

**Eine Meta-Analyse über den quantitativen
Mengelementstoffwechsel bei Pferden und Ponys**

von Isabelle Maria Maier

**Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der
Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

**Eine Meta-Analyse über den quantitativen
Mengeelementstoffwechsel bei Pferden und Ponys**

von Isabelle Maria Maier
aus Karlsruhe

München 2025

**Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der
Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik

Arbeit angefertigt unter der Leitung von
Univ.-Prof. Dr. Ellen Kienzle

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatterin: Univ.-Prof. Dr. Ellen Kienzle

Korreferent: Prof. Dr. Florian M. Trefz

Tag der Promotion: 26. Juli 2025

Meinen Eltern

Die Inhalte der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

- **Maier, I., & Kienzle, E.** A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies. *Animals* 2024; 14(19): 2765. <https://doi.org/10.3390/ani14192765>.
- **Maier, I., & Kienzle, E.** A Meta-Analysis on Quantitative Sodium, Potassium and Chloride Metabolism in Horses and Ponies. *Animals* 2025; 15(2): 191. <https://doi.org/10.3390/ani15020191>.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. SCHRIFTTUM.....	3
2.1. Stoffwechsel der Mengenelemente.....	3
2.1.1. Calcium und Phosphor.....	3
2.1.2. Magnesium	6
2.1.3. Natrium, Kalium und Chlorid.....	7
2.2. Prinzipien der faktoriellen Bedarfskalkulation.....	9
2.2.1. Ermittlung der wahren Verdaulichkeit.....	10
2.2.2. Ermittlung der endogenen Verluste	11
2.2.3. Grenzen der faktoriellen Bedarfskalkulation.....	11
2.2.3.1. Regulation.....	12
2.2.3.2. Verfügbarkeit der Nährstoffe	12
2.3. Bedarfsempfehlungen für Mengenelemente beim Pferd	15
3. PUBLIKATIONEN	20
3.1. A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies	20
3.2. A Meta-Analysis on Quantitative Sodium, Potassium and Chloride Metabolism in Horses and Ponies.....	41
4. DISKUSSION	62
4.1. Kritik der Methodik	62
4.1.1. Modell Meta-Analyse	62
4.1.2. Datenauswahl	62
4.1.3. Metabolisches Körpergewicht als Bezugsgröße.....	63
4.1.4. Einteilung in Pony und Pferd	64
4.2. Diskussion der Ergebnisse.....	65
4.2.1. Unterschiede zwischen Pony und Pferd	65
4.2.2. Einfluss der Mineralstoffquelle	66
4.2.3. Einfluss körperlicher Arbeit	68
5. ZUSAMMENFASSUNG	70
6. SUMMARY	72
7. LITERATURVERZEICHNIS	74
8. TABELLENANHANG.....	92
9. DANKSAGUNG.....	93

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
ANOVA	analysis of variance = Varianzanalyse
B	Blut
BW	body weight = Körpergewicht
bzw.	beziehungsweise
Ca:P-Verhältnis	Calcium-Phosphor-Verhältnis
DBIS	Datenbank-Informationssystem
e	endogene Verluste
et al.	et alii = und andere
F	Futter
GfE	Gesellschaft für Ernährungsphysiologie
ggf.	gegebenenfalls
K	Kot
kg	Kilogramm
KM	Körpermasse
M	Median
MBW	metabolic body weight = metabolisches Körpergewicht
mg	Milligramm
MW	Mittelwert
NRC	National Research Council
OPAC	Online Public Access Catalogue
SD	standard deviation = Standardabweichung
Q ₁	25 % Quartil
Q ₃	75 % Quartil
wV	wahre Verdaulichkeit

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Angaben zum Mengenelementbedarf des Pferdes.

Tabelle 2: Übersicht über die relevanten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit.

1. EINLEITUNG

Die Mengenelemente Calcium, Phosphor, Magnesium, Natrium, Kalium und Chlorid spielen eine wichtige Rolle im Stoffwechsel (STANGL, 2014a). Fehlversorgungen mit den genannten Mineralstoffen können bei Pferden eine Reihe an klinischen Folgen nach sich ziehen (JOHNSON, 1995; HARRIS et al., 2006; ZEYNER et al., 2017), weshalb eine bedarfsgerechte Versorgung anzustreben ist. Der Mengenelementbedarf für Erhaltung des Pferdes wurde zuletzt in einer Meta-Analyse aus dem Jahre 2011 untersucht (KIENZLE & BURGER, 2011).

In der vorliegenden Meta-Analyse sollten die damals angewandten Methoden der Datenanalyse erneut verwendet werden, um weitere Erkenntnisse unter Einbeziehung neuerer Daten zu erlangen. Zusätzlich zu den von Kienzle und Burger (2011) untersuchten Parametern Mineralstoffaufnahme und Ausscheidung über Kot und Harn, welche für die faktorielle Bedarfskalkulation von Bedeutung sind, wurden die Mineralstoffgehalte im Blutserum erfasst sowie die Mineralstoffretention mitberücksichtigt. Die genannten Parameter wurden in verschiedenen Diagrammen gegen die Mineralstoffaufnahme bzw. die scheinbar verdaute Mineralstoffmenge geplottet, um mögliche Einflüsse auf den Mengenelementstoffwechsel sichtbar zu machen.

Eine Fragestellung hierbei war das Vorliegen etwaiger Unterschiede zwischen Ponys und Pferden. In der Vergangenheit wurden Untersuchungen solcher Unterschiede beispielsweise in Bezug auf das Mikrobiom (LWIN & MATSUI, 2014; LANGNER et al., 2020; THEELEN et al., 2021) oder die Verdaulichkeit von Rohnährstoffen (HOFFMANN et al., 1987; CUDDEFORD et al., 1995; VERMOREL et al., 1997; POTTER et al., 2021) durchgeführt, nicht jedoch hinsichtlich des Mineralstoffwechsels. Dies sollte in der aktuellen Meta-Analyse eruiert werden, um wichtige Erkenntnisse hinsichtlich potenzieller Anpassungen der Versorgungsempfehlungen an Mengenelementen von Pferden im Vergleich zu Ponys zu liefern.

Die zweite Fragestellung betraf den Einfluss verschiedener Mineralstoffquellen auf den Mengenelementstoffwechsel von Pferden und Ponys. Es ist bekannt, dass der Ursprung der Mineralstoffe Einfluss auf deren Verfügbarkeit hat (HARRIS et al., 2006). In der vorliegenden Arbeit sollte der Unterschied der Verwendung organischer und anorganischer Mineralstoffquellen hinsichtlich scheinbarer und wahrer Verdaulichkeit, renaler Exkretion, Retention und Serumgehalt überprüft werden. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf Phosphor gelegt werden, da bereits bei Katzen, Hunden, Schweinen und Menschen ein wesentlicher Einfluss der Phosphorquelle auf Verdaulichkeit und

Stoffwechsel nachgewiesen werden konnte (CALVO et al., 2014; LINEVA et al., 2019; DOBENECKER et al., 2021a; DOBENECKER et al., 2021b). Anorganischer Phosphor wird dabei sogar als potenzielles Gesundheitsrisiko eingeschätzt (MACKAY & OLIVER, 1935; SCHNEIDER et al., 1980a; SCHNEIDER et al., 1980b; DI MARCO et al., 2008; ORI et al., 2008; ELLER et al., 2011; SAGE et al., 2011; RITZ et al., 2012; TAKEDA et al., 2017). Insbesondere die Ausscheidung von Phosphor über die Nieren sowie die Phosphorwerte im Serum spielen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle (PASTOOR et al., 1995; SIEDLER & DOBENECKER, 2015; DOBENECKER et al., 2018a; DOBENECKER et al., 2018b; COLTHERD et al., 2019; STEFFEN & DOBENECKER, 2023), weshalb diese nun auch beim Pferd bzw. Pony im Rahmen der vorliegenden Meta-Analyse genauer betrachtet werden sollten. Bei den Mengenelementen Natrium, Kalium und Chlorid wurde von einer genaueren Betrachtung hinsichtlich der Mineralstoffquelle abgesehen, da Grundfuttermittel typischerweise nur geringe Natriumkonzentrationen aufweisen und Natrium und Chlorid in der Tierernährung daher häufig in Form von Salz (NaCl) ergänzt werden (HARRIS et al., 2006; STANGL, 2014a). Die Quelle ist hier also vorwiegend als anorganisch anzunehmen, was auch auf die ausgewählten Studien in der vorliegenden Arbeit zutrif. Umgekehrt verhielt es sich mit Kalium, welches als Mengenelement in Grünfuttermitteln reichlich enthalten ist (TASKER, 1967; HARRIS et al., 2006) und daher in den seltensten Fällen einer Supplementierung über anorganische Komponenten bedarf. Vor diesem Hintergrund erwies sich eine Einteilung nach Mineralstoffquelle für diese Mengenelemente als nicht sinnvoll.

Betrachtet werden sollte aber im Hinblick auf Natrium, Kalium und Chlorid als weitere Fragestellung der Einfluss von körperlicher Arbeit. Obwohl zahlreiche Studien zum Einfluss körperlicher Aktivität und Elektrolytverlusten über den Schweiß beim Pferd im Allgemeinen existieren (LUCKE & HALL, 1980; ROSE et al., 1980; SNOW et al., 1982; MCCUTCHEON et al., 1995; SPOONER et al., 2010; ZEYNER et al., 2014; LINDINGER & WALLER, 2021; LINDINGER, 2022; WALLER & LINDINGER, 2022), wurde in keiner der genannten Untersuchungen die Verdaulichkeit evaluiert. Ein Hauptaugenmerk der vorliegenden Meta-Analyse sollte aber auf etwaigen Unterschieden zwischen arbeitenden und nicht arbeitenden Pferden und Ponys insbesondere bezüglich der scheinbaren und wahren Verdaulichkeit liegen. Daher wurden stattdessen Studien ausgewählt, bei welchen Angaben zur Verdaulichkeit verfügbar waren.

2. SCHRIFTTUM

2.1. Stoffwechsel der Mengenelemente

Mengenelemente zählen neben den Spurenelementen im Organismus zu den Mineralstoffen, welche grundsätzlich als Bau- und Reglerstoffe dienen (STANGL, 2014a). Calcium, Phosphor, Magnesium, Natrium, Kalium, Chlorid und Schwefel stellen dabei die essenziellen Mengenelemente des Körpers dar (STANGL, 2014a; COENEN & MEYER, 2019b). Schwefel und Phosphor kommen überwiegend in gebundener Form vor (STANGL, 2014a), während Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium und Chlorid im Organismus als Ionen vorliegen und in diesem Zuge als Elektrolyte bezeichnet werden können (STANGL, 2014a).

2.1.1. Calcium und Phosphor

Calcium und Phosphor sind im Stoffwechsel des Pferdes unter anderem für die Mineralisation des Knochens, die Impulsweiterleitung, den Energietransfer, die Blutgerinnung und die Induktion hormoneller Regelkreise unentbehrlich (COENEN & MEYER, 2019b). Eine beispielsweise auch bei Hunden bekannte Folge von Calciummangel, insbesondere in Kombination mit Phosphorüberschuss, kann ein nutritiver sekundärer Hyperparathyreoidismus sein, welcher zur sogenannten Osteodystrophia fibrosa generalisata führen kann (BECKER et al., 2012; COENEN & MEYER, 2019b). Ein Calciumüberschuss erhöht bei Pferden das Risiko einer Harnstein- oder, in selteneren Fällen, Darmsteinbildung (COENEN & MEYER, 2019b). Eine Überversorgung mit Phosphor kann bei gleichzeitigem Calciummangel die oben genannte Symptomatik fördern sowie bei simultaner Magnesiumüberversorgung gleichfalls die Bildung von Harn- und seltener von Darmsteinen begünstigen (COENEN & MEYER, 2019b).

Die Absorption von Calcium findet beim Pferd hauptsächlich über aktive Prozesse im Dünndarm (SCHRYVER et al., 1970; CEHAK et al., 2012), jene von Phosphor in Dün- und Dickdarm statt (CEHAK et al., 2012).

Nach Böswald et al. (2018) zeigen sich bei allen Tierarten signifikant positive Beziehungen zwischen Calciumaufnahme und fäkaler Calciumausscheidung. Es gibt aber auch den Calciumstoffwechsel betreffende tierartliche Unterschiede. Große Dickdarmverdauung (Pferde, Elefanten, Nashörner, Tapire) beispielsweise weisen eine unabhängig von der Calciumaufnahme sehr hohe scheinbare Verdaulichkeit (PAGAN,

1998) und niedrige fäkale Calciumausscheidung (BÖSWALD et al., 2018) auf. Vielmehr wird Calcium bei diesen Tierarten in großen Mengen über den Harn ausgeschieden (KIENZLE & ZORN, 2006; STANIK, 2006). Je höher die Calciumaufnahme dabei ist, desto mehr steigt die renale Calciumexkretion bei Equiden an (COENEN & MEYER, 2019b). Die Regulation der Calciumhomöostase erfolgt beim Pferd entsprechend primär über die renale Ausscheidung (KIENZLE & ZORN, 2006).

Bei kleinen Dickdarmverdauern wie Ratten und Kaninchen werden ebenfalls physiologisch große Calciummengen über den Harn ausgeschieden (CHEEKE & AMBERG, 1973; STANIK, 2006). Kaninchen weisen dabei ähnlich des Pferdes auch eine hohe scheinbare Calciumverdaulichkeit auf (CLAUSS et al., 2012).

Beim Menschen wird davon ausgegangen, dass diese in der Lage sind, die Absorption von Calcium über den Darm je nach Calciumgehalt in der Nahrung regulieren zu können (BRONNER, 2003).

Karnivoren wiederum können, wie bereits von Mack et al. (2015) eruiert, die Calciumaufnahme kaum über den Darm regulieren und zeigen entsprechend auch in der Studie von Böswald et al. (2018) die konstanteste Calciumverdaulichkeit. Die Calciumausscheidung über den Harn ist bei Hunden und Katzen vergleichsweise gering und von der Calciumaufnahme unabhängig (CHEN & NEUMAN, 1955; PAßLACK et al., 2016; zitiert nach BÖSWALD, 2018). Bei Hunden wird viel eher eine Regulation der Calciumhomöostase vorrangig über den Knochen angenommen (SCHMITT, 2018).

Die Calciumkonzentration im Blut wird bei allen Tierarten eng reguliert und möglichst konstant gehalten (HURWITZ, 1996; INOUE et al., 2002; VERVUERT & KIENZLE, 2013; COENEN & MEYER, 2019b).

Für Phosphor konnten Böswald et al. (2018), ebenso wie für Calcium, bei allen Tierarten signifikant positive Beziehungen zwischen Phosphoraufnahme und fäkaler Ausscheidung feststellen. Im Gegensatz zu Calcium wird Phosphor aber bei den großen Dickdarmverdauern zu einem höheren Anteil über den Kot ausgeschieden (BÖSWALD et al., 2018), während die renale Phosphorexkretion bei Equiden gering ist (TORIBIO, 2007).

Das unterscheidet die genannte Spezies beispielsweise von Katzen, welche die Phosphorausscheidung überwiegend über die Niere zu regulieren scheinen (PAßLACK et al., 2016).

Bekanntermaßen großen Einfluss auf den Phosphorstoffwechsel von Menschen, Hunden und Katzen hat die eingesetzte Phosphorquelle (CALVO et al., 2014; SIEDLER &

DOBENECKER, 2015; DOBENECKER et al., 2021a; DOBENECKER et al., 2021b; STEFFEN & DOBENECKER, 2023). Unterschieden werden hierbei in der vorliegenden Studie organische und anorganische Herkunft des Minerals. Hiermit ist nicht die chemische Definition gemeint, nach welcher sich die organische Chemie mit Kohlenwasserstoffen und ihren Derivaten und die anorganische Chemie unter Ausnahmen mit allen Elementen exklusive Kohlenstoff befasst (MORTIMER & MÜLLER, 2010). Sondern „organisch“ soll nach der hier vorgenommenen Einteilung eine Herkunft des jeweiligen Mineralstoffes aus dem Grundfutter bedeuten. Im Gegensatz dazu entspricht „anorganisch“ in der vorliegenden Arbeit den von außen zugesetzten, nicht über die Nahrungskomponenten zugeführten Mineralstoffe. Näheres zu den typischerweise eingesetzten Phosphorquellen ist im Abschnitt 2.2.3.2. „Verfügbarkeit der Nährstoffe“ zu finden.

Bei Hunden konnte gezeigt werden, dass anorganische Phosphate eine höhere scheinbare Verdaulichkeit im Vergleich zu Phosphaten aus organischen Quellen aufweisen (DOBENECKER et al., 2021b). Dies lässt sich damit erklären, dass organische Phosphate in der Regel beispielsweise an Phytat, Protein oder schlecht wasserlösliche Moleküle gebunden und dadurch ohne vorherigen Aufschluss für Karnivoren nicht verwertbar sind (DOBENECKER et al., 2021a), wohingegen viele anorganische Phosphate sehr gut löslich sind (LINEVA et al., 2019). Auch beim Menschen ist dieses Phänomen bekannt, bei welchem organische Phosphate zu 40 bis 60 % absorbiert werden, während anorganische Phosphorquellen eine Verfügbarkeit von 90 bis 100 % besitzen (URIBARRI & CALVO, 2003; zitiert nach DOBENECKER et al., 2021a). Bei der Katze ist ein etwaiger Unterschied in der Verdaulichkeit verschiedener Phosphorquellen nicht so eindeutig. So konnten Coltherd et al. (2019) keinen Effekt der Phosphorquelle auf die Verdaulichkeit bei der Katze feststellen. Eine höhere scheinbare Verdaulichkeit anorganischen Phosphats im Gegensatz zu organischen Quellen wurde in anderen Studien bei Katzen aber durchaus beobachtet (FINCO et al., 1989; DOBENECKER et al., 2018b; zitiert nach LAFLAMME et al., 2020). Auf den Phosphorserumspiegel sowie die renale Phosphorausscheidung bei den genannten Spezies hat die eingesetzte Quelle des Phosphors ebenfalls Einfluss. So führt der Einsatz anorganischer Phosphate im Futter bei Hunden zu signifikanten Anstiegen von Phosphor in Serum und Harn (DOBENECKER et al., 2021a; DOBENECKER et al., 2021b). Zum stärksten Anstieg zwei Stunden postprandial führte hierbei der Einsatz gut löslicher anorganischer Phosphorquellen (DOBENECKER et al., 2021a). Laflamme et al. (2020) fassen zusammen, dass ein

postprandialer Phosphoranstieg im Serum bei Katzen ebenfalls vorwiegend bei Verwendung gut löslicher anorganischer Phosphatquellen vorkommt und nicht, wenn zwar anorganische, aber nicht gut lösliche Phosphate verwendet werden. Der gleiche Effekt konnte bei Katzen bezüglich der Phosphorausscheidung über den Harn beobachtet werden: Phosphor aus gut wasserlöslichen Quellen wird zu einem größeren Teil über den Harn ausgeschieden, als anorganischer Phosphor weniger löslichen Ursprungs (DOBENECKER et al., 2018a).

Für Equiden ist die Studienlage zu diesem Thema bislang dünn. Der Phosphormetabolismus in Pferden und Ponys hinsichtlich Aufnahme, fäkaler und renaler Ausscheidung sowie Serumgehalt wurde zwar durchaus bereits von einigen Studien untersucht (SCHRYVER et al., 1971; HINTZ & SCHRYVER, 1972a; ARGENZIO et al., 1974; VAN DOORN et al., 2004a; VAN DOORN et al., 2004b; VAN DOORN et al., 2011; VAN DOORN et al., 2014), jedoch selten hinsichtlich der direkten Fragestellung, welchen Einfluss die Phosphorquellen auf Gehalte in Serum und Harn haben. In der Studie von Saastamoinen et al. (2020) wurde die Ausscheidung löslicher anorganischer Phosphatquellen über den Kot bei Pferden untersucht, aber im Hinblick auf deren Einfluss auf die Umwelt. Genauso in der Studie von Westendorf und Williams (2015), in der das Hauptaugenmerk auf der Löslichkeit von Phosphor in Pferdemist und in weiterer Folge im Boden liegt.

2.1.2. Magnesium

Magnesium dient bei allen Tierarten als Cofaktor zahlreicher Enzyme im Organismus (STANGL, 2014a) und ist in diesem Zuge bei Equiden hauptsächlich für die Funktion des Nerven- und Muskelgewebes, aber auch für die Mineralisation des Knochens wichtig (COENEN & MEYER, 2019b). Folgen eines Magnesiummangels in Form von Muskelzittern, Muskelkrämpfen oder gar ausgeprägten Tetanien (COENEN & MEYER, 2019b) sind bei gesunden Pferden unwahrscheinlich (HARRIS et al., 2006) und im Gegensatz zu Rindern selten (STEWART, 2015). Ein Überschuss an Magnesium führt erst bei starker Überversorgung und in Kombination mit einem Phosphorüberschuss bei Pferden zu Risiken wie der Bildung von Harnsteinen, seltener Darmsteinen (COENEN & MEYER, 2019b). Bei exzessiver Aufnahme an Sulfaten ist deren abführende Wirkung zu beachten (HARRIS et al., 2006).

Absorbiert wird Magnesium bei monogastrischen Tierarten sowohl passiv im Dünndarm als auch aktiv im Dickdarm (WOLFFRAM, 2022). Bei Equiden erfolgt der quantitativ

größte Teil der Magnesiumabsorption im Dünndarm (KAPUSNIAK et al., 1988; STEWART, 2015), während nur noch ein kleiner Teil im Dickdarm absorbiert wird (HINTZ & SCHRYVER, 1972b; STEWART, 2015). Die scheinbare Verdaulichkeit von Magnesium liegt bei Hund, Katze, Schwein und Maus etwa bei 20 bis 30 % (ENTRINGER et al., 1975; MEYER et al., 1999; BURMEIER, 2017; BÖSWALD et al., 2023). Pferde haben nach Clauss et al. (2007; 2009) eine ähnliche scheinbare Magnesiumverdaulichkeit von 35 %, während sich bei Tapiren und Spitzmaulnashörnern mit etwa 60 bis 70 % eine höhere scheinbare Verdaulichkeit des Magnesiums zeigt. Die Magnesiumaufnahme hat starken Einfluss auf die Magnesiumausscheidung über Kot und Harn (STEWART, 2015).

Magnesiummangel sowie Überversorgung führen im Regelfall zu entsprechend verminderten bzw. erhöhten Magnesiumkonzentrationen im Serum, weshalb der Magnesiumserumspiegel zur Abschätzung der Versorgungslage mit diesem Element genutzt werden kann (VERVUERT & KIENZLE, 2013).

2.1.3. Natrium, Kalium und Chlorid

Die Elektrolyte Natrium und Chlorid sind für die Aufrechterhaltung des osmotischen Drucks sowie für die Regulation des Säure-Basen- und Wasserhaushalts des Pferdes unabdingbar (COENEN & MEYER, 2019b). Bei der Bildung der Membranpotenziale an elektrisch erregbaren Zellen spielen Natrium und Kalium eine entscheidende Rolle und tragen somit wesentlich zur Funktion von Nerven- und Muskelzellen bei (STANGL, 2014a). Des Weiteren sind die genannten Elektrolyte essenziell für interzelluläre Transportvorgänge (STANGL, 2014a; COENEN & MEYER, 2019b) und werden bei allen Tierarten für weitere Aufgaben benötigt, wie beispielsweise Natrium für die Funktion der Schilddrüse sowie die Regulation des Blutdrucks und Chlorid als Bestandteil der Magensäure (STANGL, 2014a; COENEN & MEYER, 2019b).

Ein Mangel an Natrium kann bei Equiden Lecksucht hervorrufen sowie das zentrale Nervensystem inklusive der Entstehung von Anfällen betreffen (LINDNER, 1983; JAMIESON, 1985). Bei einer Unterversorgung mit Chlorid wurde die Entstehung einer metabolischen Alkalose bei Pferden postuliert, es zeigt sich aber häufig nur eine schwach ausgeprägte klinische Symptomatik (COENEN & MEYER, 2019b). Muskelschwäche und Paralyse können durch einen Kaliummangel verursacht sein (BROBST, 1986), welcher unter Praxisbedingungen beim gesunden Pferd nicht zu erwarten ist (HARRIS et al., 2006; COENEN & MEYER, 2019b). Da beim Einweichen von Heu Kalium

ausgeschwemmt wird (MACK et al., 2014; BOCHNIA et al., 2021; GLATTER et al., 2021), könnte diese Praktik allerdings zu einem etwaigen Kaliummangel bei Pferden und Ponys beitragen. Eine Überversorgung mit den genannten Elektrolyten gilt bei ausreichender Wasserversorgung in der Regel als unbedenklich, während die Ausscheidung über die Niere zunimmt (COENEN & MEYER, 2019b). Exzessive Natriumaufnahme kann bei Equiden allerdings durchaus mit metabolischer Azidose, Flüssigkeitseinlagerungen im Gewebe sowie Magengeschwüren einhergehen (HOLBROOK et al., 2005; ZEYNER et al., 2017) und deutliche Kaliumüberschüsse können bei Equiden zu Störungen der Herzfunktion führen (SCHWARZWALD, 2013). Die Absorption von Kalium und Chlorid erfolgt bei allen Tierarten im Dünndarm überwiegend passiv (WOLFFRAM, 2022), während Natrium hauptsächlich sekundär aktiv durch Na^+ -Cotransportsysteme, beispielsweise mit Glucose, resorbiert wird (DYER et al., 2009; WOLFFRAM, 2022). Natrium und Chlorid werden bei Equiden im Dickdarm zudem aktiv transportiert (GIDDINGS et al., 1974; CLARKE et al., 1992; zitiert nach CEHAK et al., 2009).

Natrium-, Kalium- und Chlorid-Verluste über den Schweiß spielen beim Pferd eine entscheidende Rolle, da die dortigen Konzentrationen an Natrium, Kalium und Chlorid im Vergleich zu jenen an Calcium, Phosphor und Magnesium relativ hoch sind (HARRIS et al., 2006; GFE, 2014). Die scheinbare Verdaulichkeit von Chlorid liegt sowohl bei Menschen, Hunden und Katzen mit 94 bis 99 % als auch bei Equiden (94 bis 96 %) in einem sehr hohen Bereich (HAZELL, 1985; MEYER et al., 1999; STÜRMER, 2005; NEUSTÄDTER, 2015; BURMEIER, 2017). Im Hinblick auf die Natriumverdaulichkeit erscheinen wiederum interessante tierartliche Unterschiede. So zeigt sich mit 71 bis 98 % eine relativ hohe scheinbare Verdaulichkeit von Natrium beispielsweise bei Mäusen, Schweinen, Katzen und Hunden (ENTRINGER et al., 1975; MEYER et al., 1999; BURMEIER, 2017; BÖSWALD et al., 2023), aber auch bei Kaninchen (HAGEN et al., 2015). Bei Pferden und anderen großen Dickdarmverdauern wie Tapiren und insbesondere Spitzmaulnashörnern liegt die scheinbare Natriumverdaulichkeit mit bis zu 56 % deutlich niedriger (CLAUSS et al., 2007; CLAUSS et al., 2009). Ebenfalls als relativ niedrig erweist sich die scheinbare Verdaulichkeit von Kalium bei Tapiren und Spitzmaulnashörnern mit etwa 59 bis 67 % (CLAUSS et al., 2007; CLAUSS et al., 2009). Bei Equiden liegt diese mit etwa 78 % etwas höher (CLAUSS et al., 2007; CLAUSS et al., 2009), eher vergleichbar mit jener, die bei Schweinen, Mäusen, Katzen und Hunden

(74 bis 95 %) festgestellt werden kann (ENTRINGER et al., 1975; MEYER et al., 1999; BURMEIER, 2017; BÖSWALD et al., 2023).

Sofern keine chronische Erkrankung vorliegt, welche mit Störungen des Wasser- oder Elektrolythaushalts einhergeht, wird die relative Menge an Natrium und Chlorid im Blut unabhängig von der Aufnahme bei allen Tierarten sowie beim Menschen durch Veränderung des extrazellulären Volumens konstant gehalten (GÄBEL, 2022; EBERSPÄCHER-SCHWEDA, 2023). Eine über die Nahrung zugeführte Überversorgung oder ein Mangel mit den genannten Elektrolyten können entsprechend durch die Regulation des Blutvolumens nicht im Blut entdeckt werden (VERVUERT & KIENZLE, 2013). Im Gegensatz dazu kann sich ein Mangel an Kalium durchaus in vom Referenzbereich abweichenden Blutwerten widerspiegeln (VERVUERT & KIENZLE, 2013).

2.2. Prinzipien der faktoriellen Bedarfskalkulation

Die faktorielle Bedarfskalkulation stellt den aktuellen Goldstandard der Ermittlung des täglichen Bedarfs der meisten Mengenelemente in der Tierernährung dar (DOBENECKER & VERVUERT, 2024). Hierbei wird von einem Nettobedarf ausgegangen, welcher sich aus dem Bedarf für Erhaltung und dem Bedarf für Leistung zusammensetzt (STANGL, 2014a). Der Bedarf für Erhaltung berücksichtigt dabei die unvermeidbaren endogenen Verluste, also jenen Teil an Mengenelementen, welcher auch bei bedarfsgerechter Versorgung und Futtermengenaufnahme obligatorisch verloren geht, beispielsweise über Kot, Harn oder Haut (DOBENECKER & VERVUERT, 2024). Sofern sich der Körper nicht im Ruhestoffwechsel befindet, sondern beispielsweise im Wachstum oder unter körperlicher Belastung, steigt der Bedarf an bestimmten Nährstoffen an (GFE, 2014). Gleiches gilt im Rahmen der Reproduktion für den Mehrbedarf in der Trächtigkeit sowie beispielsweise für die Milchbildung in der Laktation (GFE, 2014). Die Menge an Nährstoffen, die für all diese Situationen zusätzlich benötigt wird, wird im Bedarf für Leistung berücksichtigt (STANGL, 2014a). Es werden also die zum Ausgleich von Verlusten benötigte Nährstoffmenge sowie die Nährstoffmenge, die für Leistung (beispielsweise Wachstum oder Milchproduktion) benötigt wird, addiert (KIENZLE, 1998). Eine große Rolle bei körperlicher Arbeit spielt die Schweißproduktion. Insbesondere die Mineralstoffe Natrium, Kalium und Chlorid

werden bei Equiden in bedeutenden Mengen über den Schweiß verloren und auch diese Verluste werden bei der Bedarfsberechnung für Leistung mitberücksichtigt (GFE, 2014). Der Nettobedarf reicht allein aber noch nicht zur Herausgabe einer Versorgungsempfehlung aus. Um den dafür geeigneten Bruttobedarf errechnen zu können, muss die Verfügbarkeit bzw. die Verwertung des jeweiligen Nährstoffs mit einbezogen werden (KIENZLE, 1998). Hierfür spielen beispielsweise die Absorption im Darm, die Verfügbarkeit für den Intermediärstoffwechsel des Tieres und die Effizienz der Umwandlung in das Endprodukt eine Rolle (KIENZLE, 1998). Für Mineralstoffe stellt die Absorption aus dem Magen-Darm-Trakt den limitierenden Faktor dar, von welchem die Verfügbarkeit maßgeblich abhängt, weshalb bei Mineralstoffen die Verfügbarkeit häufig mit der wahren Verdaulichkeit gleichgesetzt wird (KIENZLE & ZORN, 2006). Wird der Nettobedarf durch die Verfügbarkeit geteilt und mit 100 multipliziert, kann der Bruttobedarf errechnet werden (KIENZLE, 1998):

$$\text{Bruttobedarf} = \frac{\text{Nettobedarf}}{\text{Verfügbarkeit [\%]}} * 100$$

Dabei handelt es sich um Schätzgrößen, weshalb bei der Bedarfsempfehlung Sicherheitsspannen unterschiedlicher Breite mitberücksichtigt werden (BÖSWALD et al., 2019).

