften greifen, wenn es darum geht, eine effizientere Nutzung von Phosphor und die Reduzierung von Phosphorverlusten zu fördern?

PEGaSus hat gezeigt, dass Phosphorgehalte bei der Düngung der Äcker auf EU-Ebene im Wesentlichen nicht reguliert wurden, was zu jahrzehntelangen Überschüssen und Verschwendung von Phosphor geführt hat; insbesondere in Ländern, in denen es keine nationalen Vorschriften gibt. Die jüngste IPPC-BAT-Richtlinie (2017) wird möglicherweise dazu beitragen, die großen Schweine- und Geflügelfarmen in Bezug auf Stickstoff- und Phosphoremissionen zu steuern, nicht aber in Bezug auf die Nährstoffe in der Gülle, die auf Ackerflächen ausgebracht wird. Die Gülle, die sich durch Lagerungsprozesse im Stickstoff/Phosphor Verhältnis verändert, wird auf der Grundlage des Stickstoffgehalts und des Stickstoffbedarfs der Pflanzen auf die Felder ausgebracht, ohne dass die Phosphorzufuhr eingeschränkt wird. Die praktischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Anwendung einer Phosphorquote auf die Gülleausbringung wurden mit einem bioökonomischen Modell bewertet. Optionen für die Behandlung von Gülle zur Herstellung von Dünger und anderen vermarktungsfähigen Bioprodukten wurden ebenfalls bewertet.

Der **Beitrag des FBN** bestand darin, für die genannten Meilensteine in WP3 Daten zu liefern und sich an der gemeinsamen Interpretation der Ergebnisse und der Formulierung von Schlussfolgerungen zu beteiligen. Weiterhin übernahm das FBN für Projektpartner die Analyse von Mikrobiotaprofilen aus Bodenproben, um Aussagen zur Interaktion aus Fütterungsstrategie, P-Ausscheidung und Düngewirkung treffen zu können.

Insgesamt wurden alle Arbeitsziele in den drei Arbeitspaketen erreicht. Die Ergebnisse wurden unter Zusammenarbeit der PEGaSus Partner in einem Folgeantrag im Rahmen des JOINT CALL ERA-NET Cofund 2021 "Circularity in mixed crops and livestock farming systems with emphasis on climate change mitigation and adaptation" berücksichtigt.

3. Darstellung und Erläuterung der Angemessenheit von Aufwand und Zeit

Die im Projekt PEGaSus durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten personellen, finanziellen und zeitlichen Ressourcen waren notwendig und angemessen um die im Arbeitsplan definierten Ziele zu erreichen. Die zeitliche Umsetzung des Projekts entsprach im Wesentlichen der im Arbeitsplan formulierten Planung. Hierbei ist festzuhalten, dass die Planung und Durchführung der Fütterungsversuche einen gewissen Zeitaufwand, entsprechend dem Arbeitsplan, erforderten und dass sowohl die laboranalytischen Arbeiten als auch die Interpretation und Integration der Ergebnisse auf diesen Daten basierten. Die verzögerte Verfügbarkeit von Beinwellblättern und Leguminosen machte kleinere Anpassungen des Versuchsdesigns und der anschließenden Laboranalyse erforderlich. Darüber hinaus gab es geringe zeitliche Verzögerungen aufgrund von Problemen im Zusammenhang mit Infektionen in einem der Schweineversuche. Verzögerungen bei der Laboranalyse traten auch durch unvorhergesehene personelle Veränderungen in den Teams der Konsortiumspartner auf. Aufgrund der Covid-19-Pandemie verzögerten sich einige der geplanten Analysen bei den Projektpartnern und bei uns, da in dem entsprechenden Zeitraum einige Arbeiten nicht in vollem Umfang durchgeführt werden konnten. Um diesen Umstand zu kompensieren, wurde eine entsprechende ausgabenneutrale Verlängerung gewährt.

4. Aufführen von Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Alle geplanten Aktivitäten wurden wie ursprünglich im Projektvorschlag vorgesehen durchgeführt. Es waren keine zusätzlichen Fütterungsversuche oder unvorhergesehene Maßnahmen notwendig, um die Projektziele zu erreichen, und aus allen durchgeführten Arbeiten konnten Ergebnisse erzielt werden.