2.2.1. Ermittlung der wahren Verdaulichkeit

Die wahre Verdaulichkeit stellt den Anteil eines Nährstoffs dar, welcher nicht mit dem Kot wieder ausgeschieden wird, also entsprechend im Körper verbleibt, und bezieht dabei im Gegensatz zur scheinbaren Verdaulichkeit die körpereigenen endogenen Verluste mit ein (EDER et al., 2024). Dies bezeichnet jenen Anteil, welcher auch bei fehlender Aufnahme trotzdem über den Kot ausgeschieden werden würde. Verschiedene Nährstoffe werden unterschiedlich stark endogen verloren und so ergibt sich je nach Nährstoff ein größerer oder kleinerer Unterschied zwischen scheinbarer und wahrer Verdaulichkeit (STANGL, 2014b). Bei den Mengenelementen bestehen beispielsweise große Unterschiede, da teilweise hohe Mengen an Mineralstoffen mit dem Kot ausgeschieden werden (STANGL, 2014b).

Die wahre Verdaulichkeit lässt sich wie folgt errechnen (EDER et al., 2024):

$$\text{wV (\%)} = \frac{F - (K - e)}{F} * 100$$

2.2.2. Ermittlung der endogenen Verluste

Die endogenen Verluste, welche wie oben beschrieben für die Berechnung der wahren Verdaulichkeit benötigt werden, können grundsätzlich mittels verschiedener Methoden berechnet werden.

Erstens können die endogenen Verluste im praktischen Tierversuch bestimmt werden. Dabei wird eine Ration ohne den betreffenden Nährstoff gefüttert (EDER et al., 2024). Durch Messung des Nährstoffgehalts beispielsweise im Kot kann dessen Menge im genannten Ausscheidungsprodukt als endogener Verlust angenommen werden.

Die zweite Möglichkeit stellt die Isotopenverdünnungsmethode dar (EDER et al., 2024). Hierbei wird einem Tier ein Isotop verabreicht und anschließend bei isotopfreier Fütterung dessen Konzentration in Blutserum und Kot gemessen (STANGL, 2014b). Wenn nun die Isotopenkonzentration im Blut der Isotopenkonzentration im Kot gleichgesetzt wird, können mittels folgender Gleichgewichtsbeziehung die endogenen Verluste eruiert werden (STANGL, 2014b):

$$\begin{aligned} & \text{Elementmenge (K)} * \text{Isotopenkonzentration (K)} \\ & = \text{endogene Ausscheidungsmenge} * \text{Isotopenkonzentration (B)} \end{aligned}$$

Drittens kann als bevorzugte Methode die Kalkulation der endogenen Verluste mittels tierartspezifischer Regressionsgleichungen erfolgen (EDER et al., 2024). Dabei wird die Mineralstoffaufnahme gegen die fäkale Mineralstoffausscheidung geplottet. Sofern die Datenpunkte eine lineare Beziehung darstellen, kann durch Erstellen einer Regressionsgeraden die Aufnahme des Mineralstoffs auf null extrapoliert werden. Die endogenen Verluste entsprechen dann dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse.

2.2.3. Grenzen der faktoriellen Bedarfskalkulation

Um den Nährstoffbedarf errechnen zu können, müssen bei der faktoriellen Bedarfskalkulation wie oben beschrieben Verluste und Zuwächse für bestimmte Situationen, wie Erhaltung plus beispielsweise Milchproduktion, geschätzt werden können. Dies ist nur für Nährstoffe geeignet, bei welchen eine solche Schätzung leicht möglich ist, wie bei Energie, Protein, Mengen- und einigen Spurenelementen (KIENZLE, 1998). Für die meisten Spurenelemente und Vitamine ist die Methode allerdings nicht gut geeignet (KIENZLE, 1998). Des Weiteren ergeben sich auch bei den Nährstoffen, bei welchen die faktorielle Bedarfskalkulation anwendbar ist, Grenzen durch beispielsweise

Regulation des Stoffwechsels oder etwaig ungenaue Schätzungen der Verwertung (KIENZLE, 1998). Denn insbesondere bei der genannten Methode, bei welcher die Verfügbarkeit den Nenner des Bruchs beschreibt, können bereits kleine Änderungen in der geschätzten Verfügbarkeit die Fütterungsempfehlungen gravierend verändern (BÖSWALD et al., 2019). Zudem wurde in der Vergangenheit beispielsweise hinsichtlich der Berechnung des Proteinbedarfs bei wachsenden Schweinen kritisiert, dass der jeweilige Bedarf für Erhaltung und Wachstum durch Interaktionen im Körper nicht genau voneinander getrennt werden kann (VAN MILGEN & NOBLET, 1999).

2.2.3.1. Regulation

Eine weitere Grenze der faktoriellen Bedarfskalkulation stellen regulative Prozesse des Körpers dar. So ist beispielsweise bekannt, dass eine niedrige Natrium- und Kaliumaufnahme bei Pferden zu verringerten endogenen Verlusten führt (HARRIS et al., 2006). Erfolgt die oben genannte Extrapolation zur Ermittlung der endogenen Verluste mittels Regressionsgeraden also zum Zeitpunkt eines Nährstoffmangels, kann dies zu einer Unterschätzung der endogenen Verluste und infolgedessen zu einem nicht korrekt berechneten Bedarf führen. Auch Faktoren wie die Wasseraufnahme, welche beispielsweise den Natriumhaushalt beeinflusst (GÄBEL, 2022) und Erkrankungen wie beispielsweise PPID bei Pferden und Ponys (ELLIOTT, 2010) bzw. Hyperadrenokortizismus bei anderen Tierarten (CAYZER & JONES, 1993; BAILEY et al., 2009) können durch hormonelle Einflüsse auf den Stoffwechsel zu Ungenauigkeiten im faktoriell errechneten Bedarf führen. Grundsätzlich sind sehr viele Prozesse im Körper miteinander verwoben und bedingen sich in solch komplizierter Kaskade gegenseitig, dass nicht alle Eventualitäten dieser Prozesse nachvollzogen werden können. Die Rückabsorption von Magnesium wird zum Beispiel durch Hyperglykämie, Hyperkalzämie, Hyperkalziurie, Hypokaliämie, Hypophosphatämie, tubulärer Azidose, metabolischer Azidose oder osmotischer Diurese beeinflusst (TORIBIO, 2010; zitiert nach STEWART, 2015).

2.2.3.2. Verfügbarkeit der Nährstoffe

Die Verfügbarkeit beschreibt, wie schnell und in welchem Umfang ein Nährstoff in den systemischen Kreislauf gelangt und an den Zielgeweben verfügbar ist (KIENZLE & ZORN, 2006). Wie oben erwähnt, hat diese großen Einfluss auf den berechneten Nährstoffbedarf (BÖSWALD et al., 2019). Es gibt verschiedene Faktoren, welche die

Bioverfügbarkeit von Nährstoffen beeinflussen. Einige (Spezies, Alter, Gesundheits- und Ernährungszustand) betreffen das Tier selbst (KIENZLE & ZORN, 2006). Andere betreffen die Fütterung, beispielsweise durch Interaktionen zwischen verschiedenen Mineralstoffen oder durch die Zufuhr von Stoffen, welche die Absorption entweder begünstigen oder beeinträchtigen können (KIENZLE & ZORN, 2006). So beeinflusst beispielsweise das Ca:P Verhältnis die Calcium- und Phosphorabsorption, wobei Pferde vorwiegend hinsichtlich der Calciumabsorption gegenüber einem engen Ca:P Verhältnis empfindlicher sind als gegenüber einem Weiten (SCHRYVER et al., 1971; VAN DOORN et al., 2004a; KIENZLE & ZORN, 2006; SCHWARZ, 2014). An Phytat gebundener Phosphor gilt bei Monogastriern grundsätzlich als schlecht verfügbar (WOLFFRAM, 2022). Bei Pferden kann der phytatgebundene Phosphor vergleichsweise gut verstoffwechselt werden (KIENZLE & ZORN, 2006), während die Absorption von Calcium davon aber beeinträchtigt werden kann (VAN DOORN et al., 2004a). Ebenfalls senkend auf die Calciumverfügbarkeit bei Pferden wirkt dessen Bindung an Oxalat (SWARTZMAN et al., 1978; BLANEY et al., 1981; KIENZLE & ZORN, 2006). Die Verfügbarkeit von Magnesium wird bei Pferden beispielsweise durch einen hohen Raufaseranteil im Futter verbessert (KIENZLE & ZORN, 2006) und durch eine hohe Fettmenge verringert (ZEYNER, 2002; zitiert nach KIENZLE & ZORN, 2006). Auch der Ursprung der Mineralstoffe hat Einfluss auf deren Verfügbarkeit (HARRIS et al., 2006). Als Calciumquellen in der Ernährung dienen hauptsächlich die Folgenden:

1. Calciumsalz der Kohlensäure
 - Calciumcarbonat (CaCO_3)
2. Calciumsalz der Salzsäure
 - Calciumchlorid (CaCl_2)
3. Calciumsalz der Citronensäure
 - Calciumcitrat ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$)
4. Calciumsalz der Schwefelsäure
 - Calciumsulfat (CaSO_4)
5. Calciumsalz der Gluconsäure
 - Calciumgluconat ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{CaO}_{14}$)

Calciumcarbonat ist eine in Wasser nahezu unlösliche Substanz (SEIDELL, 1928), genauso wie Calciumsulfat. Alle anderen genannten Calciumquellen sind gut in Wasser löslich (SEIDELL, 1928). Schryver (1975) postulierte eine Verfügbarkeit von Calcium für Pferde aus nahezu allen Futterkomponenten, was auch Kienzle und Zorn (2006) in

ihrer Veröffentlichung zur Bioverfügbarkeit von Mineralien des Pferdes entsprechend zitierten. Hinsichtlich der Calciumverfügbarkeit bei Pferden spielen nach aktueller Studienlage vielmehr die oben genannten Faktoren eine Rolle.

Hauptsächlich in der Ernährung als anorganische Phosphate eingesetzt werden beispielsweise folgende Salze der (Ortho-) Phosphorsäure (H_3PO_4) (MORTIMER & MÜLLER, 2010):

1. Dihydrogenphosphate (primäre Phosphate)
 - Natriumdihydrogenphosphat (NaH_2PO_4)
 - Calciumdihydrogenphosphat: ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)
2. Hydrogenphosphate (sekundäre Phosphate)
 - Natriumhydrogenphosphat (Na_2HPO_4)
 - Calciumhydrogenphosphat: (CaHPO_4)

Alle Genannten sind gut löslich in Wasser (SEIDELL, 1928). Eine Ausnahme stellt Calciumhydrogenphosphat (CaHPO_4) dar, auch bekannt als Dicalciumphosphat, welches schlecht wasserlöslich ist (SEIDELL, 1928). Bislang wird bei Pferden grundsätzlich eine hohe Bioverfügbarkeit von Phosphor aus Knochenmehl, Dicalciumphosphat und Monocalciumphosphat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) angenommen (HINTZ & SCHRYVER, 1972a). Näheres zum Einfluss der Quelle auf den Phosphorstoffwechsel wird im obigen Kapitel 2.1.1. „Calcium und Phosphor“ erläutert.

Die Magnesiumzufuhr kann sowohl aus dem Grundfutter, folglich aus organischer Quelle, als auch mittels zugesetzter Magnesiumsupplemente erfolgen. Die meisten natürlichen Mischfuttermittel guter Qualität sind ausreichend, um den Magnesiumbedarf der meisten Pferde zu decken (HARRIS et al., 2006). Die Verfügbarkeit von Magnesium aus Pflanzen ist grundsätzlich hoch (WILKINSON et al., 1990). Allerdings haben die klimatischen Verhältnisse erheblichen Einfluss auf die in Pflanzen enthaltene Magnesiumkonzentration. Je höher die Temperatur, bei welcher die Pflanzen aufwuchsen, desto höher ist deren Magnesiumgehalt (GRUNES & WELCH, 1989). Daraus lässt sich auch ableiten, dass die Verfügbarkeit des in Pflanzen enthaltenen Magnesiums für Pferde und Ponys insbesondere in der kühlen Jahreszeit niedrig ist (GRUNES & WELCH, 1989). Zusätze zur ausreichenden Magnesiumversorgung, welche in der Ernährung Verwendung finden, sind beispielsweise folgende:

1. Oxid des Magnesiums
 - Magnesiumoxid (MgO)

2. Magnesiumsalz der Schwefelsäure
 - Magnesiumsulfat (MgSO_4)
3. Magnesiumsalz der Salzsäure
 - Magnesiumchlorid (MgCl_2)
4. Magnesiumsalz der Kohlensäure
 - Magnesiumcarbonat (MgCO_3)
5. Magnesiumsalz der Citronensäure
 - Magnesiumhydrogencitrat ($\text{C}_6\text{H}_6\text{MgO}_7$)

Alle genannten Komponenten mit Ausnahme von Magnesiumoxid und Magnesiumcarbonat sind gut löslich in Wasser (SEIDELL, 1928). Trotz der nahezu wasserunlöslichen Eigenschaften von Magnesiumoxid gilt diese Quelle als für Pferde gut verfügbar (HARRINGTON & WALSH, 1980). Es sind sowohl höhere Absorptionen von Magnesium aus organischen Quellen im Vergleich zu Anorganischen beschrieben (HARRIS et al., 2006), als auch gegensätzlich dazu höhere Absorptionsraten von zugesetztem Magnesium (Magnesiumoxid, Magnesiumsulfat oder Magnesiumcarbonat), im Vergleich zu jenem organischer Herkunft (STEWART, 2015).

2.3. Bedarfsempfehlungen für Mengenelemente beim Pferd

Insbesondere innerhalb der letzten beiden Jahrzehnte haben sich die Bedarfsempfehlungen für Mengenelemente beim Pferd verändert, wie untenstehender Tabelle zu entnehmen ist. Die Angaben beziehen sich auf ein Durchschnittsgewicht von 600 kg KM, welches auch für die Umrechnung in die Einheit mg/kg MBW verwendet wurde.

Tabelle 1: Übersicht über die Angaben zum Mengenelementbedarf des Pferdes

Calcium				
Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	19,9	164	-	-

NRC (2007)	24	198	Leicht: 36 Mittel: 42 Schwer: 48	Leicht: 297 Mittel: 346 Schwer: 396
GfE (1994)	30	247	Leicht: 31 Mittel: 32 Schwer: 34	Leicht: 256 Mittel: 264 Schwer: 280
GfE (1982)	25	206	Leicht: 26 Mittel: 26 Schwer: 27	Leicht: 214 Mittel: 214 Schwer: 223

Phosphor

Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	13,7	113	-	-
NRC (2007)	16,8	139	Leicht: 21,6 Mittel: 25,2 Schwer: 34,8	Leicht: 178 Mittel: 208 Schwer: 287
GfE (1994)	18	148	Leicht: 18 Mittel: 18 Schwer: 19	Leicht: 148 Mittel: 148 Schwer: 157
GfE (1982)	15	124	Leicht: 16 Mittel: 16 Schwer: 17	Leicht: 132 Mittel: 132 Schwer: 140

Magnesium

Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	6,5	53	-	-

SCHRIFTTUM

NRC (2007)	9	74	Leicht: 11,4 Mittel: 13,8 Schwer: 18	Leicht: 94 Mittel: 114 Schwer: 148
GfE (1994)	12	99	Leicht: 13 Mittel: 13 Schwer: 15	Leicht: 107 Mittel: 107 Schwer: 124
GfE (1982)	12	99	Leicht: 13 Mittel: 13 Schwer: 14	Leicht: 107 Mittel: 107 Schwer: 115
Natrium				
Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	3,3	27	Leicht: 7,3 Mittel: 14,3 Schwer: 25,3	Leicht: 60 Mittel: 118 Schwer: 209
NRC (2007)	12	99	Leicht: 16,7 Mittel: 21,3 Schwer: 30,6	Leicht: 138 Mittel: 176 Schwer: 252
GfE (1994)	12	99	Leicht: 27 Mittel: 57 Schwer: 113	Leicht: 223 Mittel: 470 Schwer: 932
GfE (1982)	15	124	Leicht: 21 Mittel: 28 Schwer: 36	Leicht: 173 Mittel: 231 Schwer: 297

Kalium				
Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	16,8	139	Leicht: 18,8 Mittel: 21,8 Schwer: 26,8	Leicht: 155 Mittel: 180 Schwer: 221
NRC (2007)	30	247	Leicht: 34,2 Mittel: 38,4 Schwer: 46,8	Leicht: 282 Mittel: 317 Schwer: 386
GfE (1994)	30	247	Leicht: 39 Mittel: 48 Schwer: 72	Leicht: 322 Mittel: 396 Schwer: 594
GfE (1982)	22	181	Leicht: 32 Mittel: 43 Schwer: 53	Leicht: 264 Mittel: 355 Schwer: 437
Chlorid				
Quelle	Bedarf für Erhaltung in g/Tag	Erhaltungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW	Bedarf für körperliche Arbeit in g/Tag	Leistungs- bedarf umgerechnet in mg/kg MBW
GfE (2014)	1,8	15	Leicht: 7,8 Mittel: 18,8 Schwer: 34,8	Leicht: 64 Mittel: 155 Schwer: 287
NRC (2007)	48	396	Leicht: 56 Mittel: 63,9 Schwer: 79,8	Leicht: 462 Mittel: 527 Schwer: 658

SCHRIFTTUM

GfE (1994)	48	396	Leicht: 73 Mittel: 98 Schwer: 164	Leicht: 602 Mittel: 808 Schwer: 1353
GfE (1982)	-	-	-	-

3. PUBLIKATIONEN

3.1. A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies



Review

A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies

Isabelle Maier * and Ellen Kienzle

Department of Veterinary Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, Schoenleutnerstr. 8, D-85764 Oberschleissheim, Germany; kienzle@tiph.vetmed.uni-muenchen.de

* Correspondence: isabelle.m.maier@gmail.com

Simple Summary: The present study evaluated the literature investigating the potential differences in the quantitative calcium (Ca), phosphorus (P) and magnesium (Mg) metabolism in horses and ponies and between “organic” (plant origin) and “inorganic” mineral sources (mineral salts). For P sources, the “inorganic” P salts were also differentiated according to water solubility. The present study found unequivocal differences in apparent Mg digestibility between horses and ponies, whereby horses require a greater amount of this nutrient. “Organic” Ca was shown to have a higher bioavailability than “inorganic” Ca. When considering P sources, the distinction was made between water-soluble “inorganic” sources and all other sources. The water-soluble sources were highly available, and they increased serum P levels and renal P excretion, which presents a potential health risk.

Abstract: The aims of the present meta-analysis were (i) to re-evaluate the factorially calculated Ca, P and Mg requirements to replace endogenous faecal losses, taking new data into account, (ii) to identify potential differences between horses and ponies regarding requirements, apparent digestibility, serum levels and renal excretion of Ca, P and Mg and (iii) to investigate the influence of mineral sources, i.e., “inorganic” sources from added mineral salts and “organic” sources from feed plants. For P, the water solubility of “inorganic” sources was taken into consideration. Data on the aforementioned parameters from 42 studies were plotted against intake, similar to the Lucas test for true digestibility and faecal endogenous losses. Within specific intake ranges, data were compared using *t*-tests and an ANOVA, followed by Holm–Sidak post hoc tests. Ponies had lower endogenous faecal Mg losses than horses. Consequently, apparent Mg digestibility was higher in ponies. Factorial calculations of Mg requirements to replace faecal losses showed that ponies needed approximately half of the current recommended amount, while horses required 1.9 times the amount currently recommended by Kienzle and Burger. The overall mean matched previous recommendations. For Ca, there was no discernible difference between ponies and horses. True Ca digestibility calculated by the Lucas test was higher and endogenous losses were lower when “organic” Ca was fed as opposed to when “inorganic” sources were used. The resulting factorial calculations of the requirements to replace faecal losses were close to current recommendations for “organic” Ca. For “inorganic” sources, however, the new calculations were below the recommended level. For P, there were no discernible differences between horses and ponies. There were also no clear effects of “inorganic” or “organic” P sources. The water solubility of “inorganic” sources was the key factor determining P metabolism. Water-soluble P sources exhibited higher true and apparent digestibility. The intake of these P sources led to hyperphosphatemia and hyperphosphaturia, even at low intakes. In other species, this has been shown to pose a health risk. Therefore, it is recommended to avoid the use of highly water-soluble “inorganic” P sources in horses and ponies. Given the lower digestibility of insoluble P sources, the factorially calculated P requirements for such sources are higher than the current recommendations.

Keywords: pony; horse; mineral; metabolism; calcium; phosphorus; magnesium; digestibility



Citation: Maier, I.; Kienzle, E. A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies. *Animals* **2024**, *14*, 2765. <https://doi.org/10.3390/ani14192765>

Academic Editor: Yong Su

Received: 7 August 2024

Revised: 18 September 2024

Accepted: 23 September 2024

Published: 25 September 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Ca, P and Mg are essential elements that are crucial for many bodily functions. Apparent and true digestibility as well as endogenous faecal losses of these minerals are important for factorial calculation of mineral requirements. For adult horses, a meta-analysis on these parameters was last performed in 2011 [1]. Since this time, the data available in the literature have increased. Therefore, it is possible to recalculate the results of Kienzle and Burger [1] with a larger dataset. This was the first goal of the present meta-analysis.

A more comprehensive database provides the possibility to investigate potential differences between horses and ponies. This was the second goal of the present meta-analysis.

The third question addressed was the difference between mineral sources, especially P sources. In other species such as cats, dogs, pigs and humans, it has been shown that the P source may play an important role in digestibility and metabolism [2–5]. “Inorganic” P is even considered to be a health risk [6–15]. In this context, renal P excretion and serum P levels play a crucial role [6,16–20]. Therefore, data on serum minerals, renal mineral excretion and retention were included in the meta-analysis, covering not only P but also Ca and Mg.

Plots similar to the Lucas test were used as the main approach. When apparent digestibility, faecal excretion or apparently digested minerals are plotted against mineral intake, patterns may emerge that are not visible when only comparing apparent digestibility [21–23]. The same is true for serum levels and renal excretion if plotted against intake.

2. Materials and Methods

The studies used for the present meta-analysis were sought using Google Scholar, the database information system (DBIS) of the LMU Munich, PubMed and the Online Public Access Catalogue (OPAC) of the LMU Munich and the Bavarian State Library (BSB). The main keywords searched for were “mineral digestibility, calcium, phosphorus, magnesium, horse, pony, mare, gelding, digestibility, availability, minerals, set elements, renal, kidney, faecal, serum, blood, excretion, resorption or absorption” in various configurations. Theses that were used in the meta-analysis of Kienzle and Burger [1] were also included. Only data from studies that involved adult equines (older than 36 months following the Society of Nutrition Physiology (GfE) [24]), which were neither pregnant nor lactating, were used. Since the loss of the minerals Ca, P and Mg through sweat is minimal in horses and ponies [25] and does not lead to a recommendation for additional intake beyond the maintenance requirements according to GfE [24], both working and non-working animals were included in the analysis.

Only studies from which at least two of the following parameters could be extracted were considered: daily mineral intake, apparent digestibility, faecal excretion, renal excretion and serum blood levels. The body weight of the animals used in the studies had to be available, or at least the breed had to be stated, to estimate the body weight. This calculation was made based on the body mass in kg of large adult horses with a body condition score (BCS) of 5–6 [24]. In addition, the parameters of breed, age, feed composition, mineral source, dry matter intake, dry matter digestibility and faecal dry matter excretion were required. Both individual data and group averages were taken into account.

The present meta-analysis was conducted in accordance with the Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statement [26]. The last search for sources was carried out in July 2024. The following studies were used: [27–68]. We included in the Supplementary Material a flowchart in Figure S1 for the study search and selection and also Table S1, which identifies the number of studies and participating individuals for each graph.

Classification as a pony or horse was determined by body weight: animals with a body weight of more than 300 kg were considered horses, and those with a body weight of less than 300 kg were considered ponies. In a study conducted by the Chair of Animal Nutrition and Dietetics in Munich, one pony was temporarily heavier than 300 kg (ad libitum feeding). Nevertheless, the pony was still counted as a pony in the respective study.

Ca, P and Mg were subdivided depending on “organic” or “inorganic” origin. The term “organic” does not refer to the chemical definition but rather describes the natural mineral content of plants, such as Ca from alfalfa. This does not exclude the possibility that the mineral in the plants could be an “inorganic” compound in the chemical sense. In contrast, “inorganic” refers to mineral compounds added to mineral supplements or mixed feed. The terms “organic” and “inorganic” have been widely used in this context in various species [4,5,19,20]. To avoid confusion with chemical definitions, the term is placed in quotation marks. One study by Schulze [58] could not distinguish between sources, because the information about the feed did not allow for the discrimination of “organic” vs. “inorganic” origins, and was not used in this context.

The recommendations on requirements of GfE [24] were used to compare intake to requirements. The reference range for serum mineral level was taken from the book *Equine Applied and Clinical Nutrition: Health, Welfare and Performance* [25].

For the meta-analysis, all data on intake and excretion were calculated per kilogram of metabolic body weight (MBW). The initial step in the evaluation involved plotting apparent digestibility against intake. The goal was to assess whether a typical hyperbolic curve appeared, as proof of the validity of data from different sources. To compare data and reveal potential interactions, the so-called Lucas test or modified Lucas test is an effective method [1,69]. That was the second step. In the Lucas test, the apparently digested amount of a nutrient is plotted against its intake. Provided that the data distribution is suitable for linear regression calculation, the regression coefficient multiplied by 100 will represent the true digestibility (in %) and the intercept will represent the endogenous losses. This version of the Lucas test is most applicable to nutrients with high apparent digestibility, such as Ca. In the modified Lucas test, faecal nutrient excretion is plotted against intake. In this case, the regression coefficient must be subtracted from 1 and then multiplied by 100 to calculate true digestibility. This version is suitable for nutrients with a lower apparent digestibility such as P and Mg in the present study. The mineral requirement to replace faecal losses is then calculated by dividing the endogenous losses by the true digestibility and multiplying by 100. Data on serum mineral concentration were plotted against mineral intake. Data on renal excretion were plotted against intake and/or apparently digested amount of the respective mineral. Mineral retention was plotted against mineral intake. Outliers were present in almost all plots. All outliers were examined for causes of exceptional mineral metabolism, such as extremely high aluminium intake in the study by Roose [51], which affected serum Ca and renal P excretion. The data of Lensing [70] created outliers in practically all diagrams, a finding that clearly suggests that the data are not suitable for the present meta-analysis. In that study, nutrient supply was changed in rapid succession with short wash-out periods. Therefore, data from the aforementioned study were not used.

Acid–base balance has well-known effects on Ca and P metabolism [28,30,59,67,71,72]. Therefore, data from studies involving shifts in acid–base balance were excluded from all plots on renal Ca and P excretion and retention. For serum Ca, data from studies with shifts in acid–base balance fell outside the range defined by three standard deviations and were therefore not included in the analyses of serum Ca. In detail, the aforementioned limitations pertained to the following studies: Baker [27,28], O’Connor [47], McKenzie [42], Berchtold [30], Mueller [43], Stürmer [59], Wall [67], Schryver [57], one trial of Gomda [34] and one trial of Mundt [44]. In the plots of apparent digestibility, faecal excretion and apparently digested mineral, these datasets were included because they did not exhibit any anomalies.

The Ca:P ratio in food has a strong and well-known effect on renal Ca and P excretion [31,61,66,73]. Data from studies with very low or extremely high Ca:P ratios were therefore not included in the present meta-analysis. Only studies with a Ca:P ratio between 1:1 to 5:1 were included in the analysis of renal Ca and P excretion. Again, in the plots of apparent digestibility, faecal excretion and apparently digested mineral, these datasets were included because they did not exhibit any anomalies.

For Ca intakes exceeding 1000 mg/kg MBW, data were only available from ponies fed “inorganic” Ca sources. Consequently, the diagrams comparing “organic” and “inorganic” Ca sources—regarding the apparently digested Ca quantity, renal Ca excretion and Ca retention—were limited to an intake of up to 1000 mg/kg MBW.

The plots of renal P excretion and retention in relation to P intake were restricted to an intake of up to 500 mg/kg MBW because data above this level were limited to ponies consuming “inorganic” P.

The data of Baker [27] were eliminated from the Mg serum level plot, as they produced outliers. The Mg serum level in this study was in a range that could have caused clinical problems. Presumably, there is an error in units somewhere.

The comparison of two means was conducted by Student’s *t*-test or alternatively, if data were not normally distributed, by a Mann–Whitney Rank Sum Test. If multiple influencing factors were present, a two-way ANOVA was used, followed by the Holm–Sidak post hoc test for all pairwise comparisons. These tests were performed with SigmaPlot 14 (Systat Software, San Jose, CA, USA). Hyperbolic regressions were calculated in SigmaPlot as nonlinear inverse first-order regressions. Linear regressions were also determined in SigmaPlot. Linear regression lines were compared using the BiAS program with the test of *H*₀ (BiAS. für Windows, Version 11.01, 2023, epsilon-Verlag, Frankfurt, Germany). The significance level was defined at <0.05.

3. Results

3.1. Calcium

3.1.1. Ca Digestibility

Figure 1 shows the apparent digestibility of Ca in relation to Ca intake. Especially when fed below the required levels, apparent digestibility was low, and in some cases, even negative. This effect appeared to be stronger in horses than in ponies. Within this intake range, the Ca sources were typically “organic” from feed. The GfE recommendation for Ca supply for maintenance is 164 mg/kg MBW. The mean apparent digestibility of Ca at an intake of less than 164 mg/kg MBW of Ca was significantly higher in ponies than in horses. At higher intake levels, there was no difference between ponies and horses.

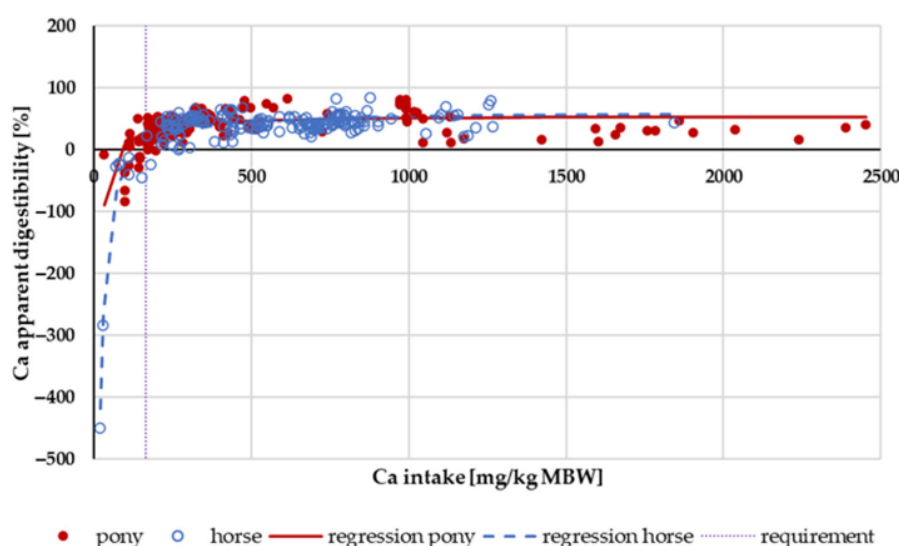


Figure 1. Relationship between Ca intake (in mg/kg MBW) and apparent Ca digestibility (in %). Regression lines mark data of horses compared to ponies.

Figure 2 shows the apparently digested Ca in relation to Ca intake. Trendlines mark the “organic” and “inorganic” sources. The regression coefficient was higher for “organic” sources. A two-factorial ANOVA of apparent Ca digestibility within the intake range of 164–1000 mg/kg MBW, considering the factors pony vs. horse and “organic” vs. “inor-

ganic”, showed a significant effect of the Ca source. Specifically, “organic” Ca had higher values compared to “inorganic” Ca (“organic”: $48 \pm 10.3\%$, $n: 127$; “inorganic”: $39 \pm 18.4\%$, $n: 163$; $p < 0.001$). No significant effect of pony vs. horse was observed. There was no significant interaction between the factors ($p = 0.143$).

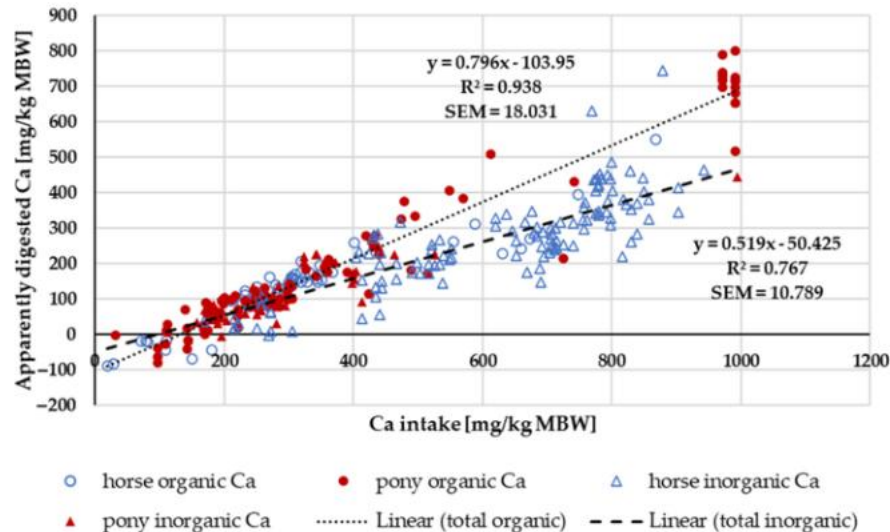


Figure 2. Relationship between Ca intake and apparently digested Ca (both in mg/kg MBW). Trendlines mark “organic” and “inorganic” Ca sources. Endogenous losses are represented by the intercept and true digestibility by the regression coefficient. Only data up to an intake of 1000 mg/kg MBW and with information on Ca source were taken into account.

3.1.2. Serum Ca Concentration

Within the intake range of 164 to 1000 mg/kg MBW, the serum Ca concentration (Figure 3) was completely unaffected by Ca intake, source, Ca:P ratio or whether the subject was a pony or a horse.

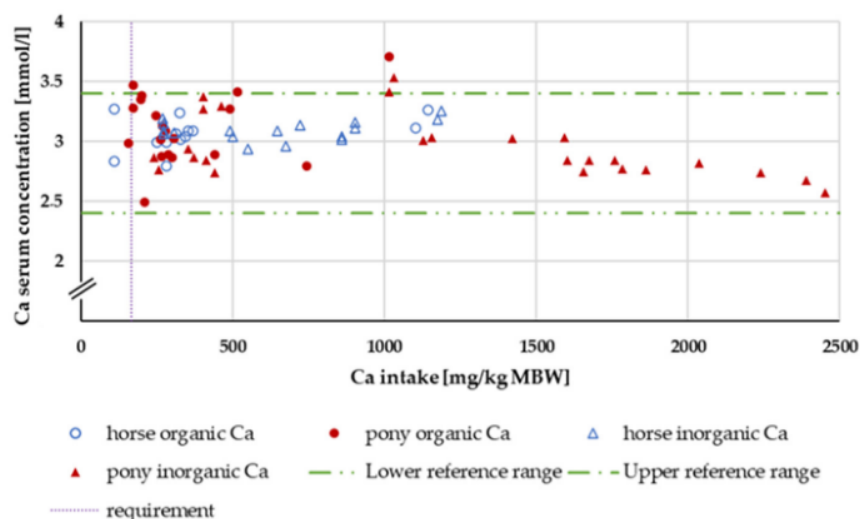


Figure 3. Serum Ca concentration (in mg/kg MBW) plotted against Ca intake (in mmol/L). Data without information on Ca source were not used. Experiments with shifts in acid–base balance and with addition of aluminium were excluded.

3.1.3. Ca Renal Excretion

Renal excretion was investigated only in the range of a Ca:P ratio between 1:1 and 5:1 (Figure 4). Experiments with shifts in acid–base balance were not considered. A two-way ANOVA of renal Ca excretion as a percentage of apparently digested Ca at an intake of 164

to 1000 mg/kg MBW showed no significant difference between the factors pony and horse nor between “organic” and “inorganic” Ca sources. There was no significant interaction between pony vs. horse and “organic” vs. “inorganic”.

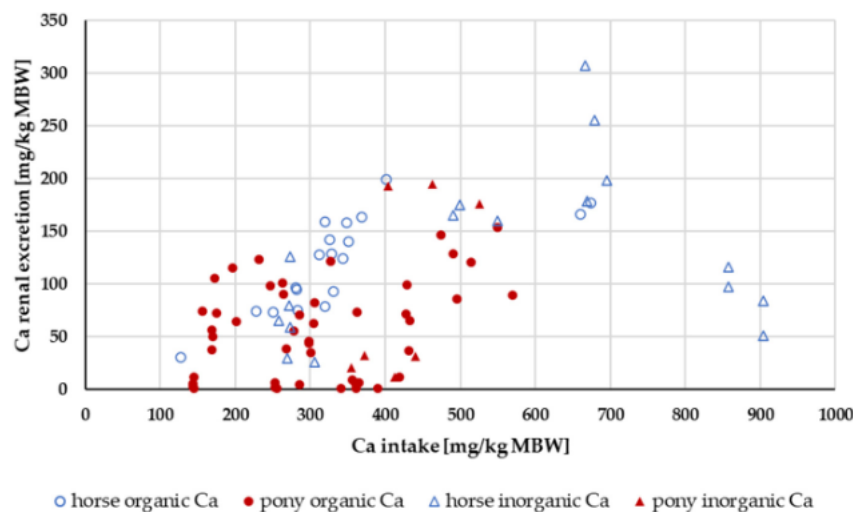


Figure 4. Relationship between Ca intake and renal Ca excretion (both in mg/kg MBW). Only data up to an intake of 1000 mg/kg MBW and with information on Ca source were taken into account. The Ca:P ratio was limited to 1:1–5:1. Experiments with shifts in acid–base balance were excluded.

3.1.4. Ca Retention

Retention of Ca (Figure 5) increased with higher intake levels. In ponies, the retention seemed to be higher than in horses. A two-way ANOVA of Ca retention as a percentage of intake with the factors horse vs. pony and “organic” vs. “inorganic” Ca source showed a significant difference between ponies and horses (pony: mean = 22.8%; horse: mean = 8.5%). There was no effect between the different Ca sources (“organic” Ca: mean = 15.7%; “inorganic” Ca: mean = 15.5%). The retention in percent of intake averaged 16%.

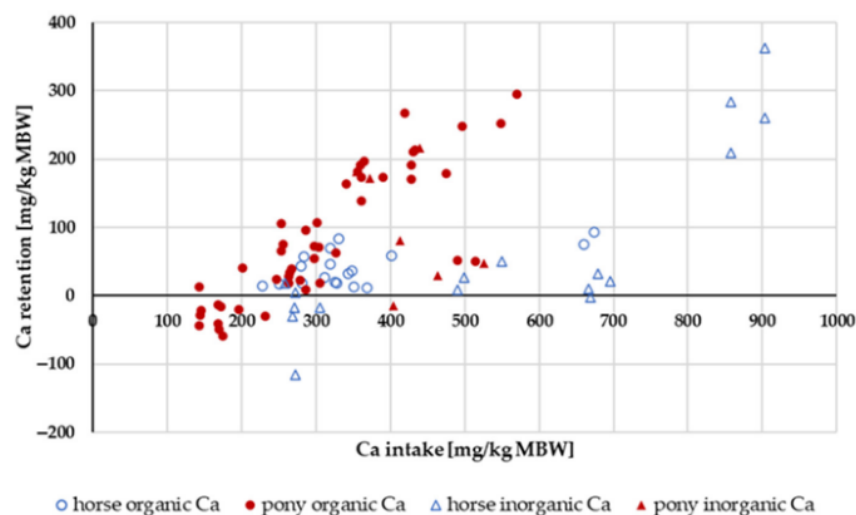


Figure 5. Ca retention plotted against Ca intake (both in mg/kg MBW). Only data up to an intake of 1000 mg/kg MBW and with information on Ca source were taken into account. The Ca:P ratio was limited to 1:1–5:1. Experiments with shifts in acid–base balance were excluded.

3.2. Phosphorus

3.2.1. P Digestibility

Figure 6 illustrates the apparent digestibility of P in relation to intake. There was neither a pronounced difference between pony and horse nor between “organic” and

“inorganic” P sources. When “inorganic” P sources were split into water-soluble (Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 or $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) and other “inorganic” sources (such as CaHPO_4), a significant difference was revealed. A statistical comparison between the apparent digestibility of water-soluble “inorganic” P sources and all other P sources in the range above the GfE [24] recommended requirements of 113 mg/kg MBW revealed a significantly higher apparent digestibility of water-soluble “inorganic” P sources (median soluble “inorganic” P: 20.3%; median all other P sources: 8.2%; $p < 0.001$).

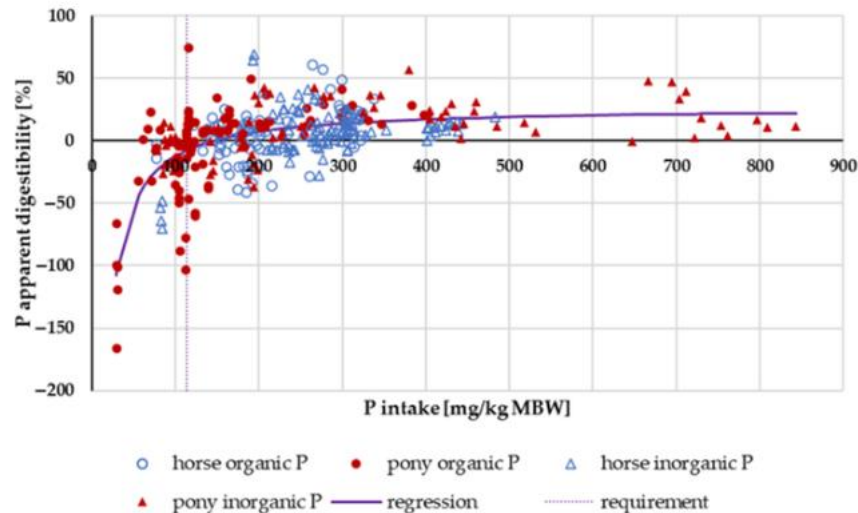


Figure 6. Relationship between P intake (in mg/kg MBW) and apparent P digestibility (in %). Data without information on P source were not used.

When faecal P excretion was plotted against P intake (Figure 7), there was no apparent effect of either being a pony or a horse nor of the P source (“organic” vs. “inorganic”). Trendlines were calculated separately for ponies and horses, as well as for “organic” vs. “inorganic” sources. There was no significant difference between the pony and horse trendlines (test from H_0 , $p = 0.541$). The data were again divided based on the water solubility of “inorganic” sources compared to all other sources (Figure 8). Faecal P excretion in relation to intake was lowest when water-soluble “inorganic” sources were used. The faecal excretion was clearly lower than for all other P sources, especially if intake was high. The relationship between intake and faecal excretion was linear for all sources except for the soluble “inorganic” sources. Here, the regression equation was curvilinear.

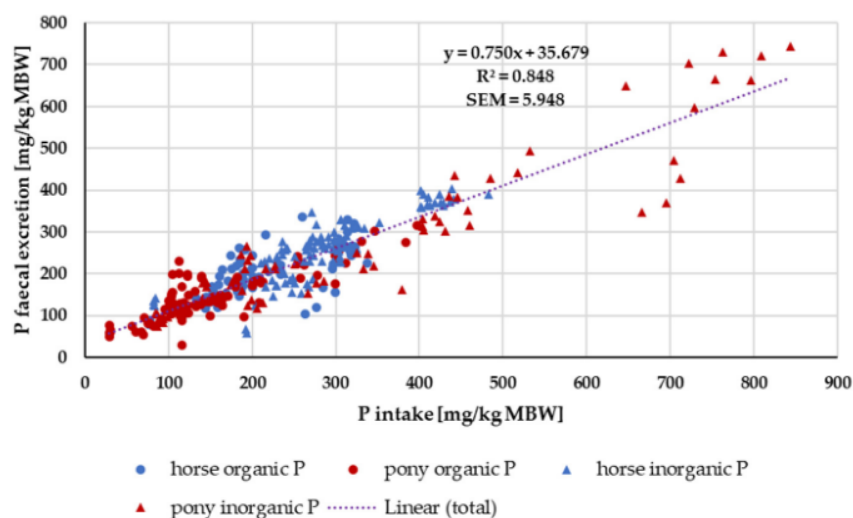


Figure 7. Faecal P excretion in relation to P intake (both in mg/kg MBW). Data without information on P source were not used.

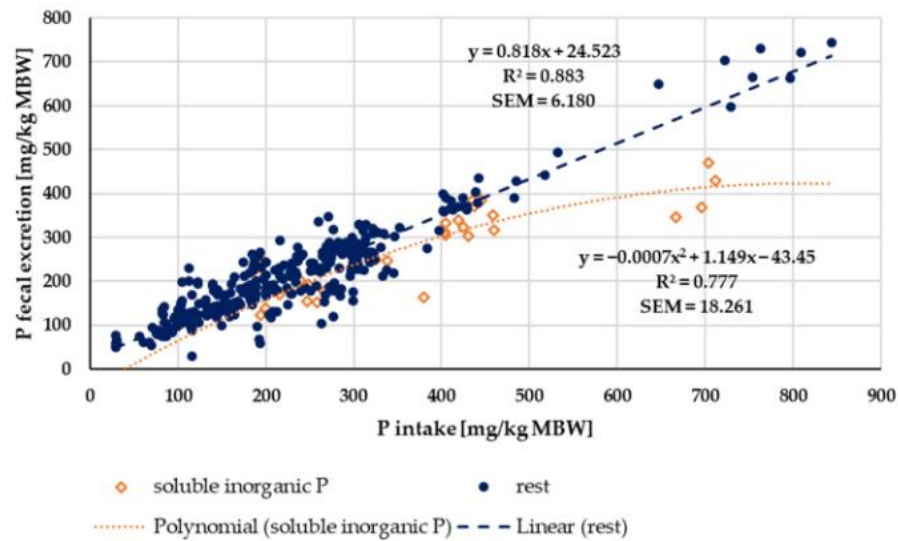


Figure 8. Faecal P excretion in relation to P intake (both in mg/kg MBW). Data without information on P source were not used. Trendlines mark water-soluble “inorganic” P sources and all other sources.

3.2.2. Serum P Concentration

Figure 9 shows the P serum levels. P serum levels above the reference range were observed only for water-soluble “inorganic” sources.

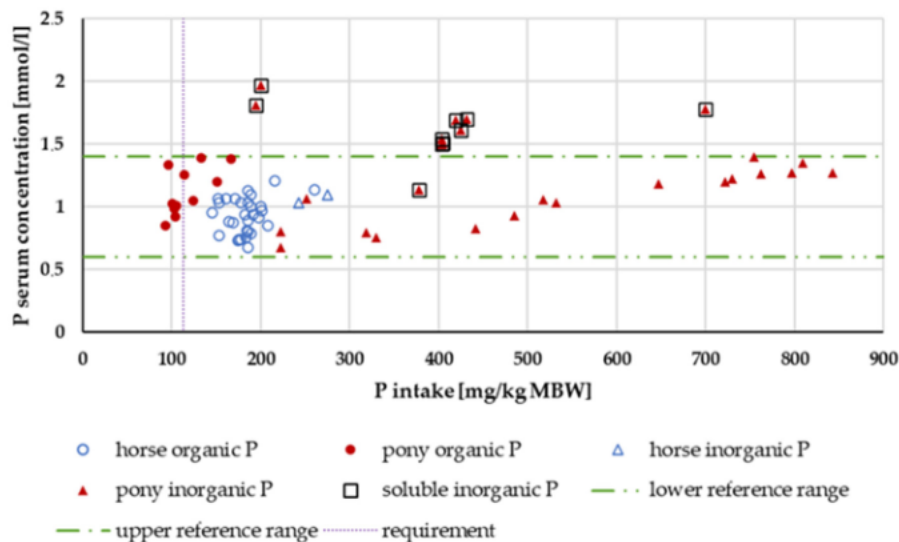


Figure 9. Serum P level (in mg/kg MBW) plotted against P intake (in mmol/L). Data without information on P source and with shifts in acid–base balance were not used.

3.2.3. P Renal Excretion

Renal P excretion in relation to P intake up to an intake of 500 mg/kg MBW is shown in Figure 10. Experiments with acidifying rations were excluded. Again, the data were split according to solubility into highly water-soluble “inorganic” sources (Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 or $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) and other P sources (Figure 11). The water-soluble “inorganic” P sources led to a high renal P excretion. A median of about 32% of the apparently digested P quantity was excreted renally when highly water-soluble sources were used. In comparison, the use of other P sources resulted in a renal P excretion of approximately 4% of the apparently digested P amount. The difference was highly significant.

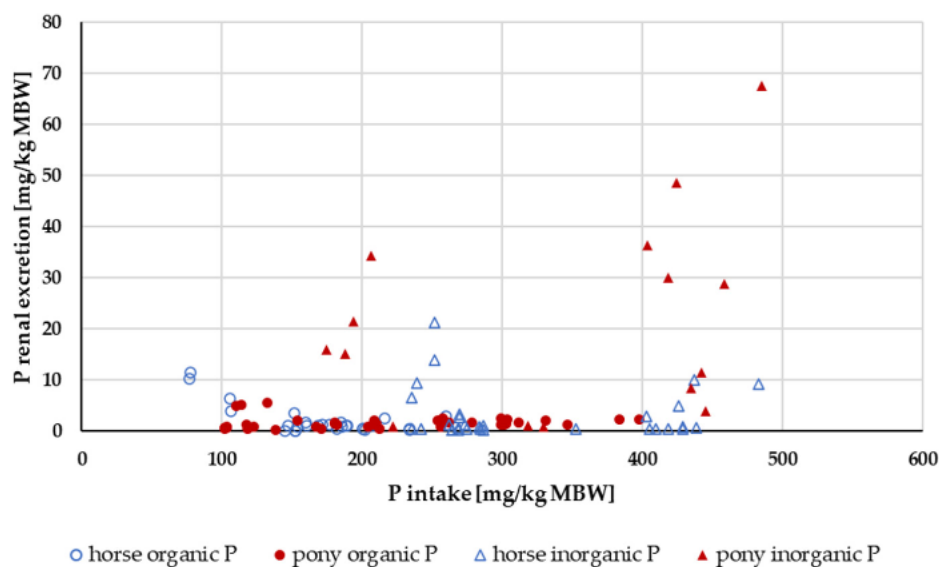


Figure 10. Relationship between P intake and renal P excretion (both in mg/kg MBW). Only data up to intake of 500 mg/kg MBW and with information on P source were taken into account. Ca:P ratio was limited to 1:1–5:1. Experiments with shifts in acid–base balance were excluded.

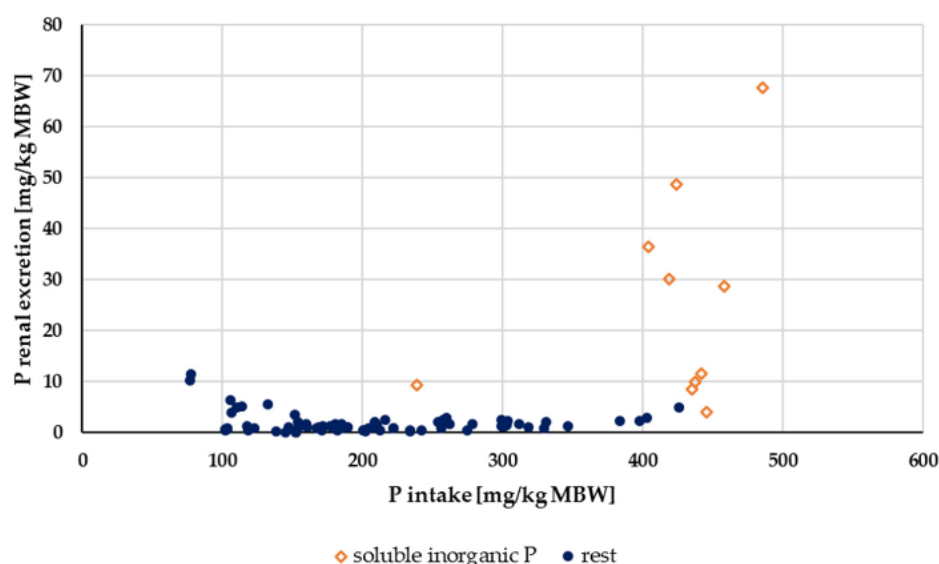


Figure 11. Relationship between P intake and renal P excretion (both in mg/kg MBW) from Figure 10 with differentiation of P sources into soluble “inorganic” sources and other sources. Data on unknown “inorganic” P sources were not used.

3.2.4. P Retention

Figure 12 shows the P retention in relation to P intake. Data distribution did not allow for a conclusive evaluation with regard to ponies and horses. There was, however, a difference between “inorganic” and “organic” P sources (Figure 12). “Inorganic” P tended to result in lower P retention than “organic” P sources, especially at high intake. The average retention, expressed as a percentage of intake, was 5.9%.

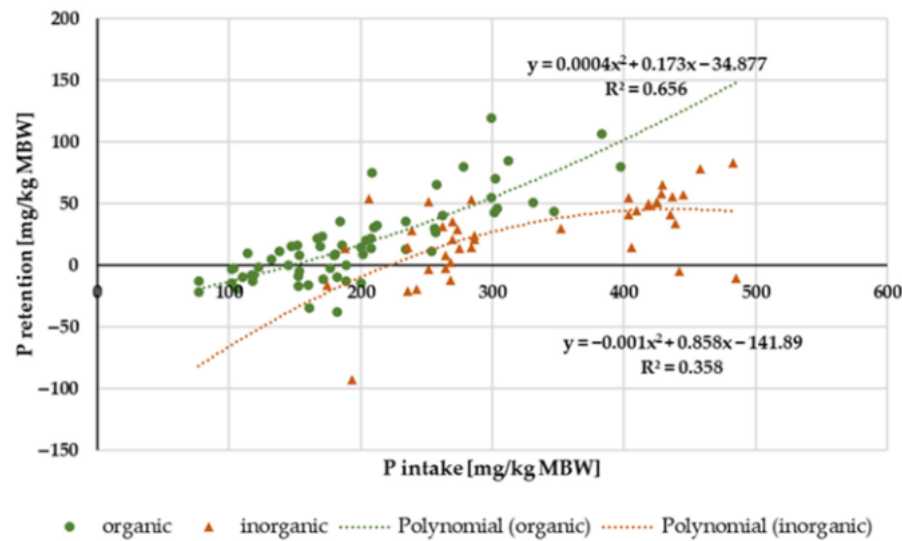


Figure 12. Relationship between P intake and P retention (both in mg/kg MBW). Only data up to intake of 500 mg/kg MBW and with information on P source were taken into account. Ca:P ratio was limited to 1:1–5:1. Experiments with shifts in acid–base balance were excluded. P sources were differentiated into “organic” and “inorganic” sources.

3.3. Magnesium

3.3.1. Mg Digestibility

The apparent digestibility of Mg in relation to intake is shown in Figure 13. In horses, negative apparent digestibility was observed even at an intake of up to 120 mg/kg MBW. In ponies, the apparent digestibility was mainly positive across the entire range of intake. In the range of 53 mg/kg MBW (recommended requirement for maintenance following GfE [24]) to 200 mg/kg MBW, the apparent digestibility was significantly higher in ponies than in horses ($p = 0.001$). There was no effect of the Mg source.

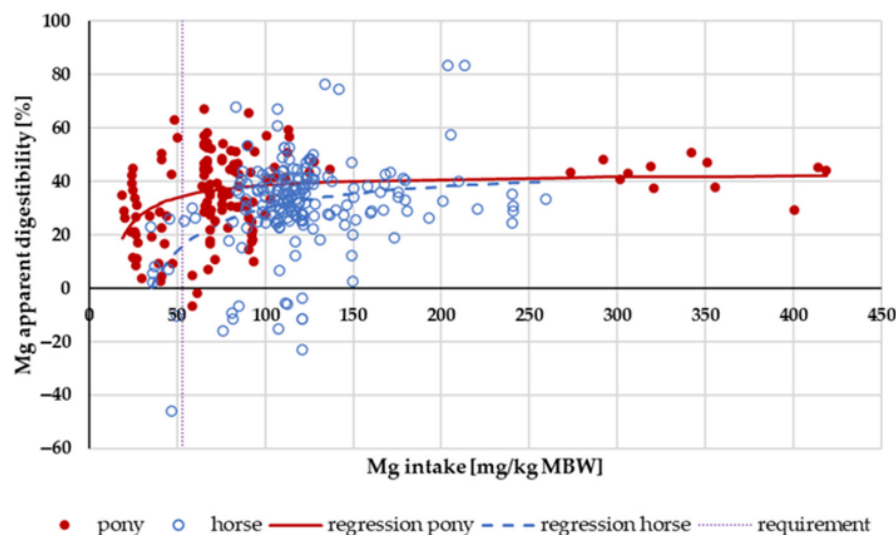


Figure 13. Relationship between Mg intake (in mg/kg MBW) and apparent Mg digestibility (in %). Regression lines mark data of horses compared to ponies.

Figure 14 shows the faecal Mg excretion in relation to Mg intake. Trendlines mark the values for ponies and for horses. The intercept, i.e., the endogenous faecal excretion, was significantly higher in horses than in ponies (horse: 95% CI [6.66, 26.27]; pony: 95% CI [2.04, 7.91]; $p < 0.001$). The regression coefficients were similar.

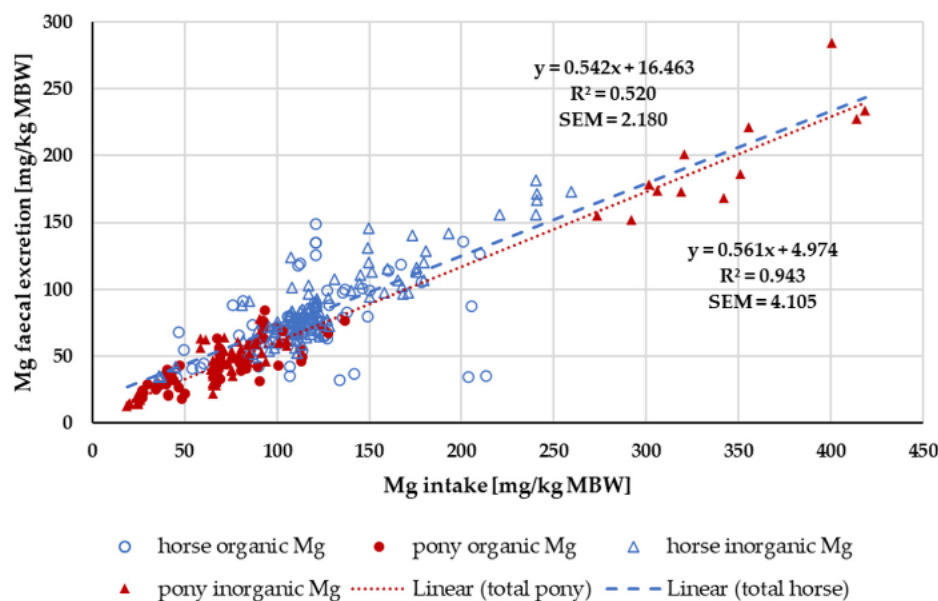


Figure 14. Relationship between Mg intake and faecal Mg excretion (both in mg/kg MBW). Data without information on Mg source were not used. Trendlines mark data of horses compared to ponies.

3.3.2. Serum Mg Concentration

In Figure 15, the serum Mg level is plotted against Mg intake. With the exception of the study of Pferdekamp [50], there was a significant increase in serum Mg concentration with increasing intake. Pferdekamp [50], however, used a ration with exceptionally high Ca and P intake. For comparison, the median Ca intake in the aforementioned study was 1771.36 mg/kg MBW, whereas the median Ca intake in the other studies referenced in the figure was 361.27 mg/kg MBW. Due to the data distribution, differences between horses and ponies or “organic” and “inorganic” sources could not be further investigated.

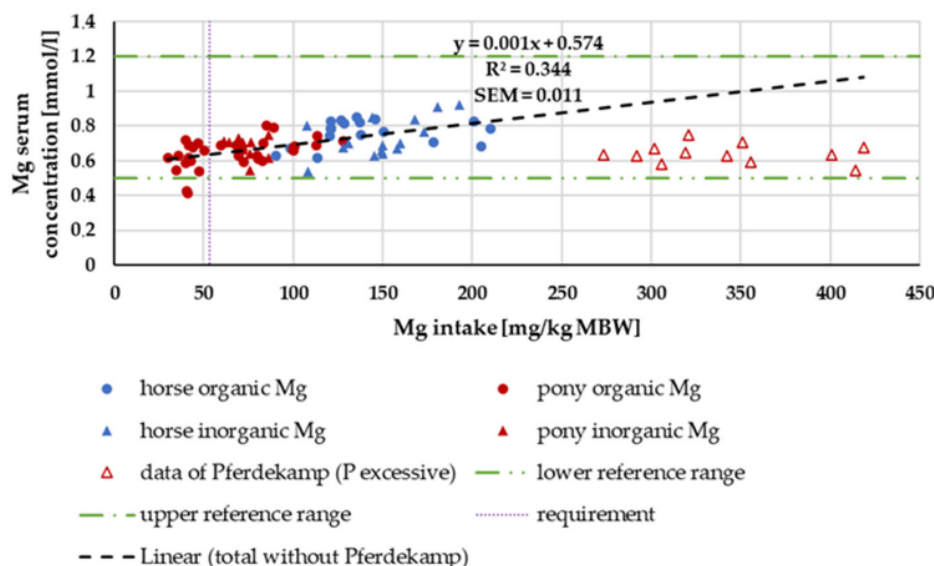


Figure 15. Serum Mg (in mg/kg MBW) plotted against Mg intake (in mmol/L). Data without information on Mg source were not used. Trendline marks serum Mg content without data from Pferdekamp.

3.3.3. Mg Renal Excretion

Figure 16 shows the renal Mg excretion in relation to the amount of apparently digested Mg. The Mg intake was not limited. The data distribution with regard to source, pony or horse, and the amount of apparently digested Mg did not permit a conclusive evaluation of

these factors. There was a general trend towards higher renal Mg excretion with increasing amounts of apparently digested Mg.

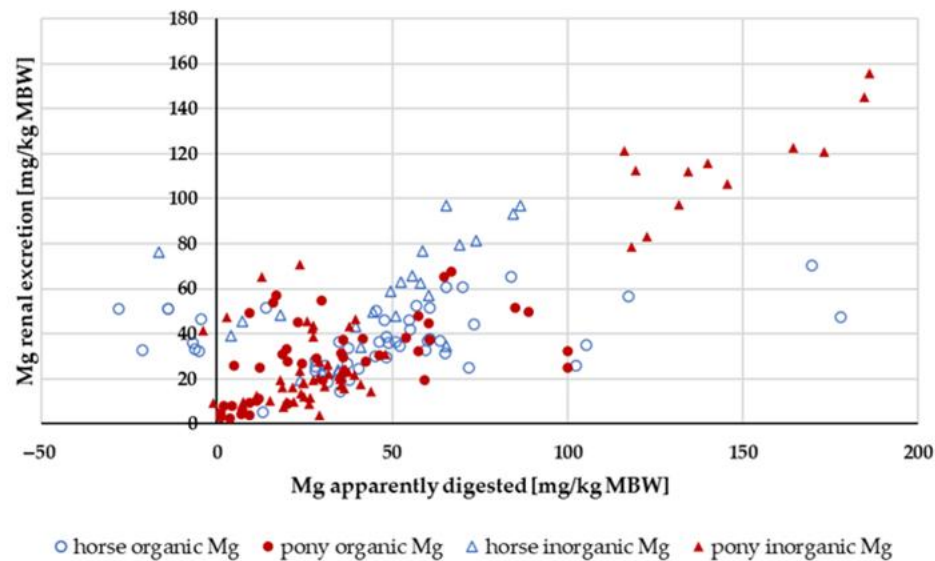


Figure 16. Renal Mg excretion in relation to apparently digested Mg (both in mg/kg MBW). Data without information on Mg source were not used.