5. Darstellung und Erläuterung der wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit für eine mögliche nächste Phase

Durch die intensive Zusammenarbeit mit Partnern aus verschiedenen Bereichen der Tierwissenschaften, aber auch aus den Umweltwissenschaften und der Agrarökonomie haben sich über das PEGaSus-Projekt hinaus zahlreiche potenzielle thematische Entwicklungsfelder ergeben. Basierend auf der thematischen Ausrichtung und den erzielten Ergebnissen ist diese

Weiterentwicklung auf verschiedenen Ebenen möglich und angedacht, wobei der Fokus auf folgenden Punkten liegt:

- Tierphysiologie und -genetik; z.B. Fokus auf endogene Prozesse, die an der Regulation der Mineralhomöostase beteiligt sind
- Tierhaltung; z. B. Prozessierung von Futtermitteln zur Verbesserung des Nährstoffaufschlusses, Erhöhung des Anteils genutzter Biomasse unter anderem durch Nutzung von Zwischenfrüchten
- Emission; z. B. Gülle-Management, die Rolle der Mikrobiota und die Quantifizierung der gasförmigen Emissionen von Gülle
- Stoffkreisläufe; z. B. Pflanze-Boden-Interaktion unter Berücksichtigung der besonderen Bedeutung von Wirtschaftsdünger (Abbildung 8)
- Ackerbau; z. B. Züchtung von agrarökologischen Nutzpflanzen und deren Einsatz als Futtermittel

Ausgewählte Aspekte dieser thematischen Entwicklung wurden in einem Antrag projiziert, den das Konsortium im Rahmen des JOINT CALL ERA-NET Cofund 2021 "Circularity in mixed crops and livestock farming systems with emphasis on climate change mitigation and adaptation" eingereicht hat.

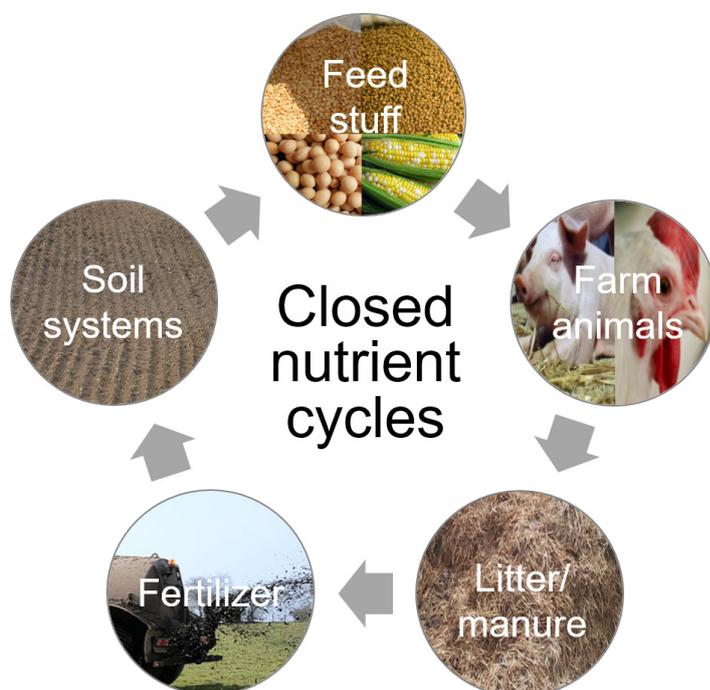


Abbildung 8. Landwirtschaftlicher Nährstoffkreislauf.

6. War der Einsatz der Bundesmittel für die Erreichung des geplanten Vorhabenziels ursächlich oder wäre dieses Ziel auch ohne Bundesmittel erreicht worden?

Unter Einsatz der Bundesmittel konnten umfangreiche Studien zu verschiedenen Facetten der Phosphoreffizienz beim Nutztier durchgeführt werden, die in dieser Komplexität anderweitig nicht hätten realisiert werden können. Hierbei ist auch der weitere Erkenntnisgewinn durch die Integration der Ergebnisse mit den von den Partnern im Konsortium erhobenen Daten zu betonen. Insbesondere der interdisziplinäre Ansatz unter Einbeziehung von Tierwissenschaftlern, Umweltwissenschaftlern und Agrarökonomen, der für das Erreichen der Projektziele essentiell war, wäre ohne die Förderung des Projektes nicht möglich gewesen.

7. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer und Darstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen

Im Rahmen des PEGaSus Projektes wurde eine eigene Internetpräsenz etabliert, die auch nach Projektende weiter besteht (<http://www.pegasus.fbn-dummerstorf.de/>). Zum Ende der Förderperiode wurde ein Webinar ("Phosphorus in Agricultural Systems", 22 April 2021, Online) mit Interessenvertretern veranstaltet, für das 140 Teilnehmer aus 25 Ländern angemeldet waren. Außerdem wurden die Forschungsdaten auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert:

- 69th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (Dubrovnik, 2018)
- Leibniz Conference on Sustainable Development Goals (Berlin, 2018)
- 3rd European Sustainable Phosphorus Conference (Helsinki, 2018)
- International Phosphorus Workshop 9 (Zürich, 2019)
- 70th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (Gent, 2019)
- ManuResource Conference (Hasselt, 2019)
- 15. Tagung Schweine- und Geflügelernährung (Lutherstadt Wittenberg, 2019)
- Vortragstagung der Deutschen Gesellschaft für Züchtungskunde e.V. (Gießen, 2019)
- Italian Association of Environmental and Resource Economics (IAERE; Brescia, 2020)

Die im Rahmen von PEGaSus erfolgten und geplanten begutachteten Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sind in Anhang B aufgeführt.