3.3.4. Mg Retention

The retention of Mg in relation to Mg intake is shown in Figure 17. The data distribution did not allow for statistical evaluation. The retention as a percentage of intake showed no obvious differences between ponies and horses, or between “inorganic” and “organic” sources. The mean retention was 0.7%.

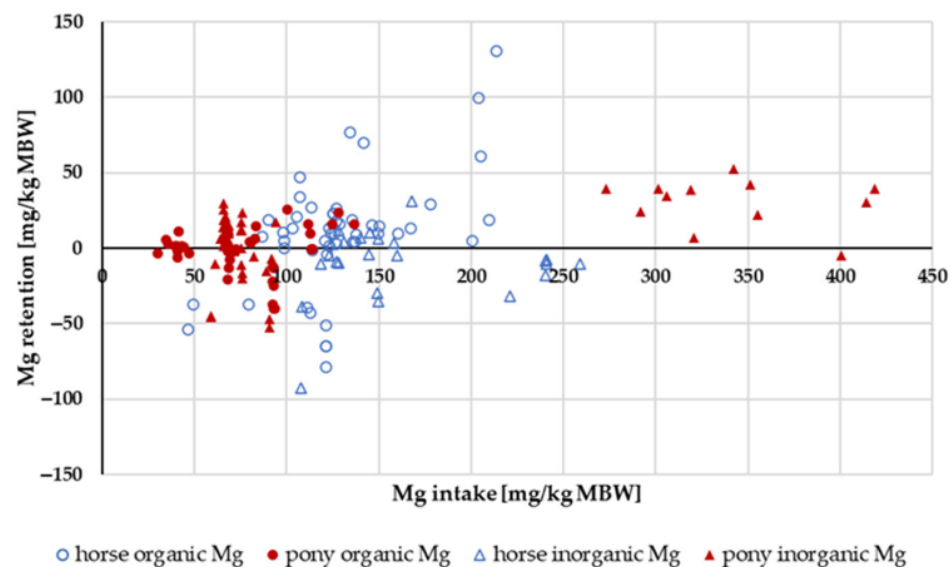


Figure 17. Relationship between Mg intake and Mg retention (both in mg/kg MBW). Data without information on Mg source were not used.

4. Discussion

4.1. The Lucas Test

Apparent digestibility is a relative measurement identifying the percentage of the intake of a nutrient which is not excreted via the faeces. Endogenous faecal losses are not considered. Although this mathematical description is often very useful, it may also obscure differences in results between experiments conducted under varying conditions,

particularly differing intake levels. For instance, if the intake is very low, apparent digestibility may be negative even though a considerable part of the nutrient from the feed is absorbed. This is due to endogenous losses exceeding the intake, which is shown very clearly in Figures 1, 6 and 13, depicting apparent digestibility plotted against intake. The Lucas test or modified Lucas test is a very valuable tool to combine data from the literature and make quantitative differences or similarities in digestion more visible [1,21,74,75]. The amount of an apparently digested nutrient is plotted against intake for nutrients with relatively high apparent digestibility. For nutrients with a low apparent digestibility, intake is plotted against faecal excretion. Similar effects can be observed when renal excretion or serum concentration is plotted against intake or the apparently digested amount.

In the present study, these techniques were used. Outliers were present in most plots, and the data were reviewed to determine the reasons for these deviations. The most conspicuous study was by Lensing [70]. The data in this study produced outliers in almost all parameters related to mineral excretion, regardless of the mineral. In this study, the animals were fed a surplus or deficit of Ca and an excess of P and vitamins A and D in short experimental periods (50, 32 and 30 days) with short wash-out periods (30 and 50 days) in between. It is quite possible that the deviations from other studies exist due to some methodological variation. It is also possible that this feeding system led to dysregulation of mineral excretion. In practice, such feeding schedules do occur occasionally and should be discouraged. Regardless of the cause, this finding proves the value of the Lucas test's data presentation. When examining only the data on apparent digestibility or renal excretion, no clear effect of the feeding regimen was visible in the aforementioned study. The results were not remarkable on their own. However, by plotting the data in the present study, it was demonstrated that the aforementioned feeding systems may indeed have effects on mineral metabolism in ponies.

The well-known effects of acidifying or alkalizing rations on renal excretion and serum Ca concentration could also be shown with these methods. The same was true for the effects of an unbalanced Ca:P ratio on renal excretion. In this context, the absence of effects on faecal excretion of Ca and P from either the acid–base balance or Ca:P ratio is an important finding. In other species, particularly carnivores, imbalanced Ca:P ratios in the diet affect apparent digestibility very much [21,75–78]. This might be due to the formation of insoluble Ca-P salts. Cihak and Breves [79] suggested that, in horses, Ca is actively absorbed from the small intestine to make P available for the microbiota in the hindgut. This might explain why Ca and P in horses do not negatively affect each other's digestibility in the same way as in carnivores.

4.2. Distinction between Horses and Ponies

In the present study, ponies and horses were differentiated based on body weight (ponies < 300 kg; horses > 300 kg). This is a rather rough method. An individual may fall into different groups when losing or putting on weight. With a limit of 300 kg BW, it is unlikely that a horse would be classified as a pony, but it is quite likely that some ponies might be categorized as horses. In retrospective studies in a meta-analysis, it is not possible to obtain data on the breeds unless they are given in the study. This would reduce the amount of data considerably. It would be even more effective if the classification could also consider breeds known for being easy keepers, such as certain draft horse types or Andalusians (PRE), or be based on wither height.

Despite the aforementioned considerations, ponies had lower endogenous faecal Mg losses compared to horses. A possible explanation might be that most ponies originate from relatively cold regions. Plants grown at lower temperatures usually have lower Mg content than plants grown at higher temperatures [80]. This might force the ponies to accumulate Mg. Other effects such as a higher Ca retention in ponies or a potentially higher digestibility at low intake were not sufficiently clear-cut.

4.3. Metabolic Body Weight as Calculation Basis and Differences between Horses and Ponies

In the present meta-analysis, all data are presented per kg of MBW. In species with widely varying adult body weights such as horses or dogs, this has been discussed extensively [24,81–83]. To ensure accuracy, all data were also plotted per kg of body weight (BW) where applicable. There was no difference in the results, except for apparent Ca digestibility. For Ca, the difference in apparent Ca digestibility between ponies and horses at low intake was not measurable when intake was expressed as mg/kg BW instead of per kg MBW. The comparison of apparent Ca digestibility was re-evaluated in horses and ponies at an intake level below requirements, in this case, the requirements of NRC 2007 [84], i.e., below 40 mg/kg BW. The data distribution was somewhat different (14 ponies and 10 horses compared to 15 ponies and 8 horses) because requirement limits were either given per kg MBW or kg BW. The apparent digestibility was still numerically different, but the difference was not statistically significant (pony: −9.8%; horse: −26.2%; $p = 0.095$). It remains unclear whether the observed difference between ponies and horses in apparent Ca digestibility at low intake is due to the dimension or is simply a result of data distribution. In contrast, the aforementioned differences between horses and ponies in apparent Mg digestibility remained significant, regardless of the method of plotting or the dimension (Figures 13 and 14).

4.4. Effect of Mineral Sources on Mineral Metabolism

When the apparently digested amount of Ca was plotted against intake, it became evident that the regressions for “organic” or “inorganic” sources were different, with a higher slope for the “organic” sources, suggesting a higher true digestibility. Ca in grass is mainly soluble [85]. The solubility of Ca in grass or legumes amounts to 50 to 80% [86]. The “inorganic” sources were mostly CaCO_3 and CaHPO_4 . These compounds are not very soluble in water. In horses, Ca is mainly absorbed in the small intestine [79]. Therefore, it is not surprising that highly soluble sources have a higher apparent digestibility than Ca compounds with low water solubility.

When the regression between Ca intake and apparently digested Ca was calculated across all data, the resulting equation aligned with the findings of Kienzle and Burger [1]. The slope of the regression equation multiplied by 100 represents the true digestibility. The intercept shows the endogenous losses. The endogenous losses divided by the slope equal the Ca that is required to replace faecal losses (Table 1). The intercept, slope and the required Ca to replace faecal losses diverge between Ca from “organic” and “inorganic” sources (Table 1). This can have consequences in practical feeding. Here, “organic” Ca primarily originates from forages. Thus, horses consuming forage-based rations are more likely to tolerate a marginal Ca intake than horses being fed cereal-based supplemented rations, provided the forage does not derive from exceptionally high oxalate plants. Ca from oxalate is known to be poorly available for horses [87,88], and therefore, Ca requirements increase with high levels of oxalate [89].

Table 1. Comparison of the results of the present study with those of Kienzle and Burger.

Study and Topic	Ca	P	Mg
True digestibility [%] following Kienzle and Burger	59	28	46
True digestibility [%] in the present study	All data: 65 “Organic”: 80 “Inorganic”: 50	All sources except water-soluble “inorganic”: 18	All data: 45 Pony: 44 Horse: 46
Endogenous losses [mg/kg MBW] following Kienzle and Burger	39	26	9

Table 1. Cont.

Study and Topic	Ca	P	Mg
Endogenous losses [mg/kg MBW] in the present study	All data: 77 "Organic": 50 "Inorganic": 103	All sources except water-soluble "inorganic": 25	All data: 11 Pony: 5 Horse: 17
Mineral requirements [mg/kg MBW] to replace faecal losses following Kienzle and Burger	$\hat{=39/59 \times 100 = 66}$	$\hat{=26/28 \times 100 = 93}$	$\hat{=9/46 \times 100 = 20}$
Mineral requirements [mg/kg MBW] to replace faecal losses in the present study	All data $\hat{= 77/65 \times 100 = 118}$ "Organic" $\hat{= 50/80 \times 100 = 63}$ "Inorganic" $\hat{= 103/50 \times 100 = 206}$	$\hat{=25/18 \times 100 = 139}$	All data $\hat{= 11/45 \times 100 = 24}$ Pony $\hat{= 5/44 \times 100 = 11}$ Horse $\hat{= 17/46 = 37}$

Serum Ca levels did not exhibit any effects related to the source or amount of intake, nor did they differ between ponies and horses. There was no difference between postprandial and preprandial sampling time. The only factors that influenced serum Ca levels were aluminium in the diet and the manipulation of acid–base balance in the excluded studies. It is very well known that serum Ca concentration is tightly regulated [90–94] and this has been reconfirmed.

Renal Ca excretion showed no significant effects of being a pony or a horse or of the Ca source that was used. Kienzle and Burger [1] postulated a broken-line model between Ca intake and renal excretion with a breakpoint at about 394.3 mg/kg MBW Ca intake. In the present meta-analysis, no clear-cut breakpoint was identified, and the relationship between intake and renal excretion was not particularly strong. However, in the present study, the limitation for the Ca:P ratio was 1:1 to 5:1. By contrast, Kienzle and Burger [1] limited their data to a Ca:P ratio between 1:1 and 2:1. If the data of the present meta-analysis were similarly limited to a Ca:P ratio between 1:1 and 2:1, they showed a curvy linear relationship between Ca intake and renal excretion rather than a broken-line model (Figure 18). For practical feeding, it is important to note that renal Ca excretion begins to increase substantially at an intake of around 300 mg/kg MBW. This intake is approximately twice the required amount.

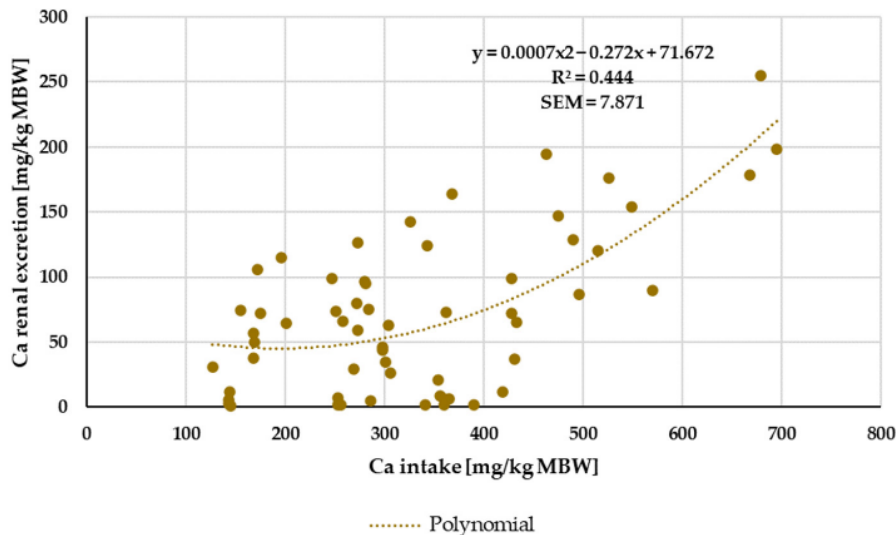


Figure 18. Relationship between Ca intake and renal Ca excretion (both in mg/kg MBW). Only data up to intake of 1000 mg/kg MBW were taken into account. Ca:P ratio was limited to 1:1–2:1. Experiments with shifts in acid–base balance were excluded.

Retention of Ca can be caused by reduced bone turnover [95]. If so, it is mandatory that P is also retained. The data showed a weak correlation between Ca and P retention

($r = 0.374$). It is also obvious that errors in the collection of faeces and urine, as well as in the measurement of food, typically result in an overestimation of retention. Therefore, a correlation between Ca and P retention is to be expected. The retention may as well be caused by Ca and/or P accumulation in the gut or bladder. In that case, Ca retention can be independent of P retention. Therefore, Ca and P retention should not be overinterpreted. Nevertheless, it appears that ponies retain more Ca and P compared to horses. A possible explanation is that ponies, being easy keepers [96], retain more Ca and P to provide for their needs during periods of low food intake. The impact of P solubility on Ca and P retention could not be clearly determined due to the distribution of the data.

Water-soluble P showed a higher apparent digestibility than all other P sources. The same issue applied to true digestibility, particularly at high intake (Figure 8). This corresponds with a higher P serum level, in most cases even above the reference range, as well as with an increased renal P excretion. Similar effects have been reported in other species such as humans, dogs and cats [2,17–20,97]. Here, the resulting hyperphosphatemia and hyperphosphaturia are considered a potential health risk [5,14,98]. Currently, it is not recommended to use water-soluble “inorganic” P sources for horses and ponies.

Given this recommendation to avoid water-soluble “inorganic” P sources, true digestibility and faecal endogenous losses should only be calculated for other P sources that can potentially be used for equines. The resulting true digestibility of P was lower than the calculations of Kienzle and Burger [1], which included water-soluble “inorganic” P sources (Table 1). The resulting P requirement would be 1.5 times higher than the current recommendations.

The apparent digestibility of Mg was not affected by any one source. This was expected because the “inorganic” Mg was in more than 50% of the studies MgO, which is known to be highly available [99]. Mg from leaves is highly available as well, even in humans [100], whose digestive capacity for plant material is much lower than that of horses. When plotting faecal Mg excretion against intake in a modified Lucas test, the true digestibility for Mg matched the results of Kienzle and Burger [1] and so did the endogenous losses across all data from ponies and horses. As mentioned above, the true Mg digestibility did not differ between ponies and horses, but the endogenous Mg losses were lower in ponies. Therefore, a lower Mg requirement for ponies could be postulated (Table 1).

The distribution of serum Mg levels did not permit an evaluation of differences between ponies and horses. In the overlap area, where data from both ponies and horses were available, no difference could be observed. The slight increase in serum Mg content with increasing Mg intake supports the well-known fact that Mg blood levels can be used to estimate Mg supply [94]. An exception was the data by Pferdekamp [50], which showed comparatively low serum Mg levels despite high Mg intake. One possible explanation for this finding is the extremely high intake of Ca and P in this study. It is known that high levels of Ca and P reduce the availability of Mg [61,101,102] and lead to lower serum Mg levels [103].

Renal Mg excretion increased with higher Mg intake ($y = 0.3308x - 0.2206$; $r^2 = 0.773$) as well as with higher apparently digested Mg (Figure 16). This concurs with previous research [104]. There was very little Mg retention, and it was independent of intake. However, there was a weak correlation between Ca retention and Mg retention, as well as between P retention and Mg retention, particularly when both values were greater than zero (Ca/Mg retention: $r = 0.498$; P/Mg retention: $r = 0.606$). This finding suggests that the aforementioned errors during collection may indeed play a role. Retention data should be interpreted with great caution.

5. Conclusions

Water-soluble “inorganic” P sources such as Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 or even $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ are more readily available than other “inorganic” and “organic” P sources. Water-soluble “inorganic” P leads to an increase in both serum P levels and renal excretion. In other species, this has been shown to pose a health risk. Including data from experiments

with water-soluble P sources into the regression calculations for true digestibility may subsequently lead to an underestimation of factorially calculated P requirements in horses being fed water-insoluble P.

In the Lucas test, the true digestibility of Ca from “organic” sources was higher than from “inorganic” sources. Thus, horses consuming forage-based rations are more likely to tolerate a marginal Ca intake than horses deriving Ca from mineral salts.

True digestibility of Mg was the same in horses and ponies. But endogenous Mg losses were significantly higher in horses than in ponies. This finding suggests a lower requirement for ponies compared to horses.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ani14192765/s1>: Figure S1: Flow diagram for study search and selection based on Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA); Table S1: Number of included studies and participants for each graph.

Author Contributions: Conceptualization, E.K.; methodology, E.K. and I.M.; validation, E.K. and I.M.; formal analysis, I.M.; investigation, I.M. and E.K.; resources, not applicable; data curation, E.K. and I.M.; writing—original draft preparation, I.M. and E.K.; writing—review and editing, I.M.; visualization, I.M.; project administration, not applicable. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data presented in this study are available upon request from the corresponding author.

Acknowledgments: We thank Linda Böswald for help with the test of Ho.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Burger, A. Literatur-Studie zur Faktoriellen Ableitung des Mengenelement-Bedarfs für Erhaltung Beim Pferd. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Ingolstadt, Germany, 2011.
2. Dobenecker, B.; Kienzle, E.; Siedler, S. The source matters—effects of high phosphate intake from eight different sources in dogs. *Animals* **2021**, *11*, 3456. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Lineva, A.; Kirchner, R.; Kienzle, E.; Kamphues, J.; Dobenecker, B. A pilot study on in vitro solubility of phosphorus from mineral sources, feed ingredients and compound feed for pigs, poultry, dogs and cats. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2019**, *103*, 317–323. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Dobenecker, B.; Reese, S.; Herbst, S. Effects of dietary phosphates from organic and inorganic sources on parameters of phosphorus homeostasis in healthy adult dogs. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0246950. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Calvo, M.S.; Moshfegh, A.J.; Tucker, K.L. Assessing the health impact of phosphorus in the food supply: Issues and considerations. *Adv. Nutr.* **2014**, *5*, 104–113. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Siedler, S.; Dobenecker, B. The source of phosphorus influences serum PTH, apparent digestibility and blood levels of calcium and phosphorus in dogs fed high phosphorus diets with balanced Ca/P ratio. In Proceedings of the Waltham International Nutritional Sciences Symposium, Chicago, IL, USA, 18–21 October 2016; pp. 18–21.
7. Eller, P.; Eller, K.; Kirsch, A.H.; Patsch, J.J.; Wolf, A.M.; Tagwerker, A.; Stanzl, U.; Kaindl, R.; Kahlenberg, V.; Mayer, G. A murine model of phosphate nephropathy. *Am. J. Pathol.* **2011**, *178*, 1999–2006. [\[CrossRef\]](#)
8. MacKay, E.M.; Oliver, J. Renal damage following the ingestion of a diet containing an excess of inorganic phosphate. *J. Exp. Med.* **1935**, *61*, 319. [\[CrossRef\]](#)
9. Schneider, P.; Pappritz, G.; Müller-Peddinghaus, R.; Bauer, M.; Lehmann, H.; Ueberberg, H.; Trautwein, G. Potassium hydrogen phosphate induced nephropathy in the dog. I. Pathogenesis of tubular atrophy (author’s transl.). *Vet. Pathol.* **1980**, *17*, 699–719. [\[CrossRef\]](#)
10. Schneider, P.; Müller-Peddinghaus, R.; Pappritz, G.; Trieb, G.; Trautwein, G.; Ueberberg, H. Potassium hydrogen phosphate induced nephropathy in the dog. II. Glomerular alterations (author’s transl.). *Vet. Pathol.* **1980**, *17*, 720–737. [\[CrossRef\]](#)
11. Sage, A.P.; Lu, J.; Tintut, Y.; Demer, L.L. Hyperphosphatemia-induced nanocrystals upregulate the expression of bone morphogenetic protein-2 and osteopontin genes in mouse smooth muscle cells in vitro. *Kidney Int.* **2011**, *79*, 414–422. [\[CrossRef\]](#)

12. Takeda, E.; Yamamoto, H.; Taketani, Y. Effects of natural and added phosphorus compounds in foods in health and disease. In *Clinical Aspects of Natural and Added Phosphorus in Foods*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 111–121.
13. Di Marco, G.S.; Hausberg, M.; Hillebrand, U.; Rustemeyer, P.; Wittkowski, W.; Lang, D.; Pavenstadt, H. Increased inorganic phosphate induces human endothelial cell apoptosis in vitro. *Am. J. Physiol.-Ren. Physiol.* **2008**, *294*, F1381–F1387. [[CrossRef](#)]
14. Ritz, E.; Hahn, K.; Ketteler, M.; Kuhlmann, M.K.; Mann, J. Phosphate additives in food—A health risk. *Dtsch. Ärzteblatt Int.* **2012**, *109*, 49.
15. Ori, Y.; Herman, M.; Gafer, U.; Chagnac, A.; Korzets, A.; Tobar, A.; Chernin, G.; Izhak, O.B. Acute phosphate nephropathy—An emerging threat. *Am. J. Med. Sci.* **2008**, *336*, 309–314. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Pastoor, F.; Klooster, A.T.v.T.; Mathot, J.; Beynen, A. Increasing phosphorus intake reduces urinary concentrations of magnesium and calcium in adult ovariectomized cats fed purified diets. *J. Nutr.* **1995**, *125*, 1334–1341. [[PubMed](#)]
17. Dobenecker, B.; Hertel-Böhnke, P.; Webel, A.; Kienzle, E. Renal phosphorus excretion in adult healthy cats after the intake of high phosphorus diets with either calcium monophosphate or sodium monophosphate. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2018**, *102*, 1759–1765. [[CrossRef](#)]
18. Dobenecker, B.; Webel, A.; Reese, S.; Kienzle, E. Effect of a high phosphorus diet on indicators of renal health in cats. *J. Feline Med. Surg.* **2018**, *20*, 339–343. [[CrossRef](#)]
19. Coltherd, J.C.; Staunton, R.; Colyer, A.; Thomas, G.; Gilham, M.; Logan, D.W.; Butterwick, R.; Watson, P. Not all forms of dietary phosphorus are equal: An evaluation of postprandial phosphorus concentrations in the plasma of the cat. *Br. J. Nutr.* **2019**, *121*, 270–284. [[CrossRef](#)]
20. Steffen, C.; Dobenecker, B. The phosphate additives phosphoric acid and sodium phosphate lead to hyperphosphatemia as well as increased FGF23 and renal phosphate excretion in healthy cats. *J. Urol. Ren. Dis* **2023**, *8*, 1338.
21. Böswald, L.; Dobenecker, B.; Clauss, M.; Kienzle, E. A comparative meta-analysis on the relationship of faecal calcium and phosphorus excretion in mammals. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2018**, *102*, 370–379. [[CrossRef](#)]
22. Böswald, L.F.; Matzek, D.; Popper, B. Digestibility of crude nutrients and minerals in C57Bl/6J and CD1 mice fed a pelleted lab rodent diet. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 1791. [[CrossRef](#)]
23. Böswald, L.F.; Wenderlein, J.; Siegert, W.; Straubinger, R.K.; Kienzle, E. True mineral digestibility in C57Bl/6J mice. *PLoS ONE* **2023**, *18*, e0290145. [[CrossRef](#)]
24. GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie). *Empfehlungen zur Energie-und Nährstoffversorgung von Pferden*; DLG: Frankfurt, Germany, 2014; Volume 11, p. 190.
25. Geor, R.J.; Harris, P.; Coenen, M. *Equine Applied and Clinical Nutrition: Health, Welfare and Performance*; Saunders Elsevier: Oxford, UK, 2013; p. 679.
26. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* **2021**, *372*, n71. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Baker, L.A. *The Comparison of Two Forms of Sodium and Potassium and Chloride versus Sulfur in the Dietary Cation-Anion Balance Equation and Subsequent Effects on Acid-Base Status and Mineral Balance in Sedentary Horses*; Oklahoma State University: Stillwater, OK, USA, 1995.
28. Baker, L.; Wall, D.; Topliff, D.; Freeman, D.; Teeter, R.; Breazile, J.; Wagner, D. Effect of dietary cation-anion balance in mineral balance in anaerobically exercised and sedentary horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1993**, *13*, 557–561. [[CrossRef](#)]
29. Barsnick, R. Untersuchungen zur Akzeptanz und Verdaulichkeit von Trockenschnitzeln Unterschiedlicher Konfektionierung beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 2003.
30. Berchtold, L. Untersuchungen zum Einfluss der Anionen-Kationen-Bilanz auf den Mineralstoff-und Säure-Basen-Haushalt bei Ponys. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Ingolstadt, Germany, 2009.
31. Caple, I.; Doake, P.; Ellis, P. Assessment of the calcium and phosphorus nutrition in horses by analysis of urine. *Aust. Vet. J.* **1982**, *58*, 125–131. [[CrossRef](#)]
32. Eilmans, I. Fettverdauung Beim Pferd Sowie die Folgen Einer Marginalen Fettversorgung. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1991.
33. Fowler, A.L. Factors Influencing Phosphorus Excretion by Horses. Ph.D. Thesis, University of Kentucky, Lexington, KY, USA, 2018.
34. Gomda, Y.M. Untersuchungen über die Renale, Fäkale und Kutane Wasser-und Elektrolytausscheidung bei Pferden in Abhängigkeit von Fütterungszeit, Futtermenge Sowie Bewegungsleistung. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1988.
35. Guldenthaupt, V. Verträglichkeit und Verdaulichkeit eines Alleinfutters für Pferde in Kombination mit Stroh. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1979.
36. Günther, C. Untersuchungen über die Verdaulichkeit und Verträglichkeit von Hafer, Quetschafer, Gerste und Mais Beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.
37. Hoyt, J.; Potter, G.; Greene, L.; Vogelsang, M.; Anderson, J., Jr. Electrolyte balance in exercising horses fed a control and a fat-supplemented diet. *J. Equine Vet. Sci.* **1995**, *15*, 429–435. [[CrossRef](#)]
38. Hoyt, J.; Potter, G.; Greene, L.; Anderson, J., Jr. Mineral balance in resting and exercised miniature horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1995**, *15*, 310–314. [[CrossRef](#)]

39. Krull, H. Untersuchungen über Aufnahme und Verdaulichkeit von Grünfütter beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.
40. Lavin, T.; Nielsen, B.; Zingsheim, J.; O'Connor-Robison, C.; Link, J.; Hill, G.; Shelton, J. Effects of phytase supplementation in mature horses fed alfalfa hay and pelleted concentrate diets. *J. Anim. Sci.* **2013**, *91*, 1719–1727. [\[CrossRef\]](#)
41. Lindemann, G. Untersuchungen über den Einfluss von Lactose- und Stärkezulagen auf die Verdaulichkeit von NH₃-aufgeschlossenem Stroh beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1982.
42. McKenzie, R.; Blaney, B.; Gartner, R. The effect of dietary oxalate on calcium, phosphorus and magnesium balances in horses. *J. Agric. Sci.* **1981**, *97*, 69–74. [\[CrossRef\]](#)
43. Mueller, R.K. Effect of Dietary Cation-Anion Difference on Acid-Base Status Energy Digestibility and Mineral Balance in Sedentary Horses Fed Varying Levels and Sources of Starch. Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA, 1999.
44. Mundt, H.-C. Untersuchungen über die Verdaulichkeit von Aufgeschlossenem Stroh Beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1978.
45. Nehring, T. Einfluss der Futterart auf die Nettoabsorption von Calcium sowie Magnesium und Phosphor Beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1991.
46. Neustädter, L.-T. Untersuchungen zu Möglichen Auswirkungen einer Unterschiedlichen Mengenelementversorgung auf den Mineralstoffhaushalt von Pferden. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 2015.
47. O'Connor, C.; Nielsen, B.; Woodward, A.; Spooner, H.; Ventura, B.; Turner, K. Mineral balance in horses fed two supplemental silicon sources. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2008**, *92*, 173–181. [\[CrossRef\]](#)
48. Olsman, A.; Huurdeman, C.; Jansen, W.; Haaksma, J.; van Oldruitenborgh-Oosterbaan, M.S.; Beynen, A. Macronutrient digestibility, nitrogen balance, plasma indicators of protein metabolism and mineral absorption in horses fed a ration rich in sugar beet pulp. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2004**, *88*, 321–331. [\[CrossRef\]](#)
49. Pérez Noriega, H.R. Untersuchungen über den Postprandialen Wasser- und Elektrolythaushalt des Pferdes unter Variation des Wasser- und Futterangebots. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1989.
50. Pferdekamp, M. Einfluss Steigender Proteinmengen auf den Stoffwechsel des Pferdes. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1978.
51. Roose, K.; Hoekstra, K.; Pagan, J.; Geor, R. Effect of an Aluminum Supplement on Nutrient Digestibility and Mineral Metabolism in Thoroughbred Horses. 2001, pp. 364–369. Available online: https://www.researchgate.net/publication/238095379_Effect_of_an_aluminum_supplement_on_nutrient_digestibility_and_mineral_metabolism_in_Thoroughbred_horses (accessed on 6 August 2024).
52. Saastamoinen, M.; Särkijärvi, S.; Valtonen, E. The Effect of Diet Composition on the Digestibility and Fecal Excretion of Phosphorus in Horses: A Potential Risk of P Leaching? *Animals* **2020**, *10*, 140. [\[CrossRef\]](#)
53. Schiele, K. Einfluss Reduzierter Futterzuteilung Zweier Verschiedener Heuqualitäten auf Passagedauer und Verdaulichkeit bei Ponies. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Ingolstadt, Germany, 2008.
54. Schmidt, M. Untersuchungen über die Verträglichkeit und Verdaulichkeit eines Pelletierten Mischfutters für Pferde in Kombination mit Heu und NH₃-Aufgeschlossenem Stroh. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1980.
55. Schnurpel, B. Einfluss von Futterart und Höhe der Ca-Aufnahme auf Ca-Blutspiegel und Renale Ca-Exkretion beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1991.
56. Schryver, H.; Hintz, H.; Craig, P. Phosphorus metabolism in ponies fed varying levels of phosphorus. *J. Nutr.* **1971**, *101*, 1257–1263. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
57. Schryver, H.; Parker, M.; Daniluk, P.; Pagan, K.; Williams, J.; Soderholm, L.; Hintz, H. Salt consumption and the effect of salt on mineral metabolism in horses. *Cornell Vet.* **1987**, *77*, 122–131. [\[PubMed\]](#)
58. Schulze, K. Untersuchungen zur Verdaulichkeit und Energiebewertung von Mischfuttermitteln für Pferde. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1987.
59. Stürmer, K. Untersuchungen zum Einfluss der Fütterung auf den Säure-Basen-Haushalt bei Ponys. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany, 2005.
60. Teleb, H. Untersuchungen über den Intestinalen Ca-Stoffwechsel beim Pferd nach Variierender Ca-Zufuhr und einer Oxalatzulage. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.
61. Van Doorn, D.; Schaafstra, F.; Wouterse, H.; Everts, H.; Estepa, J.; Aguilera-Tejero, E.; Beynen, A. Repeated measurements of P retention in ponies fed rations with various Ca: P ratios. *J. Anim. Sci.* **2014**, *92*, 4981–4990. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
62. Van Doorn, D.; Everts, H.; Wouterse, H.; Homan, S.; Beynen, A. Influence of high phosphorus intake on salivary and plasma concentrations, and urinary phosphorus excretion in mature ponies. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2011**, *95*, 154–160. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
63. Van Doorn, D.; Van der Spek, M.; Everts, H.; Wouterse, H.; Beynen, A. The influence of calcium intake on phosphorus digestibility in mature ponies. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2004**, *88*, 412–418. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
64. Van Doorn, D.; Everts, H.; Wouterse, H.; Beynen, A. The apparent digestibility of phytate phosphorus and the influence of supplemental phytase in horses. *J. Anim. Sci.* **2004**, *82*, 1756–1763. [\[CrossRef\]](#)

65. Verthein, B. Auswirkungen Einer Enzymgabe auf die Futterverdaulichkeit beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1981.
66. von Wedemeyer, H.C. Untersuchungen zum Calcium-, Phosphor-und Natrium-Umsatz des erwachsenen Pferdes. Ph.D. Thesis, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Germany, 1970.
67. Wall, D.; Topliff, D.; Freeman, D.; Wagner, D.; Breazile, J.; Stutz, W. Effect of dietary cation-anion balance on urinary mineral excretion in exercised horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1992**, *12*, 168–171. [\[CrossRef\]](#)
68. Weidenhaupt, K. Untersuchungen zum Kaliumstoffwechsel des Pferdes. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1977.
69. Lucas, H.L. Stochastic elements in biological models; their sources and significance. *Stoch. Models Med. Biol.* **1964**, 355–385.
70. Lensing, A. Eine Pilotstudie zum Einfluß der Fütterung auf Knochenmarker beim Pferd. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Ingolstadt, Germany, 1998.
71. Topliff, D.; Kennerly, M.; Freeman, D.; Teeter, R.; Wagner, D. Changes in urinary and serum calcium and chloride concentrations in exercising horses fed varying cation-anion balances. In Proceedings of the 11th Conference of the Equine Nutrition and Physiology Symposium, Stillwater, OK, USA, 18–20 May 1989; p. 1989.
72. Ralston, S.L. The Effect of Diet on Acid-Base Status and Mineral Excretion in Horses. *Equine Pract.* **1994**, *16*, 10–13.
73. Schryver, H.; Hintz, H.; Lowe, J. Calcium and phosphorus inter-relationships in horse nutrition. *Equine Vet. J.* **1971**, *3*, 102–109. [\[CrossRef\]](#)
74. Kienzle, E.; Zeyner, A. The development of a metabolizable energy system for horses. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2010**, *94*, e231–e240. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
75. Mack, J.; Alexander, L.; Morris, P.; Dobenecker, B.; Kienzle, E. Demonstration of uniformity of calcium absorption in adult dogs and cats. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2015**, *99*, 801–809. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
76. Jenkins, K.; Phillips, P. The Mineral Requirements of the Dog: II. The Relation of Calcium, Phosphorus and Fat Levels to Minimal Calcium and Phosphorus Requirements. *J. Nutr.* **1960**, *70*, 241–246. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
77. Dobenecker, B. Influence of calcium and phosphorus intake on the apparent digestibility of these minerals in growing dogs. *J. Nutr.* **2002**, *132*, 1665S–1667S. [\[CrossRef\]](#)
78. Stockman, J.; Villaverde, C.; Corbee, R.J. Calcium, phosphorus, and vitamin D in dogs and cats: Beyond the bones. *Vet. Clin. Small Anim. Pract.* **2021**, *51*, 623–634. [\[CrossRef\]](#)
79. Cihak, A.; Wilkens, M.R.; Guschlbauer, M.; Mrochen, N.; Schröder, B.; Feige, K.; Breves, G. In vitro studies on intestinal calcium and phosphate transport in horses. *Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol.* **2012**, *161*, 259–264. [\[CrossRef\]](#)
80. Grunes, D.; Welch, R. Plant contents of magnesium, calcium and potassium in relation to ruminant nutrition. *J. Anim. Sci.* **1989**, *67*, 3485–3494. [\[CrossRef\]](#)
81. Rucker, R.; Storms, D. Interspecies comparisons of micronutrient requirements: Metabolic vs. absolute body size. *J. Nutr.* **2002**, *132*, 2999–3000. [\[CrossRef\]](#)
82. Rucker, R. Allometric scaling, metabolic body size and interspecies comparisons of basal nutritional requirements. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2007**, *91*, 148–156. [\[CrossRef\]](#)
83. NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Dogs and Cats*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2006; p. 424.
84. NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Horses: Sixth Revised Edition*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2007; p. 360.
85. Kostytschew, S.; Berg, V. Die form der calciumverbindungen in lebenden pflanzengewebe. *Z. Fur Wiss. Biologie. Abt. E Planta* **1929**, *8*, 55–67. [\[CrossRef\]](#)
86. Pierce, E.C.; Appleman, C. Role of ether soluble organic acids in the cationanion balance in plants. *Plant Physiol.* **1943**, *18*, 224. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
87. Swartzman, J.; Hintz, H.; Schryver, H. Inhibition of calcium absorption in ponies fed diets containing oxalic acid. *Am. J. Vet. Res.* **1978**, *39*, 1621–1623. [\[PubMed\]](#)
88. Blaney, B.; Gartner, R.; McKenzie, R. The inability of horses to absorb calcium from calcium oxalate. *J. Agric. Sci.* **1981**, *97*, 639–641. [\[CrossRef\]](#)
89. Coenen, M.; Vervuert, I. *Pferdefütterung*; Georg Thieme Verlag: Stuttgart, Germany, 2019.
90. Hurwitz, S. Homeostatic control of plasma calcium concentration. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* **1996**, *31*, 41–100. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
91. Rosol, T.J.; Capen, C.C. Calcium-regulating hormones and diseases of abnormal mineral (calcium, phosphorus, magnesium) metabolism. In *Clinical Biochemistry of Domestic Animals*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1997; pp. 619–702.
92. Inoue, Y.; Osawa, T.; Matsui, A.; Asai, Y.; Murakami, Y.; Matsui, T.; Yano, H. Changes of serum mineral concentrations in horses during exercise. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* **2002**, *15*, 531–536. [\[CrossRef\]](#)
93. Weisrock, K.U.; Winkelsett, S.; Martin-Rosset, W.; Forssmann, W.-G.; Parvizi, N.; Coenen, M.; Vervuert, I. Long-term effects of intermittent equine parathyroid hormone fragment (ePTH-1-37) administration on bone metabolism in healthy horses. *Vet. J.* **2011**, *190*, e130–e134. [\[CrossRef\]](#)

94. Vervuert, I.; Kienzle, E. Assessment of Nutritional Status from Analysis of Blood and Other Tissue Samples. In *Equine Applied and Clinical Nutrition*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013; pp. 425–442.
95. Bilezikian, J.P.; Raisz, L.G.; Martin, T.J. *Principles of Bone Biology*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2008.
96. Coenen, M.; Kienzle, E.; Vervuert, I.; Zeyner, A. Recent German developments in the formulation of energy and nutrient requirements in horses and the resulting feeding recommendations. *J. Equine Vet. Sci.* **2011**, *31*, 219–229. [[CrossRef](#)]
97. Siedler, S. Der Einfluss Verschiedener Phosphorquellen bei Alimentärer Phosphorübersorgung auf die Phosphorverdaulichkeit und auf Ausgewählte Blutparameter beim Hund. Imu. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität Munich, Munich, Germany, 2018.
98. Calvo, M.S.; Uribarri, J. Public health impact of dietary phosphorus excess on bone and cardiovascular health in the general population. *Am. J. Clin. Nutr.* **2013**, *98*, 6–15. [[CrossRef](#)]
99. Harrington, D.; Walsh, J. Equine Magnesium Supplements: Evaluation of Magnesium Oxide, Magnesium Sulphate and Magnesium Carbonate in Foals Fed Purified Diets. *Equine Vet. J.* **1980**, *12*, 32–33. [[CrossRef](#)]
100. Wilkinson, S.; Welch, R.M.; Mayland, H.; Grunes, D. *Magnesium in Plants: Uptake, Distribution, Function, and Utilization by Man and Animals*; University of Basel: Basel, Switzerland, 1990.
101. Hintz, H.; Schryver, H. Magnesium metabolism in the horse. *J. Anim. Sci.* **1972**, *35*, 755–759. [[CrossRef](#)]
102. Vervuert, I.; Stanik, K.; Coenen, M. Effects of different levels of calcium and phosphorus intake on calcium homeostasis in exercising horses. *Equine Vet. J.* **2006**, *38*, 659–663. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
103. Toribio, R.E.; Kohn, C.W.; Rourke, K.M.; Levine, A.L.; Rosol, T.J. Effects of hypercalcemia on serum concentrations of magnesium, potassium, and phosphate and urinary excretion of electrolytes in horses. *Am. J. Vet. Res.* **2007**, *68*, 543–554. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
104. Stewart, A.J. Magnesium homeostasis and derangements. *Equine Fluid Ther.* **2015**, 76–87. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

3.2. A Meta-Analysis on Quantitative Sodium, Potassium and Chloride Metabolism in Horses and Ponies



animals



Review

A Meta-Analysis on Quantitative Sodium, Potassium and Chloride Metabolism in Horses and Ponies

Isabelle Maier * and Ellen Kienzle

Animal Nutrition and Dietetics, Department of Veterinary Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, Schoenleutnerstr. 8, D-85764 Oberschleissheim, Germany; kienzle@tiph.vetmed.uni-muenchen.de

* Correspondence: isabelle.m.maier@gmail.com

Simple Summary: The current meta-analysis reviewed the literature researching the metabolism of sodium (Na), potassium (K) and chloride (Cl) regarding possible differences between ponies and horses, the effect of exercise and the impact of water deficiency. It was found that working equines were able to digest Na and, to a lesser extent, K more effectively than non-working animals. Regarding Cl availability, there was no difference between working equines and those in maintenance. Ponies were able to digest Cl better than horses, but without any relevance for practical feeding. Water deficiency affected the K and Cl metabolism to a minor extent, while the Na metabolism remained unaffected.

Abstract: The goal of this meta-analysis was to (i) identify any potential differences in the apparent and true digestibility, renal excretion, and retention between ponies and horses and (ii) examine the impact of work on these parameters. Additionally, the study aimed to (iii) evaluate the effects of water deficiency. This meta-analysis used data from 33 studies and plotted them in diagrams similar to the Lucas test against mineral intake. Three studies involved ponies that were later diagnosed with pituitary pars intermedia dysfunction (PPID). These were compared with other data to identify quantitative differences, as they may have clinical significance. If any significant difference was observed, the data were not used for the evaluation of the aforementioned goals. Data were compared within certain intake ranges using *t*-tests and ANOVA, followed by Holm–Sidak post hoc tests. Working equines showed significantly higher apparent and true Na digestibility and lower endogenous faecal Na losses compared to non-working ponies and horses, suggesting a rather important role of the gastrointestinal tract in the regulation of Na metabolism in equines. The true K digestibility was also significantly higher in working animals than in non-working ones, but the differences were quantitatively smaller than for Na. Retention plus sweat losses for Na, K and Cl were higher in working animals compared to equines in maintenance. Horses showed higher Na and K retention plus sweat losses compared to ponies. These effects are likely attributable to greater sweat losses in working equines, particularly horses. The apparent and true Cl digestibility was significantly higher in ponies than in horses. A clinical relevance of this observation is rather unlikely, as the digestibility remained very high in both. Water deprivation influenced serum Cl levels and increased renal K excretion, which subsequently led to reduced K retention. Compared to other animal species, no effects on blood K levels or Na metabolism were observed. The ponies diagnosed with PPID exhibited a significantly lower apparent K digestibility compared to healthy animals, which could be an important factor to consider when feeding soaked hay, due to potential electrolyte losses during soaking.

Keywords: pony; horse; mineral; metabolism; sodium; potassium; chloride; digestibility



Academic Editor: Sven Dänicke

Received: 8 November 2024

Revised: 11 December 2024

Accepted: 10 January 2025

Published: 13 January 2025

Citation: Maier, I.; Kienzle, E. A Meta-Analysis on Quantitative Sodium, Potassium and Chloride Metabolism in Horses and Ponies. *Animals* **2025**, *15*, 191. <https://doi.org/10.3390/ani15020191>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Na, K and Cl are crucial minerals in metabolism. Na and K are responsible for the generation of cell membrane potentials and, in this context, are essential for muscle and nerve cell functionality [1]. Additionally, Na plays a key role in blood pressure regulation [2].

Na deficiency in horses may lead to behavioural changes, such as excessive licking, affect the central nervous system, and can cause seizures [3,4]. Excessive Na and Cl intake due to intense salt supplementation can be associated with gastric ulcers [5], fluid retention in tissues and metabolic acidosis [6]. Muscle weakness and paralysis can be caused by K deficiency [7]. However, a K deficiency is almost non-existent in equines [8], as rations for horses are typically rich in K [9]. One factor that could contribute to K deficiency is soaking hay, as this process can lead to significant K losses [10–12]. A considerable excess of K can lead to disturbances in heart function [13] and can be involved in the development of hyperkalemic periodic paralysis (HYPP) in predisposed horses [14]. Cl deficiency has been documented to lead to metabolic alkalosis [8]. However, it is likely that this is not primarily caused by Cl deficiency itself, but rather by the opposite changes in bicarbonate concentration that typically accompany alterations in Cl balance [14]. For example, in hard-working horses experiencing excessive chloride losses, it has been reported that bicarbonate is reabsorbed by the kidneys to maintain electrical neutrality and that this bicarbonate reabsorption can lead to the development of metabolic alkalosis [15].

The recommendations for the electrolyte supply of horses show an enormous range. For instance, the recommended Na requirements for maintenance for a 500 kg horse range from 3 to 13 g per day [16–18]. For working horses, the differences are even more relevant. The recommended intake for a middle-sized horse engaged in hard work ranges from 22 to about 113 g Na per day [16–19]. Revisiting the underlying data might help explain the different recommendations.

Faecal endogenous losses, apparent and true digestibility of minerals as well as data on renal excretion and retention are important factors for factorial calculation of mineral requirements for maintenance [18,20]. A previous meta-analysis by Kienzle and Burger [20] showed a low true digestibility of Na in horses. The same was observed for other large hindgut fermenters [21–23]. In the present meta-analysis, new data were included. In light of a previous meta-analysis by Maier and Kienzle [24], which identified significant differences between ponies and horses regarding apparent Mg digestibility, the present meta-analysis aimed to evaluate whether such differences also exist for the minerals Na, K and Cl. In addition to apparent digestibility, particular attention was given to potential disparities in true digestibility and renal excretion. Furthermore, the effect of exercise on the aforementioned parameters was also investigated. To the best of our knowledge, no data are currently available on the extent to which physical activity influences the digestibility of Na, K and Cl. A meta-analysis is particularly well suited for this purpose, making it a valuable aspect to address within the scope of the present study. In two studies, experiments were conducted under water restrictions. Since electrolytes, particularly Na, are closely interconnected with water balance [2], these data were specifically marked, and the impact of water restrictions on the mentioned parameters was also analysed. Coincidentally, data were found from three studies with ponies which were later diagnosed with PPID. This enabled a comparison of the quantitative metabolism of the three minerals mentioned in preclinical PPID with other data.

2. Materials and Methods

The following databases were used for literature research: Google Scholar, the database information system (DBIS) of the LMU Munich, PubMed and the Online Public Access

Catalogue (OPAC) of the LMU Munich and the Bavarian State Library (BSB). “Mineral digestibility, sodium, potassium, chloride, horse, pony, mare, gelding, salt, sodium chloride, saline, salted, digestibility, availability, minerals, set elements, electrolytes, renal, kidney, faecal, serum, blood, excretion, resorption or absorption” were the main keywords searched for in different constellations. Studies that were used in a previous meta-analysis were also included [20]. Only data from studies including mature equines (aged over 36 months, as defined by the Society of Nutrition Physiology (GfE) [18]), which were not lactating or pregnant, were considered. The analysis involved both equines at maintenance and those during work (if the animals were exercised, as stated in the respective study), which was indicated accordingly. Experiments with water deficiency (one trial by Hipp-Quarton [25] and four trials by Pérez-Noriega [26]) were also considered and marked separately.

Analogous to the study by Maier and Kienzle [24], only studies that provided data on at least two of the following parameters were included: daily mineral intake, apparent digestibility, faecal excretion, renal excretion, and serum blood levels. Information on the body weight or at least the breed of the animals had to be disclosed to estimate the body weight. This estimation was based on the body mass in kg of large adult horses with a body condition score (BCS) of 5–6 [18]. Additionally, details on age, breed and feed composition were required. Both individual data and group averages were considered.

This meta-analysis followed the guidelines of the Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statement [27]. The most recent source search was completed in September 2024. The following studies were utilized: [3,25,26,28–57]. A flowchart illustrating the search and selection process is provided in Figure S1 of the Supplementary Material, along with Table S1, which details the number of studies and participants used in each graph.

The division into pony and horse was based on body weight (ponies < 300 kg; horses > 300 kg).

The requirement recommendations set by GfE [18] were applied. The reference range for serum mineral concentration was taken from the book *Equine Applied and Clinical Nutrition: Health, Welfare and Performance* [58].

For the meta-analysis, all data on intake and excretion were calculated per kilogram (kg) of metabolic body weight (MBW). Plots were created similar to those in the study by Maier and Kienzle [24]. For all minerals, the Lucas test [20,59,60], with which an apparently digested amount of a nutrient is plotted against intake, was used. Given that the data distribution is appropriate for linear regression analysis, multiplying the regression coefficient by 100 will indicate true digestibility (in%), while the intercept will indicate the endogenous losses. The mineral requirement to replace faecal losses is then calculated by dividing the endogenous losses by the true digestibility and multiplying by 100 [24].

Data on apparent mineral digestibility, serum concentration, renal excretion, and retention were plotted against the intake of the respective mineral. The retention included electrolyte losses via sweat in working animals and was calculated as follows: mineral intake minus faecal losses minus urinary losses. An evaluation of retention, excluding electrolyte losses through sweat (calculated as mineral intake minus faecal losses, urinary losses and sweat losses), was also conducted for those studies where data on sweat losses were available.

Outliers, defined by three standard deviations, appeared in all serum plots and were therefore eliminated from these diagrams. One of these outliers concerned the data from Baker [28], whose serum levels for all minerals were in a range that could have caused clinical issues. It is likely that there is an error in the units at some point. Additionally, the data of Neustädter for Na serum levels [43] and the data of O'Connor for the K serum

level plot [44] produced outliers. Both used different measurement methods than the other studies and were therefore not considered for the aforementioned graphs.

In almost all CI diagrams, the data of Schryver [49] represented outliers. In addition, the CI balance given in this publication was positive, but renal excretion was higher than intake. Presumably, there is some error in these data; therefore, the data were removed from all CI plots.

In the studies of Stürmer [52], Berchtold [31] and Schiele [47], two ponies were included, which were, after the completion of the study, diagnosed with PPID. An examination was conducted to determine whether any abnormalities existed in Na digestibility for these ponies. No significant differences were found. Therefore, the aforementioned studies were used for the calculations of Na. For K, the affected animals showed an exceptionally low K digestibility of around 60%, even before diagnosis. In the study of Schiele [47], one animal consuming overhanging hay had an apparent K digestibility of only 44%. In the other studies stated above, only the average across all four ponies used was provided. Serum K levels were within the reference range. Renal excretion in relation to intake but not to the apparently digested amount of K showed a difference between the affected and unaffected ponies. The mean retention, however, was clearly negative (-215 ± 16 mg/kg MBW) compared to all other studies (55.9 ± 34.2 mg/kg MBW). Therefore, the studies of Stürmer [52], Berchtold [31] and Schiele [47] were removed from the calculations on K. Data on CI, including the affected ponies (i.e., Stürmer [52] and Berchtold [31]), were also checked for systematic differences. The apparent digestibility of CI was significantly higher than in other studies ($p = 0.03$). There were no data on serum CI. Renal excretion as a percentage of intake for the studies stated above was significantly lower compared to all other studies ($p = 0.03$), while the retention plus sweat losses as a percentage of intake was significantly higher ($p = 0.01$). In turn, these studies were not considered for investigations regarding CI.

The comparison of two means was performed using Student's *t*-test or, if the data were not normally distributed, the Mann–Whitney rank sum test was applied. For analyses involving more than one contributing factor, a two-way ANOVA was conducted utilizing the Holm–Sidak post hoc test for all pairwise comparisons. The aforementioned tests were conducted using SigmaPlot 14 (Systat Software, San Jose, CA, USA). Hyperbolic regressions were computed as nonlinear inverse first-order regressions using SigmaPlot. Linear regressions were also determined using SigmaPlot. Comparisons of linear regression lines were made using the BiAS program with the test of H_0 (BiAS. für Windows, Version 11.01, 2023, epsilon-Verlag, Frankfurt, Germany). The significance level was defined at <0.05 .

3. Results

3.1. Sodium

3.1.1. Na Digestibility

In Figure 1, the apparent digestibility of Na is plotted against Na intake. It shows a typical hyperbolic curve with low apparent digestibility at an intake around or below the requirement recommendations (27 mg/kg MBW, following GfE [18]). Working ponies and horses appeared to have a higher apparent Na digestibility, especially at a low range of intake. For a medium level of work (30% above maintenance), the recommended Na requirement amounts to approximately 120 mg/kg MBW [18]. In the range below a Na intake of 120 mg/kg MBW, there was a highly significant difference in apparent Na digestibility between working and non-working horses (median working: 65%, $n: 39$; median not working: 33%, $n: 135$; $p < 0.001$). There was no significant difference in apparent Na digestibility between ponies and horses across the whole range of intake (median pony:

58%, n: 198; median horse: 52%, n: 164; $p = 0.08$). The same was true if only trials with an intake above the requirements were considered.



Figure 1. Relationship between Na intake (in mg/kg MBW) and apparent Na digestibility (in%). Regression lines mark the data of horses compared to ponies.

The amount of apparently digested Na in relation to intake is shown in Figure 2. Dark green dots mark the animals that were exercised during the experiments. Non-working ponies and horses are represented by light green triangles. Trendlines were calculated for either working or non-working ponies and horses (Figure 2). There was a significant difference between these trendlines ($p = 0.003$), which represent true digestibility when multiplied by 100. The standard error of the mean (SEM) of the regression line was much higher in the non-working animals.

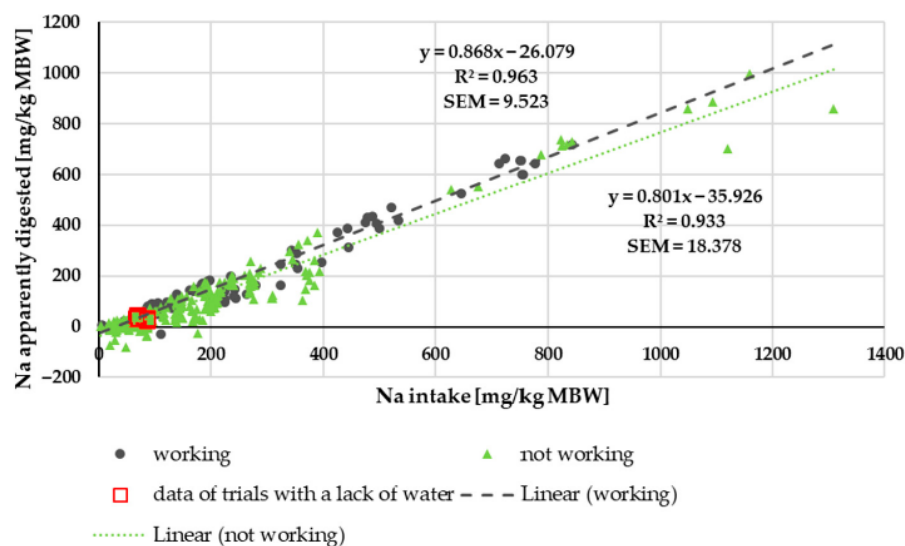


Figure 2. Apparently digested Na in relation to Na intake (both in mg/kg MBW). Trendlines mark working and non-working horses and ponies.

3.1.2. Serum Na Concentration

Figure 3 shows the serum Na concentration in relation to Na intake. The serum Na level was almost the same, both above and below the recommended requirements of 27 mg/kg MBW following GfE [18] (mean up to this requirement = 134.88 mg/kg MBW; mean above this requirement = 135.98 mg/kg MBW). There was no effect of being a pony

or a horse or of working or not working. The distribution of the data did not allow for a statistical evaluation using ANOVA. The data on animals with water deficiency did not deviate from the overall dataset.

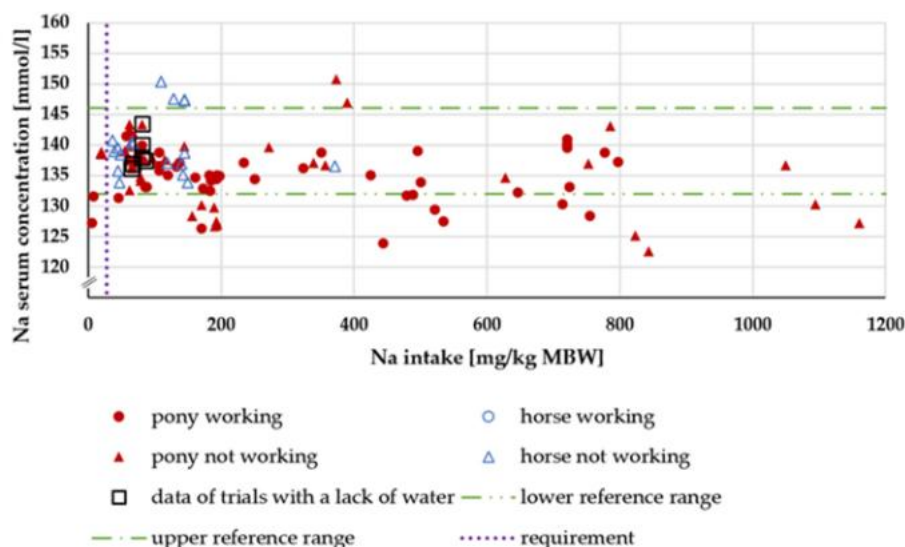


Figure 3. Serum Na concentration (in mmol/L) plotted against Na intake (in mg/kg MBW).

3.1.3. Na Renal Excretion

There was no effect of being a pony or horse on renal Na excretion in relation to intake or to apparently digested Na. Working or not working, however, displayed a clearcut effect in both cases. Figure 4 shows the renal Na excretion in relation to apparently digested Na. It was visibly higher in non-working ponies and horses.

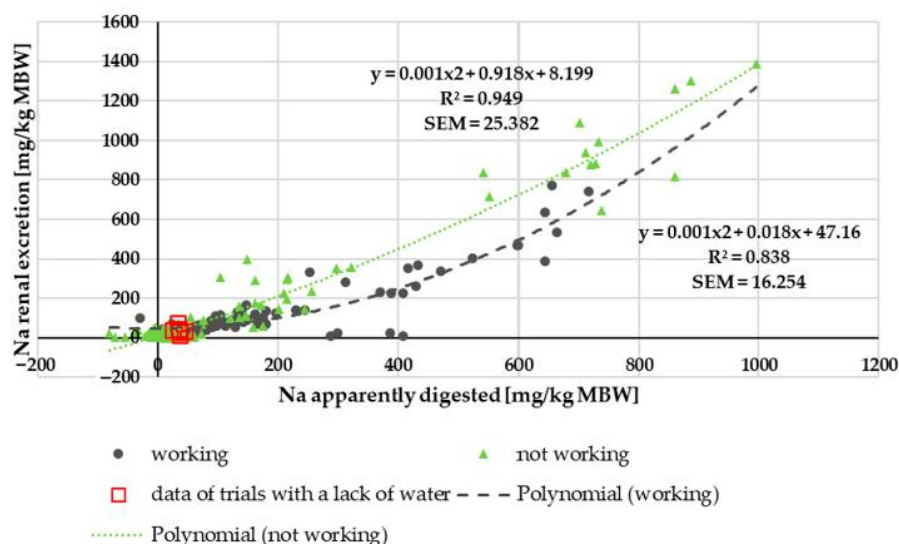


Figure 4. Relationship between apparently digested Na and renal Na excretion (both in mg/kg MBW). Trendlines mark working and non-working horses and ponies.

3.1.4. Na Retention (Plus Sweat Losses)

Na intake minus faecal and renal excretion represents retention and sweat losses. In Figure 5, this parameter is plotted against Na intake. Retention in non-working ponies and horses rose with increasing intake. At very high intakes, however, it decreased again. This happened in ponies and in horses; however, the effect was stronger in horses. A two-factorial ANOVA of Na retention plus sweat losses in percentage of Na intake with the factors pony vs. horse and working vs. not working showed a significant difference

between working and non-working ponies and horses ($p < 0.001$). Working horses had a higher retention plus sweat losses in percentage of intake than working ponies (horse working: mean = 24%; pony working: mean = 15%). In non-working animals, it was the opposite: horses had a more negative retention in percentage of intake than ponies (horse not working: mean = −22%; pony not working: mean = −16%). The retention in non-working animals in percentage of intake averaged −18%. The retention plus sweat losses in working animals in percentage of intake averaged 17%.

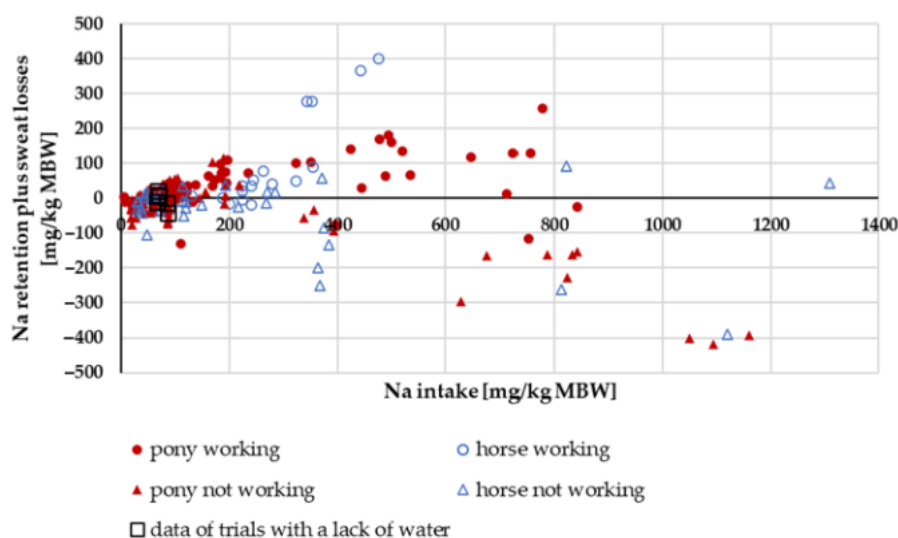


Figure 5. Relationship between Na intake and Na retention plus sweat losses (both in mg/kg MBW).