Anhang A

Übersicht über die Arbeitspakete und Aufgaben des PEGaSus-Projekts und deren gemeinsame Bearbeitung durch die fünf Partner.

| | | Partner | | | | |
|---|----------|----------|-----------|---------|----------|-----------|
| | | FBN (DE) | AFBI (UK) | AU (DK) | SEI (SE) | UCSC (IT) |
| Arbeitspaket 1 | | | | | | V |
| Sustainable on-farm management | Task 1.1 | M | M | M | M | V |
| | Task 1.2 | M | V | M | | |
| | Task 1.3 | M | M | M | M | V |
| Arbeitspaket 2 | | | | V | | |
| Biological factors of phosphorus use | Task 2.1 | M | M | V | | |
| | Task 2.2 | V | M | M | M | M |
| Arbeitspaket 3 | | | | | V | |
| Potential to minimise phosphorus losses | Task 3.1 | M | M | M | V | |
| | Task 3.2 | M | | | M | V |

V – verantwortlicher Partner; M – mitwirkender Partner

Übersicht über die Meilensteine im PeGaSus-Projekt, die unter Federführung des FBN durchgeführt wurden.

| Nr. in PEGaSus | Monat | Titel: Kurzbeschreibung |
|-----------------------|--------------|---|
| M1.1 | Okt 17 | PEGaSus Projekt Internetpräsenz |
| M1.2 | Dez 17 | Tierintrinsische Faktoren, die zum Phosphorkreislauf beitragen |
| M1.5 | Aug 18 | Beinwell – Huhn: Fütterungsstudie mit Beinwell als lokal verfügbarer Phosphorquelle |
| M1.6 | Dez 18 | Beinwell – Schwein: Fütterungsstudie mit Beinwell als lokale verfügbarer Phosphorquelle |
| M1.7 | Dez 18 | Leguminosen – Huhn: Fütterungsstudie mit heimischen Eiweißträgern beim Masthuhn |
| M1.8 | Jun 19 | Leguminosen – Schwein: Fütterungsstudie mit heimischen Eiweißträgern beim Schwein |
| M1.14 | Aug 18 | Futterkonditionierung: Analyse zur Charakterisierung des phänotypischen Einflusses variabler Phosphorversorgung trächtiger Sauen bei deren Nachkommen |
| M2.1 | Aug 19 | (Gewebe-)Probensammlung: Erstellung eines Probenrepositoriums aus den Fütterungsversuchen |
| M2.2 | Jun 19 | Transkriptom – Huhn: Microarray-Analysen von Zielgeweben aus den Experimenten mit Beinwell und Leguminosen |
| M2.3 | Okt 19 | Transkriptom – Schwein: mRNA-Seq- und Mikroarray-Analysen von Zielgeweben aus den Beinwell-, Leguminosen- und Phytasestudien |
| M2.4 | Dez 18 | `omics'-Analysen nach P-Konditionierung: mRNA-Seq Analysen in Zielgeweben |
| M2.5 | Feb 20 | Transkriptomische Datenanalyse Huhn: statistische und bioinformatische Analysen, relevante molekulare Pfade und Gene, Validierung der differentiellen Expression |
| M2.6 | Jun 20 | Transkriptomische Datenanalyse Schwein: statistische und bioinformatische Analysen, relevante molekulare Pfade und Gene, Validierung der differentiellen Expression |
| M2.7 | Apr 19 | Transkriptomische Analyse der `omics'-Daten nach Konditionierung: Analyse relevanter molekulare Pfade und Gene |
| M2.8 | Aug 19 | In-vitro-Validierung der P-Konditionierung: in-vitro-Analysen von Proben der P-Konditionierung bei Schweinen (z.B. Knochenmark) |
| M2.9 | Feb 18 | GWAS-Datensätze für Masthähnchen und Schweine |
| M2.10 | May18 | Genomweite Assoziationsstudie (GWAS): genetische Parameter und genomweite Assoziationsanalyse bei Schweinen und Hühnern |
| M2.11 | Feb 20 | Mikrobiom Profile: 16S-Sequenzierung der Mikrobiota in Ingesta (pro Diät) und Fäkalien (pro Diät, im Zeitablauf) abhängig vom phänotypischen Ergebnis. |
| M2.12 | Jun 19 | DarminTEGRITÄT: Morphologische Analyse der Darmschleimhaut abhängig vom phänotypischen Ergebnis. |
| M2.13 | Aug 19 | Erhebung von Knochenparametern |
| M2.14 | Aug 19 | Metabolitenanalyse: gezielte Analyse von endokrinen Regulationsmechanismen |
| M3.6 | Dez 19 | P-turn-over der Monogastrier: Einschätzung der Möglichkeiten zur Minimierung von Phosphorverlusten |