After accounting for sweat losses, the retention of Na was predominantly negative, whereas the losses through sweat were comparatively high (Figure 6). The apparent digestibility in the studies considered averaged 76%.

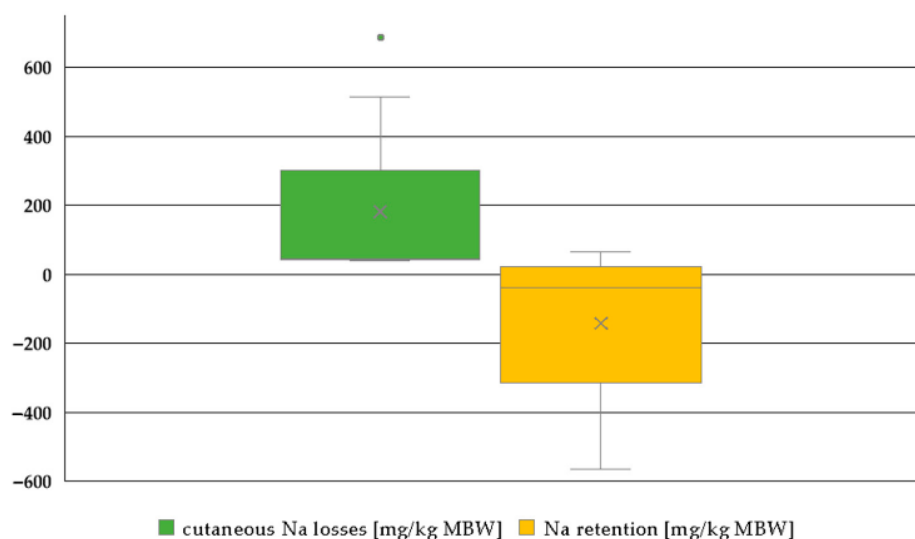


Figure 6. Box plot of Na sweat losses and Na retention (both in mg/kg MBW). The horizontal line represents the median, while the cross indicates the mean. Only data on working ponies, including information on Na sweat losses, were available [25,26,33,36,38]. Trials with water deficiency were excluded.

3.2. Potassium

3.2.1. K Digestibility

In Figure 7, the apparent K digestibility is plotted against K intake. A typical hyperbolic curve emerged. Data from trials with a lack of water did not exhibit any anomalies. The regression lines between ponies and horses did not show any difference.

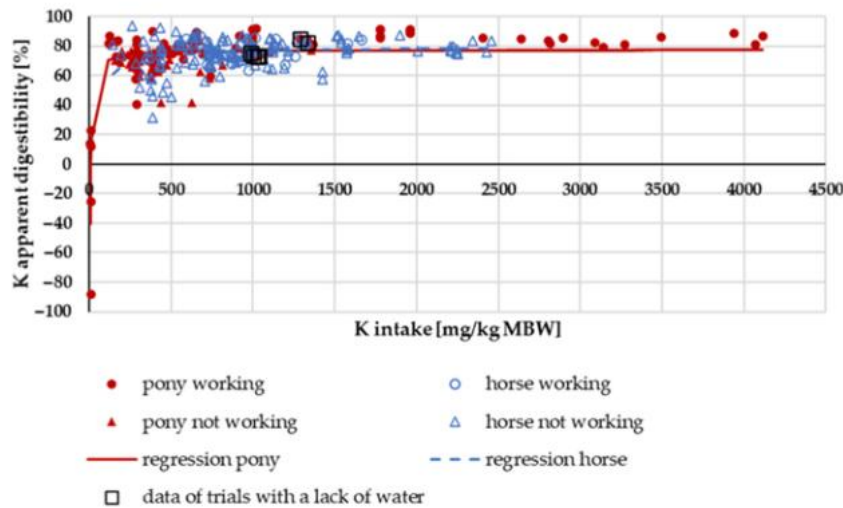


Figure 7. Apparent K digestibility (in%) plotted against K intake (in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered. Regression lines mark the data of horses compared to ponies.

Figure 8 shows the apparently digested K quantity in relation to K intake. There was an almost linear relationship between the factors. Studies with water deficiency did not produce outliers in this plot. Trendlines were calculated for either working or non-working ponies and horses (Figure 8). There was a significant difference between these trendlines ($p < 0.001$). The same applied when the data were considered up to an intake of 2500 mg/kg MBW. Above this intake level, only working animals were represented due to the data distribution. No differences between ponies and horses were observed for the non-working animals ($p = 0.47$). Similarly, there was no significant effect of being a pony or horse among the working animals ($p = 0.48$).

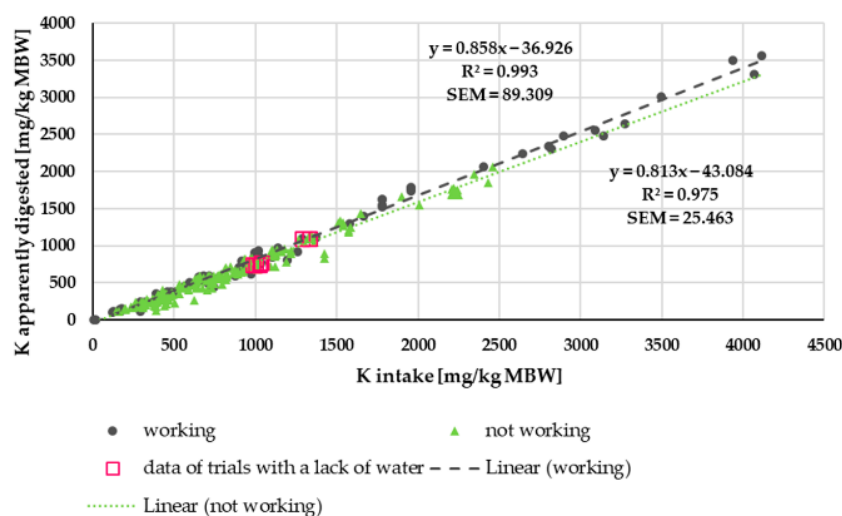


Figure 8. Relationship between K intake and apparently digested K (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered. Trendlines mark working and non-working horses and ponies.

3.2.2. Serum K Concentration

Figure 9 shows the serum K levels in relation to K intake. At an intake below the recommended requirements (139 mg/kg MBW [18]), K serum was partly below the minimum reference range; otherwise, the K intake showed no influence. There was no effect of being a pony or a horse ($p = 0.34$).

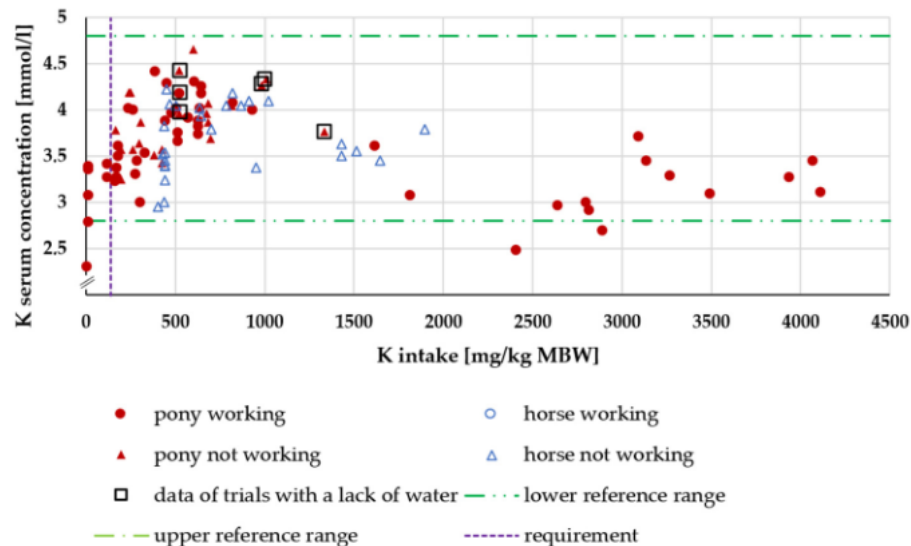


Figure 9. Serum K concentration (in mmol/l) in relation to K intake (in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered.

3.2.3. K Renal Excretion

The renal K excretion shows an almost linear increase with rising intake (Figure 10). With an intake of around 0 mg/kg MBW, renal K excretion was almost non-existent. The recommended K requirement for maintenance is 139 mg/kg MBW [18]. At an intake of more than 2500 mg/kg MBW, only data on ponies were available due to the data distribution. A two-factorial ANOVA of renal K excretion with the factors pony vs. horse and working vs. not working at an intake of 139–2500 mg/kg MBW showed no difference between ponies and horses or working and non-working ponies and horses. There was no significant interaction between these factors ($p = 0.26$). Data from studies with water deficiency showed renal excretions in the upper range.

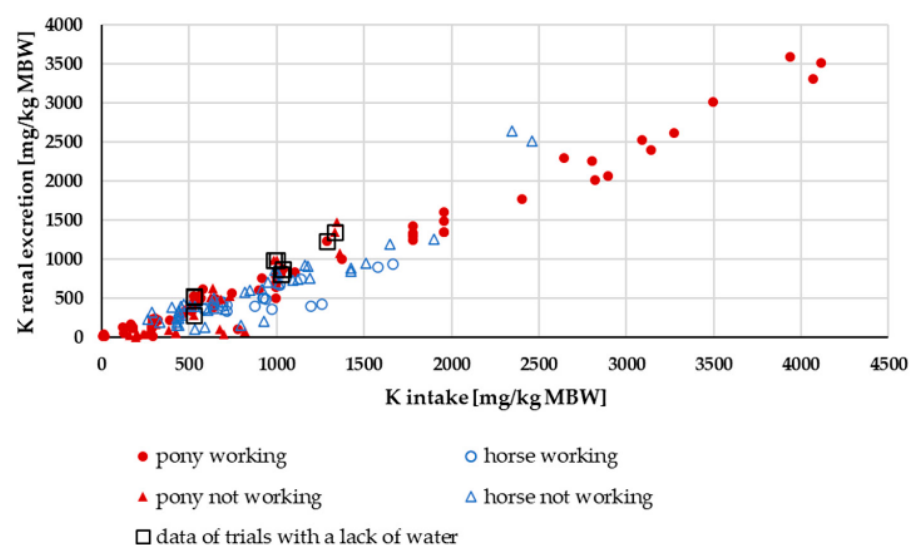


Figure 10. Renal K excretion plotted against K intake (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered.

3.2.4. K Retention Plus Sweat Losses

In Figure 11, retention of K (including sweat losses) is plotted against K intake. Retention plus sweat losses in working and non-working ponies and horses increased with increasing intake. At very high intakes, however, it decreased again in a pattern similar to that of Na. At an intake range of 139–2000 mg/kg MBW, horses showed significantly higher retention and sweat losses than ponies. There was a significant difference between working and non-working ponies and horses (two-factorial ANOVA of K retention plus sweat losses at an intake range of 139–2000 mg/kg MBW with the factors pony vs. horse and working vs. not working: mean ponies = 65.3 mg/kg MBW; mean horses = 150.9 mg/kg; mean working = 157 mg/kg MBW; mean not working = 59.3 mg/kg MBW; $p = 0.02$). With a K intake of above 2000 mg/kg MBW, the data distribution did not allow for a statistical evaluation for the amount of K retention plus sweat losses or for the factors pony or horse and working or not working. Data from experiments with water deficiency were significantly lower compared to other data in the aforementioned range ($p = 0.001$; Figure 11). So were the results of Baker [28], who added K as K salts, whereas in all other experiments, K originated from plants.

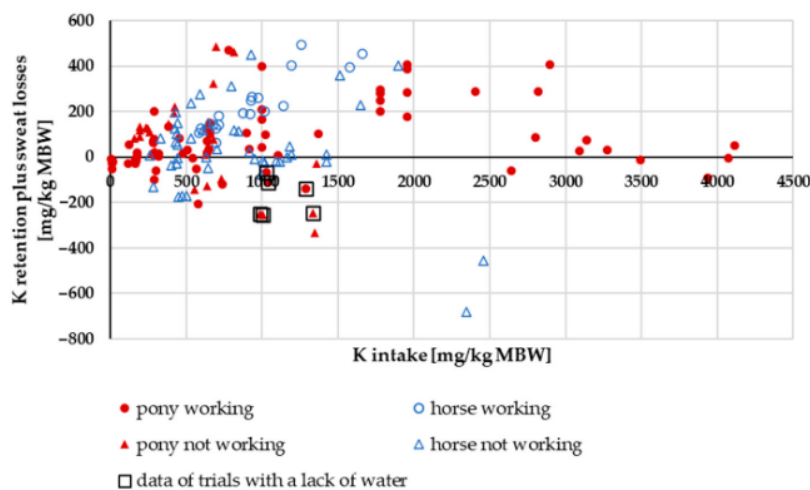


Figure 11. K retention plus sweat losses in relation to K intake (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered.

K sweat losses and K retention after deducting sweat losses showed a pattern similar to that of Na, yet the K retention remained entirely in the negative range (Figure 12).

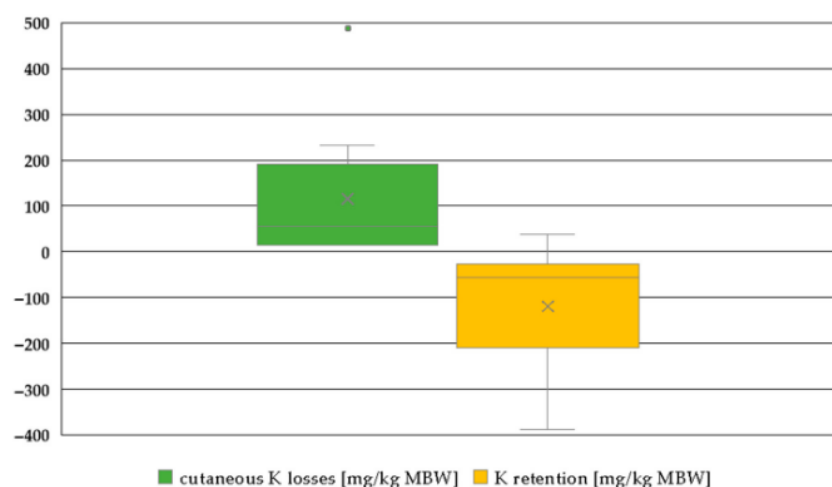


Figure 12. Box plot of K sweat losses and K retention (both in mg/kg MBW). The horizontal line represents the median, while the cross indicates the mean. Only data on working ponies, including information on K sweat losses, were available. Trials with water deficiency were excluded.

3.3. Chloride

3.3.1. Cl Digestibility

In Figure 13, the apparent digestibility of Cl is plotted against Cl intake. At an intake of more than 250 mg/kg MBW, the apparent digestibility was greater in ponies than in horses. The difference was significant (median pony = 98%, median horse = 94%, $p < 0.001$).

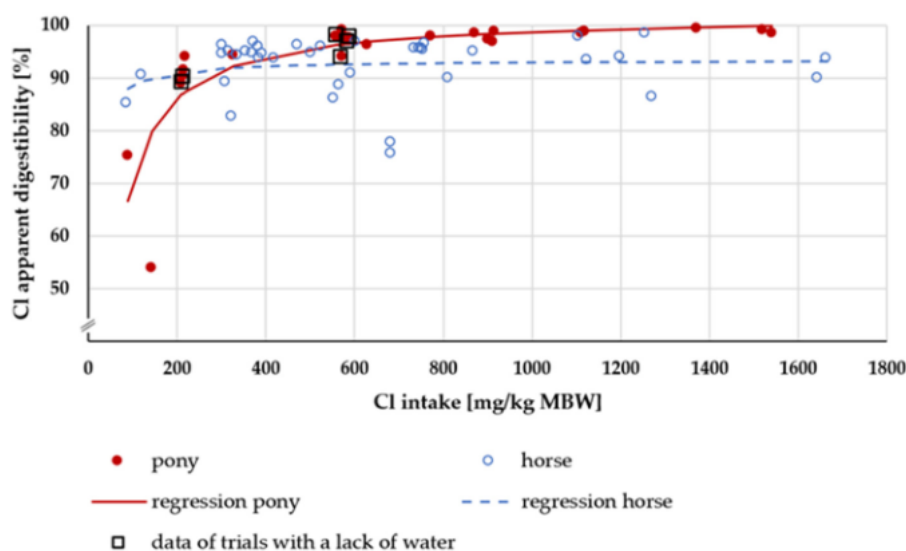


Figure 13. Relationship between Cl intake (in mg/kg MBW) and apparent Cl digestibility (in%). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered. Regression lines mark the data of horses compared to ponies.

At low intake rates, the amount of apparently digested Cl plotted against Cl intake (Figure 14) showed an almost linear relationship between these factors. At an intake of above 600 mg/kg MBW, the apparently digested Cl quantity seemed to be higher in ponies than in horses. Trendlines were calculated separately for ponies and horses. There was a significant difference between these trendlines ($p < 0.001$). The factors working and not working did not show any significant differences ($p = 0.18$).

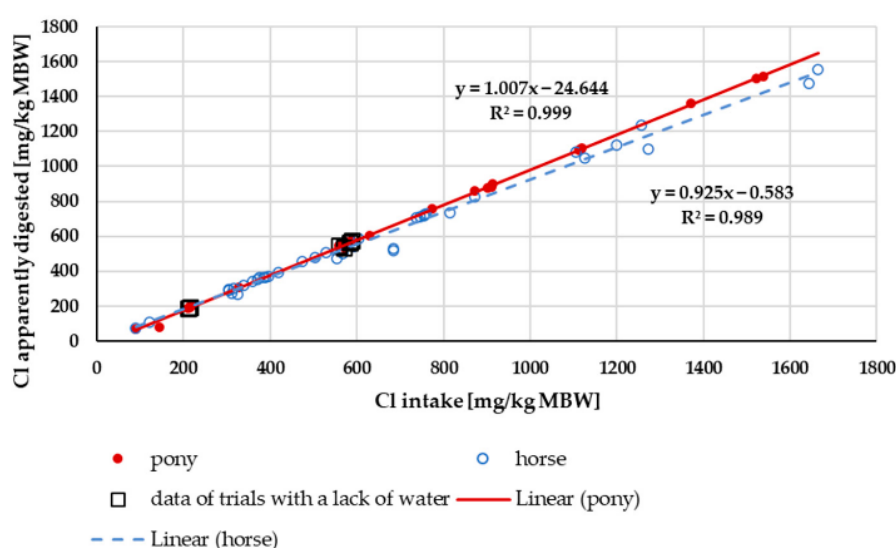


Figure 14. Relationship between Cl intake and apparently digested Cl (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered. Trendlines mark the data of horses compared to ponies.

3.3.2. Serum Cl Concentration

The Cl serum concentration in relation to intake is shown in Figure 15. There was no effect of being a pony or a horse. The serum Cl levels of experiments with water deficiency were above the reference range (Figure 15).

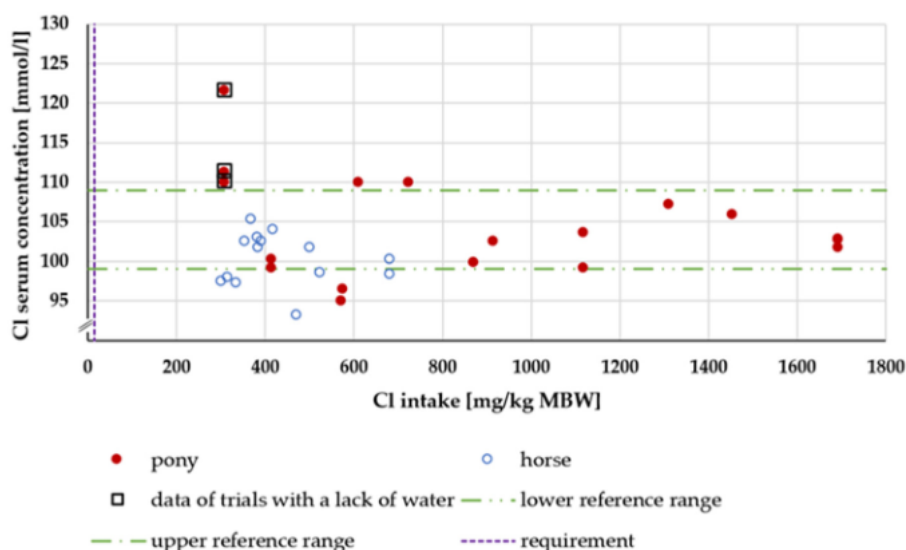


Figure 15. Serum Cl concentration (in mmol/l) plotted against Cl intake (in mg/kg MBW).

3.3.3. Cl Renal Excretion

In Figure 16, the renal excretion of Cl is plotted against Cl intake. The data show a broad distribution. Working ponies and horses seemed to have a lower renal excretion than non-exercised animals. A two-way ANOVA of renal Cl excretion as a percentage of intake with the factors pony vs. horse and working vs. not working showed a significant difference between working and non-working ponies and horses (mean working = $61 \pm 4\%$, mean not working = $93 \pm 4\%$, $p = 0.02$).

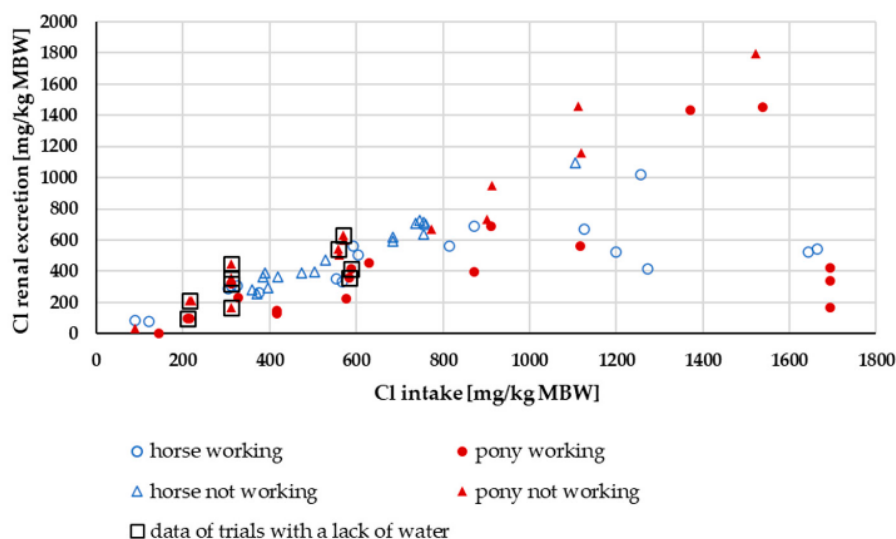


Figure 16. Renal Cl excretion in relation to Cl intake (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered.

3.3.4. Cl Retention Plus Sweat Losses

Figure 17 shows the retention and sweat losses of Cl in relation to Cl intake. Retention plus sweat losses increased with increasing intake. The retention of working ponies and

horses was significantly higher than the retention of non-working horses and ponies (mean working: 217.8 ± 38.4 mg/kg MBW; mean not working: -12.8 ± 38.9 mg/kg MBW; $p < 0.001$). In non-working ponies and horses, the retention in percentage of intake averaged 3%. The retention plus sweat losses in working ponies and horses in percentage of intake averaged 26%.

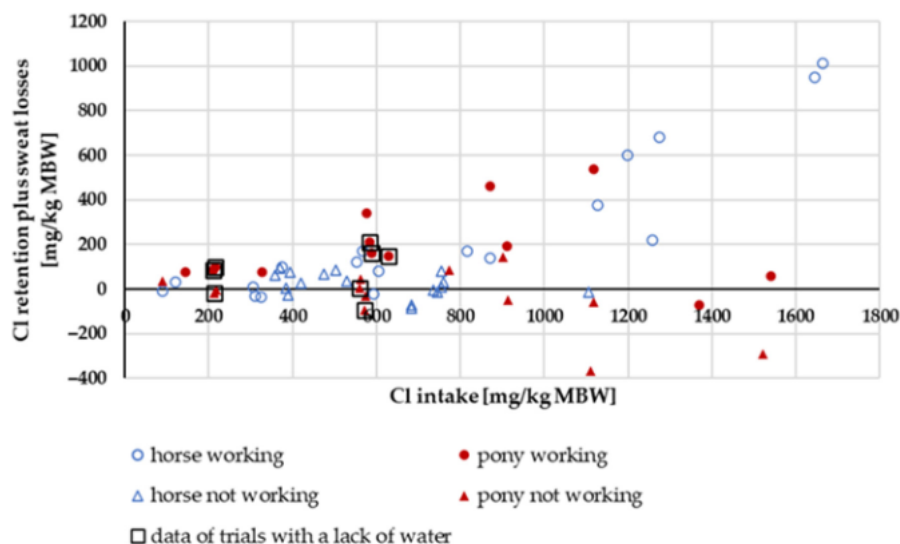


Figure 17. Cl retention plus sweat losses in relation to Cl intake (both in mg/kg MBW). The data of trials that included ponies later diagnosed with PPID were not considered.

The Cl retention shown in Figure 18 appears extremely negative, accompanied by very high sweat losses.

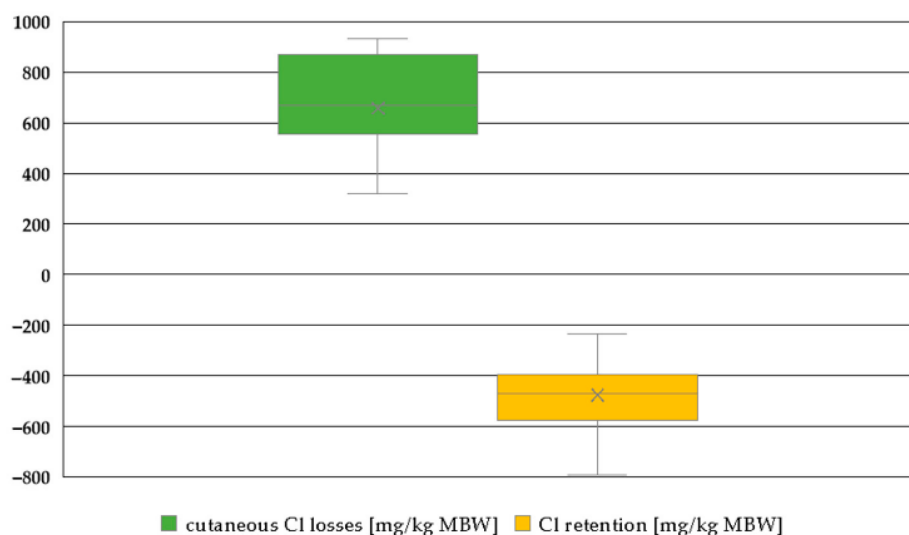


Figure 18. Box plot of Cl sweat losses and Cl retention (both in mg/kg MBW). The horizontal line represents the median, while the cross indicates the mean. Only data on working ponies, including information on Cl sweat losses, were available. Trials with water deficiency were excluded.

4. Discussion

As already described by Maier and Kienzle [24], apparent digestibility defines the proportion of a consumed nutrient that is not excreted via the faeces. It does not consider endogenous faecal losses. If these endogenous faecal losses are higher than intake, the apparent digestibility can be negative, despite the absorption of a substantial amount of the nutrient from the feed (see Figures 1, 7 and 13). In addition to measuring apparent

digestibility, it is also possible to plot the apparently digested amount of a nutrient against intake. This method, known as the Lucas test, has been used multiple times in the past [20,24,60,61]. Serum concentration and renal excretion, as well as retention plus sweat losses, can also be shown in relation to intake, allowing for the identification of quantitative similarities and differences. In the present meta-analysis, these methods were employed.

The distinction between pony and horse using a cut-off of 300 kg is a rather unrefined method. As described in a previous meta-analysis by Maier and Kienzle [24], it is possible that some heavier ponies are classified as horses. Nevertheless, there is no alternative method in a meta-analysis without significantly limiting the data pool.

The same is true for the differentiation between working and non-working equines. Work was not graded into light, medium or hard work. Estimating sweat losses based on work intensity is not possible, as actual losses are heavily influenced by environmental factors such as temperature or humidity [62]. For the same reason, it is equally impossible to infer the intensity of work based on sweat losses. Therefore, retention was analysed as retention plus sweat losses. However, data on electrolyte losses through sweat were available for five studies involving working ponies [25,26,33,36,38]. Consequently, these studies were used in a separate analysis to evaluate retention after deducting sweat losses.

Differences between ponies and horses have been investigated in the past, for example, with regard to the microbiome [63–65] or the digestibility of crude nutrients [66–69]. However, to the best of our knowledge, the digestibility of minerals has not yet been investigated in relation to differences between ponies and horses, except for an analysis by Maier and Kienzle [24], or in relation to the association between digestibility and work. While there is a wide range of studies on the influence of exercise and electrolyte losses through sweat in general [62,70–77], none of these studies have measured digestibility.

Presenting all data per kg of MBW has been discussed extensively for species with highly variable adult body weights, such as horses and dogs [18,78–80]. To ensure accuracy, all diagrams were recreated using the reference measure of kg body weight (BW). No differences were observed.

There was no difference between ponies and horses in terms of apparent Na digestibility or apparently digested Na (Figure 1) in relation to intake. Both parameters, however, differed between working and non-working animals, with working animals having a higher apparent digestibility. This also applied to true Na digestibility. Besides, the endogenous losses were higher in animals that were not exercised. Especially in non-working animals, the apparent and true digestibility of Na was relatively low compared to data from other species such as dogs, cats, pigs and mice [81–85]. In horses and other large hindgut fermenters (Asian elephants, black rhinoceros), a rather low Na digestibility was described by Clauss et al. [21,86]. Some of the black rhinoceros in the study by Clauss et al. [21] had extremely low Na digestibility, even though the Na content in their diet was not very low. Also, tapirs seem to be very similar in Na digestibility to horses [22]. In a study by Holdø et al. [23], African elephants showed higher Na excretion in faeces in Na-rich areas compared to lower faecal Na excretion in elephants from areas with comparatively less Na. These findings suggest that several hindgut fermenters, including horses, may be somewhat different from other species with regard to regulation of Na metabolism. The suggested hypothesis is that the down- and upregulation of Na absorption from the gastrointestinal tract plays a bigger role in horses than in species such as dogs, humans and mice, where Na metabolism is not that strongly regulated via the intestine but much more through renal mechanisms [87–89]. As shown in Figure 4, this does not imply that the kidney is not involved in regulation in equines at all. Rather, it is likely involved to a lesser extent, while the gastrointestinal tract also seems to play a significant role. The theory

of increased regulation of Na absorption in the case of an increased Na requirement (i.e., work) is also supported by the lower variation of the data in working animals compared to non-working horses and ponies (SEM trendline working = 9.523; SEM trendline not working = 18.378).

A difference in Na digestibility between working equines and animals at maintenance has a strong effect on the factorial calculation of requirements, especially for working animals. In factorial calculation, the endogenous losses and sweat losses are summed up and divided by true digestibility. If the true digestibility is higher, this will result in lower figures. This considerable up and downregulation of intestinal Na absorption in horses may in part explain why working horses appear to remain healthy, even if their factorially calculated Na requirements are not completely met [90].

This may also explain why electrolyte loading for several days before strenuous work is not recommended [91]. Presumably, it leads to downregulation of intestinal Na absorption. The findings of Zeyner et al. [6] also strengthen this hypothesis. They fed either 0, 50 or 100 g (g) of salt (NaCl) per day to exercising horses and found stronger effects with a lower dose. This finding could in part be explained by differences in intestinal absorption, with lower absorption at higher doses. It also explains the findings on Na retention plus sweat losses (Figure 5) in experiments with very high Na intake.

Renal Na excretion in comparison to intake and Na retention in working or non-working animals reflects sweat losses. The differences between working ponies and horses suggest lower sweat losses in ponies than in horses. While the sweat composition is not systematically different, horses appear to produce more sweat when adrenaline is injected [92]. Therefore, the hypothesis that horses produce more sweat during work appears to be a likely explanation. Na retention excluding quantitative Na losses via sweat could only be investigated for studies with ponies where quantitative data on sweat losses were available. Due to the lack of data on sweat losses in working horses, it is unfortunately not possible to assess the difference between ponies and horses in this context for all minerals. Nonetheless, the very low Na retention combined with a relatively low apparent Na digestibility is an interesting finding. In comparison to other mammals such as dogs, where the apparent Na digestibility can reach up to 95% [81], horses do not appear to achieve this even with significant sweat losses and low retention. The capacity for Na absorption through the intestine seems to be limited in horses, even in working animals. The same is true for the reduction of renal losses.

Apparent and true K digestibility in horses and ponies was higher than in other large hindgut fermenters such as black rhinoceros and tapirs [21,93]. It was closer to other species such as pigs, dogs, cats and mice [81,83,85,94]. Work increased the apparent and true K digestibility of horses and ponies, presumably because of a higher requirement for sweat losses, which resulted in an upregulation of intestinal absorption. Compared to Na, the effect was smaller, but it should still be considered for factorial calculation of requirements. In contrast to Na, in K, the status of deficiency is reflected by serum K, which affirms the information provided by Vervuert and Kienzle [95]. The same is already known from other species such as dogs, cats and humans [96,97]. K sweat losses plus retention were higher in working horses than in working ponies, suggesting higher sweat losses in horses. The explanation given for the differences in Na is probably also applicable to K.

The low K retention plus sweat losses observed during water deficiency could be the result of activation of the renin–angiotensin–aldosterone system because thirst leads to the release and activation of various hormones, ultimately resulting in the production of aldosterone [98]. This hormone increases the reabsorption of Na into the blood through Na-K pumps, which simultaneously leads to an increased excretion of K [99]. Similar to

Na, K retention excluding K sweat losses was negative, with relatively high losses through sweat. The interpretation of the results is in accordance with that of Na.

The apparent and true digestibility of Cl were extremely high. This is in agreement with studies on other species such as dogs and cats [81,94]. There was a difference between horses and ponies. Given the overall extremely high digestibility, the physiological significance of this difference is unlikely to be of practical importance. An explanation might be the allometric relationship between the size of the digestive tract and the MBW, which is larger in ponies than in horses. The empty gastrointestinal tract amounts to 5% of BW [8]. With increasing size, the surface of the gastrointestinal tract then decreases in relation to MBW, provided there is no compensation by an increase of villi and other structures which enlarge the resorptive surface. To the best of our knowledge, this is not the case.

Serum Cl levels did not reflect the intake, as repeatedly reported before [95]. While the same was true for Na, there was a difference between Na and Cl during water deficiency. The serum Na concentration did not increase, but Cl serum levels did. This suggests a less strict regulation of Cl metabolism compared to Na.

Renal excretion of Cl clearly showed effects on intake. Working animals had lower renal excretion in relation to intake, suggesting sweat losses. Cl retention and sweat losses reflected the other Cl results. The data distribution did not allow for a closer investigation of Cl retention with respect to the potential difference between ponies and horses. To the best of our knowledge, any such potential difference has not yet been investigated in the literature. The sweat losses of Cl were extremely high (Figure 18). This is consistent with previous reports indicating that Cl is lost in quantitatively high amounts through sweat [15,77]. As a result, Cl exhibits the most negative retention compared to Na and K. But the Cl digestibility was 93% in the studies considered, with renal Cl losses also being very high. This provides interesting material for further investigations.

As described in the Section 2, some studies included animals later diagnosed with PPID. With regard to clinical use of the data, it is worth discussing the findings in these studies in comparison to all other studies. The most important difference was a very low apparent K digestibility, of around 60% and less, compared to above 80% in the other studies. In factorial calculation, this results in a requirement which is around 30% higher than in healthy animals. In horse feed, especially in forage, K is normally abundant and a deficiency is therefore virtually impossible [100]. Horses with PPID are mostly older horses [101,102], which may be fed soaked hay to remove soluble carbohydrates and or to remove dust from their diet. Soaking the hay may remove more than 50% of the K content [10–12]. Therefore, in horses with PPID eating soaked hay, the resulting K intake may become marginal. In contrast to K, Na metabolism in horses with PPID appeared to be completely unaffected, whereas in other species, Cushing patients are reported to have increased Na retention [103–106]. In the studies with elderly horses, Cl retention increased, a finding which is not an eminent feature of Cushing's disease in other species.

The observed increased digestibility of Na and K in working equines, combined with the still highly negative retention, provides an important basis for further research.

5. Conclusions

The apparent Na digestibility in horses and ponies was relatively low, similar to other hindgut fermenters. During physical activity, both apparent and true Na digestibility increased considerably, suggesting a more important role of the gut in the regulation of Na metabolism in equines than in other species. A similar effect was observed to a lesser extent for K digestibility. For Cl, both apparent and true digestibility were notably high, with ponies exhibiting even greater digestibility than horses. However, given the overall high Cl digestibility in both groups, this finding holds little relevance for practical feeding. Water

deprivation led to increased serum Cl levels and decreased K retention due to relatively elevated renal K excretion, likely influenced by aldosterone. In the ponies later diagnosed with PPID, no impact on Na metabolism was detected. This contrasts with the findings observed in other species. Furthermore, reduced K digestibility was noted in PPID-affected animals, but there were no changes in blood K levels. Cl retention increased in animals later diagnosed with PPID, which has not been previously reported in other species.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ani15020191/s1>: Figure S1: Flow diagram for study search and selection based on Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA); Table S1: Number of included studies and participants for each graph.

Author Contributions: Conceptualization, E.K.; methodology, E.K. and I.M.; validation, E.K. and I.M.; formal analysis, I.M.; investigation, I.M. and E.K.; resources, not applicable; data curation, E.K. and I.M.; writing—original draft preparation, I.M. and E.K.; writing—review and editing, I.M.; visualization, I.M.; project administration, not applicable. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data presented in this study are available upon request from the corresponding author.

Acknowledgments: We thank Linda Böswald for help with the test of Ho.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Kirchgeßner, M.; Stangl, G.; Schwarz, F.; Roth, F.; Südekam, K.-H.; Eder, K. *Tierernährung*; DLG-Verlag: Frankfurt, Germany, 2014; Volume 14, p. 659.
2. von Engelhardt, W.; Breves, G.; Diener, M.; Gäbel, G. *Physiologie der Haustiere*; Enke Verlag: Stuttgart, Germany, 2015.
3. Lindner, A. Untersuchungen zum Natriumstoffwechsel des Pferdes bei Marginaler Versorgung und Zusätzlicher Bewegungsbelastung. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1983.
4. Jamieson, M.J. Hyponatraemia. *Br. Med. J. Clin. Res. Ed.* **1985**, *290*, 1723. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Holbrook, T.; Simmons, R.; Payton, M.; MacAllister, C. Effect of repeated oral administration of hypertonic electrolyte solution on equine gastric mucosa. *Equine Vet. J.* **2005**, *37*, 501–504. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Zeyner, A.; Romanowski, K.; Vernunft, A.; Harris, P.; Müller, A.-M.; Wolf, C.; Kienzle, E. Effects of different oral doses of sodium chloride on the basal acid-base and mineral status of exercising horses fed low amounts of hay. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0168325. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Rose, B.D.; Post, T. Introduction to disorders of potassium balance. In *Clinical Physiology of Acid-Base and Electrolyte Disorders*. BD Rose and TW Post, ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2001; pp. 822–836.
8. Coenen, M.; Vervuert, I. *Pferdefütterung*; Georg Thieme Verlag: Stuttgart, Germany, 2019.
9. Tasker, J. Fluid and electrolyte studies in the horse. 3. Intake and output of water, sodium, and potassium in normal horses. *Cornell Vet.* **1967**, *57*, 649–657.
10. Bochnia, M.; Pietsch, C.; Wensch-Dorendorf, M.; Greef, M.; Zeyner, A. Effect of hay soaking duration on metabolizable energy, total and prececal digestible crude protein and amino acids, non-starch carbohydrates, macronutrients and trace elements. *J. Equine Vet. Sci.* **2021**, *101*, 103452. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Glatzer, M.; Bochnia, M.; Wensch-Dorendorf, M.; Greef, J.M.; Zeyner, A. Feed intake parameters of horses fed soaked or steamed hay and hygienic quality of hay stored following treatment. *Animals* **2021**, *11*, 2729. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Mack, S.; Dugdale, A.; Argo, C.M.; Morgan, R.; McGowan, C. Impact of water-soaking on the nutrient composition of UK hays. *Vet. Rec.* **2014**, *174*, 452. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Marr, C.; Bowen, M. *Cardiology of the Horse*; Elsevier Health Sciences: Amsterdam, The Netherlands, 2011.
14. Johnson, P.J. Electrolyte and acid-base disturbances in the horse. *Vet. Clin. N. Am. Equine Pract.* **1995**, *11*, 491–514. [[CrossRef](#)]

15. Flaminio, M.J.B.; Rush, B.R. Fluid and electrolyte balance in endurance horses. *Vet. Clin. N. Am. Equine Pract.* **1998**, *14*, 147–158. [\[CrossRef\]](#)
16. GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie). *Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Pferde. Mit Tabellen zur Berechnung der Nährstoffzufuhr*; DLG-Verlag: Frankfurt, Germany, 1982; Volume 1, p. 60.
17. NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Horses*, 6th revised ed.; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2007; p. 360.
18. GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie). *Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Pferden*; DLG-Verlag: Frankfurt, Germany, 2014; Volume 11, p. 190.
19. GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie). *Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Pferden. Mit Tabellen zur Berechnung der Nährstoffzufuhr*; DLG-Verlag: Frankfurt, Germany, 1994; p. 92.
20. Burger, A. Literatur-Studie zur faktoriellen Ableitung des Mengenelement-Bedarfs für Erhaltung beim Pferd. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2011.
21. Clauss, M.; Castell, J.; Kienzle, E.; Schramel, P.; Dierenfeld, E.; Flach, E.; Behlert, O.; Streich, W.J.; Hummel, J.; Hatt, J.M. Mineral absorption in the black rhinoceros (*Diceros bicornis*) as compared with the domestic horse. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2007**, *91*, 193–204. [\[CrossRef\]](#)
22. Lang-Deuerling, S.B. Untersuchungen zu Fütterung und Verdauungsphysiologie an Flachland- und Schabrackentapiren (*Tapirus terrestris* und *Tapirus indicus*). Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2008.
23. Holdø, R.M.; Dudley, J.P.; McDowell, L.R. Geophagy in the African elephant in relation to availability of dietary sodium. *J. Mammal.* **2002**, *83*, 652–664. [\[CrossRef\]](#)
24. Maier, I.; Kienzle, E. A Meta-Analysis on Quantitative Calcium, Phosphorus and Magnesium Metabolism in Horses and Ponies. *Animals* **2024**, *14*, 2765. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
25. Hipp-Quarton, A. Untersuchungen zur postprandialen Wasser- und Elektrolytretention beim Pferd in Abhängigkeit von der Natrium- und Wasseraufnahme. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1989.
26. Pérez Noriega, H.R. Untersuchungen über den postprandialen Wasser- und Elektrolythaushalt des Pferdes unter Variation des Wasser- und Futterangebots. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1989.
27. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* **2021**, *372*, n71. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Baker, L.A. *The Comparison of Two Forms of Sodium and Potassium and Chloride Versus Sulfur in the Dietary Cation-Anion Balance Equation and Subsequent Effects on Acid-Base Status and Mineral Balance in Sedentary Horses*; Oklahoma State University: Stillwater, OK, USA, 1995.
29. Baker, L.; Wall, D.; Topliff, D.; Freeman, D.; Teeter, R.; Breazile, J.; Wagner, D. Effect of dietary cation-anion balance in mineral balance in anaerobically exercised and sedentary horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1993**, *13*, 557–561. [\[CrossRef\]](#)
30. Barsnick, R. Untersuchungen zur Akzeptanz und Verdaulichkeit von Trockenschnitzeln unterschiedlicher Konfektionierung beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 2003.
31. Berchtold, L. Untersuchungen zum Einfluss der Anionen-Kationen-Bilanz auf den Mineralstoff- und Säure-Basen-Haushalt bei Ponys. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2009.
32. Eilmans, I. Fettverdauung beim Pferd sowie die Folgen einer Marginalen Fettversorgung. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1991.
33. Gomda, Y.M. Untersuchungen über die renale, fäkale und kutane Wasser- und Elektrolytausscheidung bei Pferden in Abhängigkeit von Fütterungszeit, Futtermenge sowie Bewegungsleistung. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1988.
34. Güldenhaupt, V. Verträglichkeit und Verdaulichkeit eines Alleinfutters für Pferde in Kombination mit Stroh. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1979.
35. Günther, C. Untersuchungen über die Verdaulichkeit und Verträglichkeit von Hafer, Quetschhafer, Gerste und Mais beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.
36. Gürer, C. Untersuchungen zum Kaliumstoffwechsel des Pferdes bei marginaler Versorgung und zusätzlicher Belastung Dissertation TiHo Hannover. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1985.
37. Hoyt, J.; Potter, G.; Greene, L.; Vogelsang, M.; Anderson, J., Jr. Electrolyte balance in exercising horses fed a control and a fat-supplemented diet. *J. Equine Vet. Sci.* **1995**, *15*, 429–435. [\[CrossRef\]](#)
38. Hoyt, J.; Potter, G.; Greene, L.; Anderson, J., Jr. Mineral balance in resting and exercised miniature horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1995**, *15*, 310–314. [\[CrossRef\]](#)
39. Krull, H. Untersuchungen über Aufnahme und Verdaulichkeit von Grünfutter beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.

40. Lindemann, G. Untersuchungen über den Einfluss von Lactose- und Stärkezulagen auf die Verdaulichkeit von NH₃-aufgeschlossenem Stroh beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1982.
41. Mueller, R.K. *Effect of Dietary Cation-Anion Difference on Acid-Base Status Energy Digestibility and Mineral Balance in Sedentary Horses Fed Varying Levels and Sources of Starch*; Oklahoma State University: Stillwater, OK, USA, 1999.
42. Mundt, H.-C. Untersuchungen über die Verdaulichkeit von Aufgeschlossenem Stroh beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1978.
43. Neustädter, L.-T. Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Unterschiedlichen Mengenelementversorgung auf den Mineralstoffhaushalt von Pferden. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 2015.
44. O'Connor, C.; Nielsen, B.; Woodward, A.; Spooner, H.; Ventura, B.; Turner, K. Mineral balance in horses fed two supplemental silicon sources. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2008**, *92*, 173–181. [[CrossRef](#)]
45. Pferdekamp, M. Einfluss steigender Proteinmengen auf den Stoffwechsel des Pferdes. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1978.
46. Roose, K.; Hoekstra, K.; Pagan, J.; Geor, R. *Effect of an Aluminum Supplement on Nutrient Digestibility and Mineral Metabolism in Thoroughbred Horses*; Kentucky Equine Research: Versailles, KY, USA, 2001; pp. 364–369.
47. Schiele, K. Einfluss reduzierter Futterzuteilung zweier Verschiedener Heuqualitäten auf Passagedauer und Verdaulichkeit bei Ponies. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2008.
48. Schmidt, M. Untersuchungen über die Verträglichkeit und Verdaulichkeit eines pelletierten Mischfutters für Pferde in Kombination mit Heu und NH₃-aufgeschlossenem Stroh. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1980.
49. Schryver, H.; Parker, M.; Daniluk, P.; Pagan, K.; Williams, J.; Soderholm, L.; Hintz, H. Salt consumption and the effect of salt on mineral metabolism in horses. *Cornell Vet.* **1987**, *77*, 122–131. [[PubMed](#)]
50. Schulze, K. Untersuchungen zur Verdaulichkeit und Energiebewertung von Mischfuttermitteln für Pferde. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1987.
51. Steinbrenner, B. Einfluss eines NaCl-Supplements vor und während der Bewegung auf den Wasser- und Elektrolythaushalt des Pferdes. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1993.
52. Stürmer, K. Untersuchungen zum Einfluss der Fütterung auf den Säure-Basen-Haushalt bei Ponys. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Ingolstadt, UK, 2005.
53. Teleb, H. Untersuchungen über den intestinalen Ca-Stoffwechsel beim Pferd nach variierender Ca-Zufuhr und einer Oxalatzulage. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1984.
54. Verthein, B. Auswirkungen einer Enzymgabe auf die Futterverdaulichkeit beim Pferd. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1981.
55. Wall, D.; Topliff, D.; Freeman, D.; Wagner, D.; Breazile, J.; Stutz, W. Effect of dietary cation-anion balance on urinary mineral excretion in exercised horses. *J. Equine Vet. Sci.* **1992**, *12*, 168–171. [[CrossRef](#)]
56. von Wedemeyer, H.C. *Untersuchungen zum Calcium-, Phosphor- und Natrium-Umsatz des erwachsenen Pferdes*; Georg-August-Universität Göttingen: Göttingen, Germany, 1970.
57. Weidenhaupt, K. Untersuchungen zum Kaliumstoffwechsel des Pferdes. Ph.D. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Germany, 1977.
58. Geor, R.J.; Harris, P.; Coenen, M. *Equine Applied and Clinical Nutrition: Health, Welfare and Performance*; Saunders Elsevier: Oxford, UK, 2013; p. 679.
59. Lucas, H.L. Stochastic elements in biological models; their sources and significance. *Stoch. Models Med. Biol.* **1964**, 355–385.
60. Böswald, L.; Dobenecker, B.; Clauss, M.; Kienzle, E. A comparative meta-analysis on the relationship of faecal calcium and phosphorus excretion in mammals. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2018**, *102*, 370–379. [[CrossRef](#)]
61. Mack, J.; Alexander, L.; Morris, P.; Dobenecker, B.; Kienzle, E. Demonstration of uniformity of calcium absorption in adult dogs and cats. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2015**, *99*, 801–809. [[CrossRef](#)]
62. Zeyner, A.; Romanowski, K.; Vernunft, A.; Harris, P.; Kienzle, E. Scoring of sweat losses in exercised horses—A pilot study. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2014**, *98*, 246–250. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
63. Theelen, M.J.; Luiken, R.E.; Wagenaar, J.A.; Sloet van Oldruitenborgh-Oosterbaan, M.M.; Rossen, J.W.; Zomer, A.L. The equine faecal microbiota of healthy horses and ponies in the Netherlands: Impact of host and environmental factors. *Animals* **2021**, *11*, 1762. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
64. Langner, K.; Blaue, D.; Schedlbauer, C.; Starzonek, J.; Jullian, V.; Vervuert, I. Changes in the faecal microbiota of horses and ponies during a two-year body weight gain programme. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0230015. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
65. Lwin, K.-O.; Matsui, H. Comparative analysis of the methanogen diversity in horse and pony by using mcrA gene and archaeal 16S rRNA gene clone libraries. *Archaea* **2014**, *2014*, 483574. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
66. Potter, S.J.; Bamford, N.J.; Baskerville, C.L.; Harris, P.A.; Bailey, S.R. Comparison of feed digestibility between ponies, standard-breds and Andalusian horses fed three different diets. *Vet. Sci.* **2021**, *9*, 15. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

67. Vermorel, M.; Vernet, J.; Martin-Rosset, W. Digestive and energy utilisation of two diets by ponies and horses. *Livest. Prod. Sci.* **1997**, *51*, 13–19. [\[CrossRef\]](#)
68. Cuddeford, D.; Pearson, R.; Archibald, R.; Muirhead, R. Digestibility and gastro-intestinal transit time of diets containing different proportions of alfalfa and oat straw given to Thoroughbreds, Shetland ponies, Highland ponies and donkeys. *Anim. Sci.* **1995**, *61*, 407–417. [\[CrossRef\]](#)
69. Hoffmann, M.; Steinhöfel, O.; Fuchs, R. The digestibility of crude nutrients in horses. 2. Comparative studies on the digestive capacity of a thoroughbred horse, pony and wether. *Arch. Fur Tierernähr.* **1987**, *37*, 351–362. [\[CrossRef\]](#)
70. ROSE, R.J.; Arnold, K.S.; Church, S.; Paris, R. Plasma and sweat electrolyte concentrations in the horse during long distance exercise. *Equine Vet. J.* **1980**, *12*, 19–22. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
71. Snow, D.; Kerr, M.; Nimmo, M.; Abbott, E. Alterations in blood, sweat, urine and muscle composition during prolonged exercise in the horse. *Vet. Rec.* **1982**, *110*, 377–384. [\[CrossRef\]](#)
72. Lucke, J.; Hall, G. Further studies on the metabolic effects of long distance riding: Golden Horseshoe Ride 1979. *Equine Vet. J.* **1980**, *12*, 189–192. [\[CrossRef\]](#)
73. Lindinger, M.I.; Waller, A.P. Tracing oral Na⁺ and K⁺ in sweat during exercise and recovery in horses. *Exp. Physiol.* **2021**, *106*, 972–982. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
74. Lindinger, M.I. Oral electrolyte and water supplementation in horses. *Vet. Sci.* **2022**, *9*, 626. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
75. Waller, A.P.; Lindinger, M.I. Tracing acid-base variables in exercising horses: Effects of pre-loading oral electrolytes. *Animals* **2022**, *13*, 73. [\[CrossRef\]](#)
76. McCutcheon, L.; Geor, R.; Hare, M.J.; ECKER, G.L.; Lindinger, M. Sweating rate and sweat composition during exercise and recovery in ambient heat and humidity. *Equine Vet. J.* **1995**, *27*, 153–157. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
77. Spooner, H.; Nielsen, B.; SCHOTT II, H.; Harris, P. Sweat composition in Arabian horses performing endurance exercise on forage-based, low Na rations. *Equine Vet. J.* **2010**, *42*, 382–386. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
78. Rucker, R. Allometric scaling, metabolic body size and interspecies comparisons of basal nutritional requirements. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2007**, *91*, 148–156. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
79. Rucker, R.; Storms, D. Interspecies comparisons of micronutrient requirements: Metabolic vs. absolute body size. *J. Nutr.* **2002**, *132*, 2999–3000. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Dogs and Cats*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2006; p. 424.
81. Meyer, H.; Zentek, J.; Habernoll, H.; Maskell, I. Digestibility and compatibility of mixed diets and faecal consistency in different breeds of dog. *J. Vet. Med. Ser. A* **1999**, *46*, 155–166. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
82. Burmeier, H.U. Auswirkungen des Natrium-und Rohproteingehalts sowie der Proteinqualität im Futter auf die Harnzusammensetzung von gesunden Katzen. Ph.D. Thesis, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, 2017.
83. Entringer, R.; Plumlee, M.; Conrad, J.; Cline, T.; Wolfe, S. Influence of diet on passage rate and apparent digestibility by growing swine. *J. Anim. Sci.* **1975**, *40*, 486–494. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
84. Böswald, L.F.; Wenderlein, J.; Siegert, W.; Straubinger, R.K.; Kienzle, E. True mineral digestibility in C57Bl/6J mice. *PLoS ONE* **2023**, *18*, e0290145. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
85. Böswald, L.F.; Matzek, D.; Popper, B. Digestibility of crude nutrients and minerals in C57Bl/6J and CD1 mice fed a pelleted lab rodent diet. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 1791. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
86. Clauss, M.; Loehlein, W.; Kienzle, E.; Wiesner, H. Studies on feed digestibilities in captive Asian elephants (*Elephas maximus*). *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2003**, *87*, 160–173. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
87. Bie, P. Mechanisms of sodium balance: Total body sodium, surrogate variables, and renal sodium excretion. *Am. J. Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol.* **2018**, *315*, R945–R962. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
88. Michell, A. *The Clinical Biology of Sodium: The Physiology and Pathophysiology of Sodium in Mammals*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
89. Selkurt, E.E. Sodium excretion by the mammalian kidney. *Physiol. Rev.* **1954**, *34*, 287–333. [\[CrossRef\]](#)
90. van Ost, S. Eine Feldstudie zu Energiebedarf und Rationsgestaltung bei Hochleistungsspringpferden. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2015.
91. Schott II, H.C.; Hinchcliff, K.W. Treatments affecting fluid and electrolyte status during exercise. *Vet. Clin. N. Am. Equine Pract.* **1998**, *14*, 175–204. [\[CrossRef\]](#)
92. Kerr, M.G. Biochemical and Physiological Aspects of Endurance Exercise in the Horse. Ph.D. Thesis, University of Glasgow, Glasgow, UK, 1985.
93. Clauss, M.; Lang-Deuerling, S.; Kienzle, E.; Medici, E.P.; Hummel, J. Mineral absorption in tapirs (*Tapirus* spp.) as compared to the domestic horse. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2009**, *93*, 768–776. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
94. Teshima, E.; Brunetto, M.; Vasconcellos, R.; Gonçalves, K.; De-Oliveira, L.; Valério, A.; Carciofi, A. Nutrient digestibility, but not mineral absorption, is age-dependent in cats. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **2010**, *94*, e251–e258. [\[CrossRef\]](#)

95. Vervuert, I.; Kienzle, E. Assessment of nutritional status from analysis of blood and other tissue samples. In *Equine Applied and Clinical Nutrition*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013; pp. 425–442.
96. Nelson, R.W.; Couto, C.G. *Innere Medizin der Kleintiere*; Elsevier GmbH: München, Germany, 2010; p. 1564.
97. Gennari, F.J. Disorders of potassium homeostasis: Hypokalemia and hyperkalemia. *Crit. Care Clin.* **2002**, *18*, 273–288. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
98. Scott, J.H.; Menouar, M.A.; Dunn, R.J. *Physiology, Aldosterone*; StatPearls Publishing: Treasure Island, FL, USA, 2017.
99. Thornton, S.N. Regulation of thirst. *Nutr. Today* **2013**, *48*, S4–S6. [[CrossRef](#)]
100. Stockham, S.L. Interpretation of equine serum biochemical profile results. *Vet. Clin. N. Am. Equine Pract.* **1995**, *11*, 391–414. [[CrossRef](#)]
101. McGowan, T.; Pinchbeck, G.; McGowan, C. Prevalence, risk factors and clinical signs predictive for equine pituitary pars intermedia dysfunction in aged horses. *Equine Vet. J.* **2013**, *45*, 74–79. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
102. Lumnitz, M.S. Qualitativ-histologische und quantitativ-stereologische Veränderungen der Nebennieren bei Equiden. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Germany, 2017.
103. Davies, D.; Foster, S.; Hopper, B.; Staudte, K.; O'hara, A.; Irwin, P. Hypokalaemic paresis, hypertension, alkalosis and adrenal-dependent hyperadrenocorticism in a dog. *Aust. Vet. J.* **2008**, *86*, 139–146. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
104. Cayzer, J.; Jones, B. Canine hyperadrenocorticism. *New Zealand Vet. J.* **1993**, *41*, 53–68. [[CrossRef](#)]
105. Bailey, M.A.; Mullins, J.J.; Kenyon, C.J. Mineralocorticoid and glucocorticoid receptors stimulate epithelial sodium channel activity in a mouse model of Cushing syndrome. *Hypertension* **2009**, *54*, 890–896. [[CrossRef](#)]
106. Zondek, H.; Leszynsky, H.E. Transient Cushing Syndrome. *Br. Med. J.* **1956**, *1*, 197. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

4. DISKUSSION

4.1. Kritik der Methodik

4.1.1. Modell Meta-Analyse

Eine Meta-Analyse dient als quantitatives Verfahren der Analyse von Ergebnissen früherer Studien sowie deren systematischer Neubewertung und der sich daraus ergebenden Möglichkeit, übergreifende Schlussfolgerungen zu ziehen (HAIDICH, 2010). Sie fungiert entsprechend als eine statistische Methode, mit welcher Ergebnisse verschiedener Studien zusammengeführt werden (HEDGES, 1992). Die Grundlage einer jeden Meta-Analyse ist die Literaturrecherche. Obwohl es nicht möglich ist, ausnahmslos jede relevante Studie zu einem Thema zu ermitteln (HAIDICH, 2010), bietet die Meta-Analyse ein relevantes wissenschaftliches Instrument, mit welchem Effekte sichtbar gemacht werden können, welche innerhalb der einzelnen Studien ggf. nicht erkennbar waren und leisten somit einen wertvollen Beitrag zum Fortschritt der Wissenschaft (GUZZO et al., 1987). Bereits einige wichtige Erkenntnisse der Tierernährung aus der Vergangenheit wurden mittels Literaturstudien erlangt (KIENZLE & BURGER, 2011; MACK et al., 2015; BÖSWALD et al., 2018). Im Rahmen einer Literaturstudie muss kein Tier Versuchsbedingungen ausgesetzt und beispielsweise einzeln standardisiert untergebracht, Untersuchungen unterzogen oder zur Entnahme von Blutproben mit einer Nadel punktiert werden. Unter dem Aspekt des Tierschutzes und des Gedankens an den von Russell und Burch (1959) geprägten Begriff „replacement“, also unter anderem des Anwendens von Alternativen zum Tierversuch wo möglich (CLARK, 2018), ist diese Methode entsprechend als äußerst positiv zu bewerten. In diesem Zuge sollte immer eine genaue Abwägung stattfinden, inwieweit zur Erlangung neuer Erkenntnisse Tierversuche von Nöten sind oder ob ggf. alternativ mithilfe bereits vorhandener Daten in der Literatur erhobene Fragestellungen hinreichend beantwortet werden können. Wichtig hierbei ist ein stringentes Vorgehen bei der Datenauswahl sowie eine fundierte Datenanalyse unter verschiedenen Gesichtspunkten.

4.1.2. Datenauswahl

Zur Aufnahme in die vorliegende Meta-Analyse mussten Studien mindestens zwei der folgenden Informationen beinhalten: Bilanzdaten zu Aufnahme, fäkaler Ausscheidung, scheinbarer Verdaulichkeit und renaler Exkretion sowie Serumwerte der untersuchten Mineralstoffe. Um die Ergebnisse der einzelnen Studien vergleichen zu können, wurde zudem das Körpergewicht der verwendeten Tiere benötigt. Damit konnten die Daten auf

eine vergleichbare Bezugsgröße umgerechnet werden (mg/kg MBW). Wenn das Körpergewicht nicht erhältlich war, wurde dieses anhand der Angaben zur Rasse des Pferdes bzw. Ponys geschätzt. Hierfür wurden die Angaben zu typischen Körpergewichten verschiedener Pferderassen nach GfE (2014) verwendet. Dieses Vorgehen birgt das Risiko einer etwas ungenauen Bestimmung des Körpergewichts und dadurch etwaiger Abweichungen in den eruierten Werten zu Aufnahme und fäkaler bzw. renaler Ausscheidung in Bezug auf das metabolische Körpergewicht. Da die Rasse genau bekannt und deren typische Gewichte nach GfE (2014) zurückzuverfolgen war, sind grobe Ungenauigkeiten dennoch unwahrscheinlich.

Die Studienauswahl wurde weiter eingeschränkt durch die alleinige Berücksichtigung von erwachsenen Pferden und Ponys ab einem Alter von drei Jahren (GFE, 2014), welche sich weder in Laktation noch Trächtigkeit befanden. Daraus ergibt sich eine gewisse Limitierung in der Ergebnisinterpretation hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die nicht berücksichtigten Lebensphasen. Nichtsdestoweniger erfordert die in der Meta-Analyse angestrebte Vergleichbarkeit der Ergebnisse eine ausschließliche Verwendung von Tieren, welche keinen vom Erhaltungsstoffwechsel des Pferdes oder Ponys maßgeblich abweichenden Bedarf aufweisen. Dies ist aber bei Equiden im Wachstum und während der Trächtigkeit und Laktation der Fall (GFE, 2014), weshalb diese Tiere in der Studie nicht berücksichtigt wurden. Arbeitende Pferde und Ponys weisen hinsichtlich der Mengenelemente Calcium, Phosphor und Magnesium keinen erhöhten Bedarf auf (GFE, 2014) und wurden entsprechend in der ersten Studie mit einbezogen. Zwar zeigen auch diese Mengenelemente gewisse Verluste über den Schweiß, welche allerdings gering sind (HARRIS et al., 2006). Hinsichtlich der Mineralstoffe Natrium, Kalium und Chlorid, für welche durchaus ein Mehrbedarf für Leistung empfohlen wird (GFE, 2014), wurden die arbeitenden Tiere mit den nicht arbeitenden Pferden und Ponys im Erhaltungsstoffwechsel verglichen und dies entsprechend kenntlich gemacht.