Anhang B

Darstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen in PEGaSus

- Oster, M., Reyer, H., Ball, E., Fornara, D., McKillen, J., Sørensen, K. U., Poulsen, H. D., Andersson, K., Ddiba, D., Rosemarin, A., Arata, L., Sckokai, P., Magowan, E. & Wimmers, K. Bridging Gaps in the Agricultural Phosphorus Cycle from an Animal Husbandry Perspective—The Case of Pigs and Poultry. *Sustainability* 10, 1825, (2018).
- Oster, M., Keiler, J., Schulze, M., Reyer, H., Wree, A. & Wimmers, K. Fast and reliable dissection of porcine parathyroid glands – A protocol for molecular and histological analyses. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger* 219, 76-81, (2018).
- Reyer, H., Oster, M., Wittenburg, D., Murani, E., Ponsuksili, S. & Wimmers, K. Genetic Contribution to Variation in Blood Calcium, Phosphorus, and Alkaline Phosphatase Activity in Pigs. *Frontiers in Genetics* 10, (2019).
- Wubuli, A., Reyer, H., Muráni, E., Ponsuksili, S., Wolf, P., Oster, M. & Wimmers, K. Tissue-Wide Gene Expression Analysis of Sodium/Phosphate Co-Transporters in Pigs. *International Journal of Molecular Sciences* 20, 5576, (2019).
- Oster, M., Reyer, H., Keiler, J., Ball, E., Mulvenna, C., Muráni, E., Ponsuksili, S. & Wimmers, K. Comfrey (*Symphytum* spp.) as an alternative field crop contributing to closed agricultural cycles in chicken feeding. *Science of The Total Environment* 742, 140490, (2020).
- Siengdee, P., Oster, M., Reyer, H., Viergutz, T., Wimmers, K. & Ponsuksili, S. Morphological and Molecular Features of Porcine Mesenchymal Stem Cells Derived From Different Types of Synovial Membrane, and Genetic Background of Cell Donors. *Frontiers in Cell and Developmental Biology* 8, (2020).
- Wubuli, A., Gerlinger, C., Reyer, H., Oster, M., Muráni, E., Trakooljul, N., Ponsuksili, S., Wolf, P. & Wimmers, K. Reduced phosphorus intake throughout gestation and lactation of sows is mitigated by transcriptional adaptations in kidney and intestine. *BMC Genomics* 21, 626, (2020).
- Hadlich, F., Reyer, H., Oster, M., Trakooljul, N., Muráni, E., Ponsuksili, S. & Wimmers, K. rePROBE: Workflow for Revised Probe Assignment and Updated Probe-set Annotation in Microarrays. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, (2021).
- Oster, M., Reyer, H., Gerlinger, C., Trakooljul, N., Siengdee, P., Keiler, J., Ponsuksili, S., Wolf, P. & Wimmers, K. mRNA Profiles of Porcine Parathyroid Glands Following Variable Phosphorus Supplies throughout Fetal and Postnatal Life. *Biomedicines* 9, 454, (2021).

- Oster, M., Reyer, H., Keiler, J., Ball, E., Mulvenna, C., Ponsuksili, S. & Wimmers, K. Comfrey (*Symphytum* spp.) as a feed supplement in pig nutrition contributes to regional resource cycles. *Science of The Total Environment* 796, 148988, (2021).
- Reyer, H., Sjöberg, P. J. R., Oster, M., Wubuli, A., Murani, E., Ponsuksili, S., Wolf, P. & Wimmers, K. Mineral Phosphorus Supply in Piglets Impacts the Microbial Composition and Phytate Utilization in the Large Intestine. *Microorganisms* 9, 1197, (2021)
- Rosemarin, A. *et al.* Phosphorus flows, surpluses and N/P agronomic balancing when using manure from pig and poultry farms. *Agronomy*, (geplant 2021).
- Rosemarin, A. *et al.* Phosphorus reuse options and strategies in pig and poultry farming. *Frontiers in Sustainability*, (geplant 2021).
- Sckokai, P., Rosemarin, A. *et al.* Sustainable management of phosphorus flows in EU pig and poultry farms: Testing various policy scenarios using a bioeconomic model. *Frontiers in Sustainability*, (geplant 2021).
- Ball, E. *et al.* Investigating the use of alternative sustainable diets and varying phytase dose on the performance, bone health and nutrient digestibility of broilers. *Poultry Science*, (eingereicht 2021).