4.1.3. Metabolisches Körpergewicht als Bezugsgröße

Die teils in ihrer Einheit variierenden Angaben aus den jeweiligen Studien wurden im Zuge der Vergleichbarkeit auf eine Bezugsgröße umgerechnet. Wie schon in vorangegangenen Meta-Analysen, beispielsweise von Kienzle und Burger (2011), Mack et al. (2015) und Böswald et al. (2018), wurde hierfür das metabolische Körpergewicht mg/kg MBW herangezogen. In Spezies, in welchen das Körpergewicht je nach Größe

stark variieren kann, ist diese Bezugsgröße sinnvoll (NRC, 2006; RUCKER, 2007; GFE, 2014). Eine Zuteilung von Nährstoffen anhand des Körpergewichts (mg/kg BW) würde zu groben Über- (bei großen Individuen) oder Unterschätzungen (bei kleinen Individuen) des Bedarfs führen (RUCKER & STORMS, 2002). Insofern gestaltet sich die Auswahl des metabolischen Körpergewichts als gemeinsame Bezugsgröße als sinnvoll.

4.1.4. Einteilung in Pony und Pferd

Als Grundlage für die Klassifizierung in Pony oder Pferd wurde in der aktuellen Meta-Analyse das Körpergewicht der Tiere herangezogen. Bei einem Gewicht oberhalb von 300 kg wurden die Tiere in die Kategorie Pferd eingeteilt, während leichtere Tiere als Ponys gewertet wurden. Es ist bei einem solchen Vorgehen durchaus möglich, dass manche Ponys mit mehr Gewicht als 300 kg als Pferde gewertet würden. Umgekehrt (leichtere Pferde als 300 kg) ist das eher als unwahrscheinlich anzunehmen. Um diese Ungenauigkeit zu eliminieren, wurden die Studien, von welchen die Rasse bekannt war, nochmals überprüft. Ein Pony aus der Studie von Schiele (2008) beispielsweise war zeitweise schwerer als 300 kg. Dieses Pony wurde dennoch als Pony gewertet und nicht als Pferd. Da nicht in allen Studien die Rasse der Tiere angegeben war, hätte eine Einteilung auf dieser Grundlage zu einer Limitierung der Studienauswahl geführt. Eine Einteilung nach Widerristhöhe beispielsweise würde eine noch effektivere Lösung darstellen, gleichzeitig wäre die Auswahl an in Frage kommenden Studien dann noch stärker begrenzt. Aus diesem Grund stellt die Einteilung nach Körpergewicht die einzig mögliche Vorgehensweise dar. Zwar könnte eine mögliche Fehleinstufung einiger Ponys als Pferde vorhandene Unterschiede verschleiern, umgekehrt aber ist es unwahrscheinlich, dass Unterschiede aufgezeigt werden, die nur durch die Verteilung der Tiere auf die beiden Gruppen zustande kommen.

4.2. Diskussion der Ergebnisse

4.2.1. Unterschiede zwischen Pony und Pferd

Die Ergebnisse der vorliegenden Meta-Analyse zeigten geringere endogene fäkale Magnesiumverluste bei Ponys im Vergleich zu Pferden. Außerdem lag die scheinbare Verdaulichkeit von Calcium bei einer Aufnahme unterhalb des Bedarfs bei Ponys höher als bei Pferden. Ebenso ließ sich bei Ponys eine höhere Calciumretention feststellen. Die scheinbare und wahre Verdaulichkeit von Chlorid war bei Ponys höher als bei Pferden.

Die bei Ponys im Vergleich zu Pferden beobachteten geringeren endogenen fäkalen Verluste an Magnesium führen zu einem faktoriell kalkulierten geringeren Magnesiumbedarf bei Ponys. Womöglich lässt sich diese Beobachtung darauf zurückführen, dass Ponys typischerweise eher aus kalten Regionen stammen und Pflanzen, welche bei niedrigen Temperaturen aufwachsen, geringere Magnesiumgehalte aufweisen als bei höheren Temperaturen gediehene Pflanzen (GRUNES & WELCH, 1989). Ponys wären vor diesem Hintergrund entsprechend eher dazu gezwungen, Magnesium zu sparen. Da Ponys im ursprünglichen Habitat häufig wenig Futter vorfinden, wäre es denkbar, dass mit niedriger Futterraufnahme auch gelegentlich eine niedrige Calciumaufnahme einhergeht, sodass eine effizientere Absorption bei geringer Aufnahme von Bedeutung sein könnte. Damit ließe sich die bei Ponys beobachtete höhere scheinbare Calciumverdaulichkeit im Bereich niedriger Aufnahmen unterhalb des Bedarfs erklären.

Obwohl die Interpretation der Retention in Bezug auf Komplikationen des Messverfahrens vorsichtig erfolgen muss, könnte die höhere Calciumretention bei Ponys im Vergleich zu Pferden ebenfalls damit erklärt werden, dass Ponys sich durch Speicherung von Calcium auf Zeiten geringer Nahrungsaufnahme vorbereiten.

Eine denkbare Begründung für die vergleichsweise höhere scheinbare als auch wahre Chloridverdaulichkeit bei Ponys im Vergleich zu Pferden könnte die bei Ponys größere allometrische Beziehung zwischen der Größe des Verdauungstrakts und des metabolischen Körpergewichts darstellen. Der leere Magen-Darm-Trakt entspricht 5 % des Körpergewichts (COENEN & MEYER, 2019a). Sofern es nicht zu einer Kompensation durch Vergrößerung der resorptiven Oberfläche kommt, nimmt die Oberfläche des Verdauungstrakts im Verhältnis zur metabolischen Körpermasse mit zunehmender Größe des Tieres ab, was für eine größere resorptive Fähigkeit des Ponys sprechen würde.

4.2.2. Einfluss der Mineralstoffquelle

Speziell für Phosphor ergaben sich interessante Erkenntnisse hinsichtlich der verwendeten Phosphorquelle. So konnte, obwohl die renale Phosphorexkretion bei Equiden physiologischerweise gering ist (TORIBIO, 2007), bei Verwendung anorganischer, insbesondere wasserlöslicher Phosphorquellen ein Anstieg von Phosphor im Harn beobachtet werden. Auch eine Hyperphosphatämie trat bei Einsatz der genannten Quellen auf. Zudem zeigten wasserlösliche anorganische Phosphorquellen eine höhere scheinbare und wahre Verdaulichkeit als Phosphor organischer oder schlecht wasserlöslicher anorganischer Herkunft. Für Calcium wiederum lag die wahre Verdaulichkeit organischen Calciums oberhalb derer anorganischer Calciumquellen. Hinsichtlich der Magnesiumverdaulichkeit konnte kein Unterschied zwischen den verwendeten Quellen festgestellt werden.

Der beobachtete Phosphoranstieg in Serum und Harn unter Einsatz anorganischer, insbesondere gut wasserlöslicher Phosphatquellen (Monocalciumphosphat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), Natriumhydrogenphosphat (Na_2HPO_4) und Natriumdihydrogenphosphat (NaH_2PO_4)), deckt sich mit bisher bekannten Ergebnissen bei Hunden und Katzen (PASTOOR et al., 1995; DOBENECKER et al., 2018a; COLTHERD et al., 2019; DOBENECKER et al., 2021a; STEFFEN & DOBENECKER, 2023). Es ist davon auszugehen, dass diese Ergebnisse auf ein Gesundheitsrisiko hindeuten. So ist bekannt, dass ein hoher Phosphorkonsum beim Menschen das Risiko für verschiedene chronische Gesundheitsprobleme steigert (CALVO et al., 2014). Zu nennen sind hier vorwiegend Risiken für die Nierengesundheit in Form makroskopischer Nierenläsionen (MACKAY & OLIVER, 1935) und tubulärer Ablagerungen (ELLER et al., 2011) sowie phosphorinduzierte Gefäßschäden (SAGE et al., 2011; RITZ et al., 2012) und Beeinträchtigungen der Zellgesundheit (DI MARCO et al., 2008). Aber auch ein Zusammenhang zwischen hoher Phosphoraufnahme und der Entstehung von Osteoporose wurde vermutet (JOWSEY et al., 1974). Auch bei Hunden konnten die genannten Effekte bereits beobachtet werden: Hochlösliche anorganische Phosphate zeigen hier potenziell gravierende Auswirkungen auf den Stoffwechsel und gefährden in diesem Zusammenhang wiederum die Gesundheit von Nieren, Herz-Kreislauf- und Skelett-System (DOBENECKER et al., 2021b). Bei Pferden kommen weit oberhalb des Bedarfs liegende Versorgungen mit Phosphor häufig vor (KIENZLE & BOCKHORN, 2018), wobei dieser zum Großteil aus Futterzusätzen stammt (VAN OST, 2015). Wenn dabei wasserlösliche anorganische Phosphate verwendet werden, ist dies als besonders kritisch

zu betrachten. Unter diesen Aspekten sollten wasserlösliche, anorganische Phosphate in der Ernährung von Equiden derzeitig gemieden werden. Die in der vorliegenden Arbeit zudem festgestellte höhere scheinbare und wahre Verdaulichkeit wasserlöslicher anorganischer Phosphate im Vergleich zu Phosphor aus anderen Quellen spielt dann eine große Rolle. Denn wenn wasserlösliche Phosphorquellen nun nicht mehr verwendet und in diesem Zuge aus der Bedarfsberechnung ausgeklammert werden, ergibt sich durch die niedrigere wahre Verdaulichkeit der übrigen Phosphorquellen ein höherer Phosphorbedarf als in den aktuellen Empfehlungen angenommen.

Dass für Calcium organischen Ursprungs eine höhere wahre Verdaulichkeit als für Calcium anorganischer Herkunft festgestellt werden konnte, könnte mit der Löslichkeit der Calciumquellen zusammenhängen. Während Calcium aus Gras vorwiegend löslich ist (KOSTYTSCHEW & BERG, 1929) und in Gras und Leguminosen eine Löslichkeit von 50 bis 80 % aufweisen kann (PIERCE & APPLEMAN, 1943), ist die häufigste verwendete anorganische Quelle Calciumcarbonat (CaCO_3) im Vergleich dazu nur schlecht löslich in Wasser (SEIDELL, 1928). Da bei Pferden die Calciumaufnahme hauptsächlich im Dünndarm in Form von Ca^{2+} -Ionen stattfindet (CEHAK et al., 2012), ist eine bessere Verdaulichkeit gut löslicher Quellen im Vergleich zu schlecht löslichen Komponenten nicht verwunderlich und könnte entsprechend die höhere Verdaulichkeit des Calciums aus organischen Quellen erklären. Für die praktische Fütterung lässt sich schlussfolgern, dass vorwiegend mit Raufutter gefütterte Equiden eine knappe Calciumversorgung voraussichtlich besser verkraften als solche, die Calcium überwiegend aus anorganischen Ergänzungen erhalten. Dies setzt allerdings voraus, dass keine Pflanzen wie beispielsweise Tropengräser verwendet werden, die einen hohen Gehalt an Oxalat aufweisen, welches bekanntermaßen die Verfügbarkeit von Calcium für Pferde herabsetzt (SWARTZMAN et al., 1978; BLANEY et al., 1981).

Hinsichtlich der scheinbaren Magnesiumverdaulichkeit konnte kein Unterschied bezüglich der verwendeten Quelle verzeichnet werden. Dies lässt sich dadurch nachvollziehen, dass es sich bei dem hauptsächlich anorganischen Anteil des Magnesiums um Magnesiumoxid (MgO) handelte, welches als hochverfügbar gilt (HARRINGTON & WALSH, 1980), während aber auch Magnesium aus Blättern selbst für Menschen sehr gut verfügbar ist (WILKINSON et al., 1990), deren Fähigkeit zur Verdauung pflanzlichen Materials deutlich geringer ist als jene des Pferdes.

4.2.3. Einfluss körperlicher Arbeit

Arbeitende Equiden wiesen eine höhere scheinbare und wahre Verdaulichkeit des Natriums sowie geringere endogene fäkale Natriumverluste auf als Ponys und Pferde im Erhaltungsstoffwechsel. In geringerem Ausmaß war eine solche Zunahme der wahren Verdaulichkeit auch für Kalium zu beobachten. Für Chlorid konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen arbeitenden und nicht arbeitenden Equiden bezüglich der scheinbaren oder wahren Verdaulichkeit gefunden werden, allerdings schieden arbeitende Pferde und Ponys deutlich weniger Chlorid über den Harn aus als Equiden in Ruhe.

Die Natriumverdaulichkeit ist insbesondere bei nicht arbeitenden Pferden und Ponys verglichen mit anderen Spezies (ENTRINGER et al., 1975; MEYER et al., 1999; BURMEIER, 2017; BÖSWALD et al., 2023; BÖSWALD et al., 2024) eher niedrig. Sie ähnelt jedoch der von weiteren Dickdarmverdauern (CLAUSS et al., 2007; CLAUSS et al., 2009). In einer Studie von Holdø et al. (2002) zeigten afrikanische Elefanten in natriumreichen Gebieten eine höhere Natriumausscheidung im Kot im Vergleich zu geringeren Natriumausscheidungen bei Elefanten aus Gebieten mit vergleichsweise weniger Natrium. Diese Erkenntnisse lassen vermuten, dass bei Dickdarmverdauern der Absorption von Natrium über den Darm neben den renalen Mechanismen eine größere Rolle in der Regulation zukommt als bei anderen Spezies wie Menschen, Hunden und Mäusen, bei welchen der Natriummetabolismus in erster Linie über die Niere gesteuert wird (SELKURT, 1954; BIE, 2018). Diese Steigerung der Natriumabsorption im Darm bei arbeitenden Equiden könnte zum Teil einen Erklärungsansatz dafür liefern, wieso arbeitende Pferde in der Regel keine Symptome eines Natriummangels zeigen, selbst wenn ihr faktoriell kalkulierter Natriumbedarf nicht ganz gedeckt ist (VAN OST, 2015). Damit könnte ebenfalls erklärt werden, weshalb die gezielte Zuführung von Elektrolyten, um den Körper auf anstrengende Aktivitäten vorzubereiten, bei Equiden nicht empfohlen wird (SCHOTT II & HINCHCLIFF, 1998). Denn wenn davon ausgegangen wird, dass die Up-Regulation der intestinalen Natriumabsorption etwas mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Regulation über die Niere, würde eine sehr reichliche Natriumzufuhr unmittelbar vor körperlicher Arbeit höchstwahrscheinlich zu einer geringeren Verdaulichkeit führen. Für die genannte Hypothese sprechen außerdem die Ergebnisse einer Studie von Zeyner et al. (2017), in welcher arbeitenden Pferden unterschiedliche orale Dosen Salz (NaCl) verabreicht wurden und bei kleinerer Dosis stärkere Auswirkungen auf den Metabolismus beobachtet werden konnten. Dies könnte mit der hier vermuteten intestinalen Natriumregulation bei Equiden in Einklang gebracht werden,

nämlich einer vermehrten Natriumabsorption aus dem Darm bei niedriger Salzdosis und im umgekehrten Fall einer verminderten intestinalen Natriumabsorption bei reichlicher Salzfütterung.

Auch die wahre Kaliumverdaulichkeit nahm bei Pferden und Ponys durch Arbeit zu, was in die faktorielle Kalkulation des Kaliumbedarfs einbezogen werden sollte.

Die bei arbeitenden Pferden und Ponys im Gegensatz zu Equiden in Ruhe verzeichnete deutlich geringere Chloridausscheidung über den Harn spricht für hohe Schweißverluste an Chlorid bei körperlicher Aktivität. Für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Studien, in welchen die Schweißverluste gemessen wurden, traf dies auch zu, was sich mit Berichten über quantitativ hohe Chloridverluste über den Schweiß bei arbeitenden Equiden deckt (FLAMINIO & RUSH, 1998; SPOONER et al., 2010).

5. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Meta-Analyse wurde der Calcium-, Phosphor- und Magnesiumstoffwechsel hinsichtlich etwaiger Unterschiede zwischen Ponys und Pferden sowie des Einflusses verschiedener Mineralstoffquellen, insbesondere des Phosphors, untersucht. Hierfür wurden die in der Meta-Analyse von Kienzle und Burger (2011) verwendeten Dissertationen sowie weitere Studien berücksichtigt, welche über Google Scholar, das DBIS der LMU München, PubMed und den OPAC der LMU München sowie der Bayerischen Staatsbibliothek gesucht wurden. Daten aus 42 Studien wurden zugrunde gelegt und in Bezug auf die Parameter Verdaulichkeit, renale Exkretion, Retention und Serumgehalt analysiert. Des Weiteren sollten die Mengenelemente Natrium, Kalium und Chlorid unter Berücksichtigung der genannten Parameter untersucht werden, wofür Literaturdaten aus 33 Studien mittels oben genannter Recherche gefunden und evaluiert wurden. Neben etwaigen Unterschieden zwischen Ponys und Pferden stand hier der Einfluss körperlicher Arbeit auf den Stoffwechsel der genannten Mineralstoffe im Vordergrund. Um die Daten miteinander vergleichen zu können, wurden alle Angaben auf die gemeinsame Bezugsgröße mg/kg MBW umgerechnet. Als Hauptmethode wurden Diagramme verwendet, welche dem Lucas Test zur Bestimmung der wahren Verdaulichkeit und der endogenen fäkalen Verluste ähneln. Die Analyse der Daten innerhalb spezifischer Aufnahmebereiche erfolgte mittels t-Tests und ANOVAs, gefolgt von Holm-Sidak-Post-hoc-Tests.

Der Einsatz anorganischer wasserlöslicher Phosphate führt bei Pferden und Ponys zu Hyperphosphatämie und Hyperphosphaturie (Tabelle 2). Dieses Phänomen ist bereits bei anderen Spezies als Gesundheitsrisiko bekannt.

Die wahre Verdaulichkeit von Natrium lag bei arbeitenden Equiden im Vergleich zu nicht arbeitenden Pferden und Ponys höher (Tabelle 2). Der Darm scheint bei Equiden entsprechend eine größere Rolle in der Regulation des Natriumstoffwechsels zu spielen als bei anderen Spezies.

Tabelle 2: Übersicht über die relevanten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit.

Calcium		
Parameter	Anorganisch	Organisch
Scheinbare Verdaulichkeit in % *	39 ± 18 n = 127	48 ± 10 n = 163
Wahre Verdaulichkeit in % ¹	50 n = 164	80 n = 149

Phosphor		
Parameter	Anorganisch, gut wasserlöslich	Sonstige
Scheinbare Verdaulichkeit in % ^{xx}	20 (12:31) n = 40	8 (-1,5:16) n = 264
Renale Exkretion in % der scheinbar verdauten Phosphormenge ^{xx}	32 (17:66) n = 10	4 (2:10) n = 67
Serumwerte in mmol/l [†]	1,62 ± 0,23 n = 10	1,01 ± 0,19 n = 60
Magnesium		
Parameter	Pony	Pferd
Wahre Verdaulichkeit in % ¹	44 n = 136	46 n = 181
Endogene fäkale Verluste in mg/kg MBW ²	5 n = 136	17 n = 181
Natrium		
Parameter	Arbeit	Erhaltung
Wahre Verdaulichkeit in % ¹	87 n = 92	80 n = 276
Endogene fäkale Verluste in mg/kg MBW ²	26 n = 92	36 n = 276
Kalium		
Parameter	Arbeit	Erhaltung
Wahre Verdaulichkeit in % ¹	86 n = 92	81 n = 205
Endogene fäkale Verluste in mg/kg MBW ²	37 n = 92	43 n = 205
Chlorid		
Parameter	Pony	Pferd
Scheinbare Verdaulichkeit in % ^{xx}	98 (94:99) n = 26	94 (90:96) n = 38
Wahre Verdaulichkeit in % ¹	100 n = 26	93 n = 38

* Two Way Analysis of Variance, Holm-Sidak-Post-hoc-Test (MW ± SD)

^{xx} Mann-Whitney Rank Sum Test (M (Q₁:Q₃))

[†] Student's t-test (MW ± SD)

¹ Berechnet im Lucas Test aus der Steigung der Regressionsgleichung.

² Berechnet im Lucas Test aus dem Y-Achsenabschnitt der Regressionsgleichung.

6. SUMMARY

In the present meta-analysis, calcium, phosphorus, and magnesium metabolism were examined regarding potential differences between ponies and horses, as well as the influence of different mineral sources, particularly phosphorus. For this purpose, the dissertations used in the meta-analysis by Kienzle and Burger (2011) and other studies were considered, which were searched via Google Scholar, the DBIS of LMU Munich, PubMed, and the OPAC of LMU Munich and the Bavarian State Library. Data from 42 studies were used and analyzed with regard to the parameters of digestibility, renal excretion, retention, and serum levels. Furthermore, the macroelements sodium, potassium, and chloride were studied considering the aforementioned parameters, for which literature data from 33 studies were found and evaluated through the aforementioned search methods. In addition to potential differences between ponies and horses, the influence of physical work on the metabolism of the aforementioned minerals was the main focus. To enable comparison of the data, all values were converted to the common reference unit of mg/kg BW. Diagrams similar to the Lucas test for determining true digestibility and endogenous faecal losses were used as the primary method. Data analysis within specific intake ranges was performed using t-tests and ANOVAs, followed by Holm-Sidak post-hoc tests.

The use of inorganic water-soluble phosphates leads to hyperphosphatemia and hyperphosphaturia in horses and ponies (Table 2). This phenomenon is already known as a health risk in other species.

True digestibility of sodium was higher in working equines compared to non-working horses and ponies (Table 2). The intestine seems to play a greater role in regulating sodium metabolism in equines than in other species.

Table 2: Overview of the relevant results of the present study.

Calcium		
Parameter	Inorganic	Organic
Apparent digestibility in % *	39 ± 18 n = 127	48 ± 10 n = 163
True digestibility in % ¹	50 n = 164	80 n = 149

SUMMARY

Phosphorus		
Parameter	Inorganic, water soluble	Remaining
Apparent digestibility in % ^{xx}	20 (12:31) n = 40	8 (-1.5:16) n = 264
Renal excretion in % of the apparently digested phosphorus quantity ^{xx}	32 (17:66) n = 10	4 (2:10) n = 67
Serum level in mmol/l [†]	1.62 ± 0.23 n = 10	1.01 ± 0.19 n = 60
Magnesium		
Parameter	Pony	Pferd
True digestibility in % ¹	44 n = 136	46 n = 181
Endogenous faecal losses in mg/kg MBW ²	5 n = 136	17 n = 181
Sodium		
Parameter	Arbeit	Erhaltung
True digestibility in % ¹	87 n = 92	80 n = 276
Endogenous faecal losses in mg/kg MBW ²	26 n = 92	36 n = 276
Potassium		
Parameter	Arbeit	Erhaltung
True digestibility in % ¹	86 n = 92	81 n = 205
Endogenous faecal losses in mg/kg MBW ²	37 n = 92	43 n = 205
Chloride		
Parameter	Pony	Pferd
Apparent digestibility in % ^{xx}	98 (94:99) n = 26	94 (90:96) n = 38
True digestibility in % ¹	100 n = 26	93 n = 38

* Two Way Analysis of Variance, Holm-Sidak-Post-hoc-test (MW ± SD)

^{xx} Mann-Whitney Rank Sum test (M (Q₁:Q₃))

[†] Student's t-test (MW ± SD)

¹ calculated in the Lucas test from the slope of the regression equation.

² calculated in the Lucas test from the y-intercept of the regression equation.

7. LITERATURVERZEICHNIS

Argenzio RA, Lowe JE, Hintz HF, Schryver HF. Calcium and Phosphorus Homeostasis in Horses. *The Journal of nutrition* 1974; 104: 18-27.

Bailey MA, Mullins JJ, Kenyon CJ. Mineralocorticoid and Glucocorticoid Receptors Stimulate Epithelial Sodium Channel Activity in a Mouse Model of Cushing Syndrome. *Hypertension* 2009; 54: 890-6.

Becker N, Kienzle E, Dobenecker B. Kalziummangel - bei wachsenden und ausgewachsenen Hunden ein Problem. *Tierärztliche Praxis Ausgabe K: Kleintiere/Heimtiere* 2012; 40: 135-9.

Bie P. Mechanisms of sodium balance: total body sodium, surrogate variables, and renal sodium excretion. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 2018; 315: R945-R62.

Blaney BJ, Gartner RJW, McKenzie RA. The inability of horses to absorb calcium from calcium oxalate. *The Journal of Agricultural Science* 1981; 97: 639-41.

Bochnia M, Pietsch C, Wensch-Dorendorf M, Greef M, Zeyner A. Effect of Hay Soaking Duration on Metabolizable Energy, Total and Prececal Digestible Crude Protein and Amino Acids, Non-Starch Carbohydrates, Macronutrients and Trace Elements. *Journal of Equine Veterinary Science* 2021; 101: 103452.

Böswald LF, Dobenecker B, Clauss M, Kienzle E. A comparative meta-analysis on the relationship of faecal calcium and phosphorus excretion in mammals. *Journal of animal physiology and animal nutrition* 2018; 102: 370-9.

Böswald LF (2018) Vergleichende Meta-Analyse über die Beziehung zwischen der faecalen Calcium-und Phosphorausscheidung bei Säugetieren. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München

- Böswald LF, Klein C, Dobenecker B, Kienzle E. Factorial calculation of calcium and phosphorus requirements of growing dogs. PLoS One 2019; 14: e0220305.
- Böswald LF, Wenderlein J, Siegert W, Straubinger RK, Kienzle E. True mineral digestibility in C57Bl/6J mice. PLoS One 2023; 18: e0290145.
- Böswald LF, Matzek D, Popper B. Digestibility of crude nutrients and minerals in C57Bl/6J and CD1 mice fed a pelleted lab rodent diet. Scientific Reports 2024; 14: 1791.
- Brobst D. Review of the pathophysiology of alterations in potassium homeostasis. Journal of the American Veterinary Medical Association 1986; 188: 1019-25.
- Bronner F. Mechanisms of Intestinal Calcium Absorption. Journal of Cellular Biochemistry 2003; 88: 387-93.
- Burmeier HU (2017) Auswirkungen des Natrium-und Rohproteingehalts sowie der Proteinqualität im Futter auf die Harnzusammensetzung von gesunden Katzen. Dissertation. Freie Universität Berlin
- Calvo MS, Moshfegh AJ, Tucker KL. Assessing the Health Impact of Phosphorus in the Food Supply: Issues and Considerations. Advances in Nutrition 2014; 5: 104-13.
- Cayzer J, Jones BR. Canine hyperadrenocorticism. New Zealand Veterinary Journal 1993; 41: 53-68.
- Cehak A, Burmester M, Geburek F, Feige K, Breves G. Electrophysiological characterization of electrolyte and nutrient transport across the small intestine in horses. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 2009; 93: 287-94.

Cehak A, Wilkens MR, Guschlbauer M, Mrochen N, Schröder B, Feige K, Breves G. In vitro studies on intestinal calcium and phosphate transport in horses. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 2012; 161: 259-64.

Cheeke PR, Amberg JW. Comparative calcium excretion by rats and rabbits. *Journal of Animal Science* 1973; 37: 450-4.

Chen Jr. PS, Neuman WF. Renal Excretion of Calcium by the Dog. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 1955; 180: 623-31.

Clark JM. The 3Rs in research: a contemporary approach to replacement, reduction and refinement. *British Journal of Nutrition* 2018; 120: S1-S7.

Clarke LL, Roberts MC, Grubb BR, Argenzio RA. Short-term effect of aldosterone on Na-Cl transport across equine colon. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 1992; 262: R939-R46.

Clauss M, Castell JC, Kienzle E, Schramel P, Dierenfeld ES, Flach EJ, Behlert O, Streich WJ, Hummel J, Hatt JM. Mineral absorption in the black rhinoceros (*Diceros bicornis*) as compared with the domestic horse. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2007; 91: 193-204.

Clauss M, Lang-Deuerling S, Kienzle E, Medici EP, Hummel J. Mineral absorption in tapirs (*Tapirus spp.*) as compared to the domestic horse. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2009; 93: 768-76.

Clauss M, Burger B, Liesegang A, Del Chicca F, Kaufmann-Bart M, Riond B, Hässig M, Hatt JM. Influence of diet on calcium metabolism, tissue calcification and urinary sludge in rabbits (*Oryctolagus cuniculus*). *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2012; 96: 798-807.

- Coenen M, Meyer H. Das Pferd in Zahlen - allgemeine Daten: Körperzusammensetzung und Verteilung der Gewebe und Organe. In: Pferdefütterung, 6 edn. Coenen M, Vervuert I, eds. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 2019a: 23-6.
- Coenen M, Meyer H. Energie-, Nährstoff- und Strukturbedarf: Mengenelemente. In: Pferdefütterung, 6 edn. Coenen M, Vervuert I, eds. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 2019b: 98-107.
- Coltherd JC, Staunton R, Colyer A, Thomas G, Gilham M, Logan DW, Butterwick R, Watson P. Not all forms of dietary phosphorus are equal: an evaluation of postprandial phosphorus concentrations in the plasma of the cat. *British Journal of Nutrition* 2019; 121: 270-84.
- Cuddeford D, Pearson RA, Archibald RF, Muirhead RH. Digestibility and gastrointestinal transit time of diets containing different proportions of alfalfa and oat straw given to Thoroughbreds, Shetland ponies, Highland ponies and donkeys. *Animal Science* 1995; 61: 407-17.
- Di Marco GS, Hausberg M, Hillebrand U, Rustemeyer P, Wittkowski W, Lang D, Pavenstädt H. Increased inorganic phosphate induces human endothelial cell apoptosis in vitro. *American Journal of Physiology-Renal Physiology* 2008; 294: F1381-F7.
- Dobenecker B, Hertel-Böhnke P, Webel A, Kienzle E. Renal phosphorus excretion in adult healthy cats after the intake of high phosphorus diets with either calcium monophosphate or sodium monophosphate. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2018a; 102: 1759-65.
- Dobenecker B, Webel A, Reese S, Kienzle E. Effect of a high phosphorus diet on indicators of renal health in cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery* 2018b; 20: 339-43.

- Dobenecker B, Kienzle E, Siedler S. The Source Matters—Effects of High Phosphate Intake from Eight Different Sources in Dogs. *Animals* 2021a; 11: 3456.
- Dobenecker B, Reese S, Herbst S. Effects of dietary phosphates from organic and inorganic sources on parameters of phosphorus homeostasis in healthy adult dogs. *PLoS One* 2021b; 16: e0246950.
- Dobenecker B, Vervuert I. Bedarf an Mengenelementen. In: *Supplemente zur Tierernährung und Diätetik für Studium und Praxis*, 13 edn. Kamphues J, Wolf P, Coenen M, Eder K, Liesegang A, Paßlack N, Vervuert I, Visscher C, Zebeli Q, Zentek J, eds. Hannover: M. & H. Schaper 2024: 264-7.
- Dyer J, Al-Rammahi M, Waterfall L, Salmon KSH, Geor RJ, Bouré L, Edwards GB, Proudman CJ, Shirazi-Beechey SP. Adaptive response of equine intestinal Na⁺/glucose co-transporter (SGLT1) to an increase in dietary soluble carbohydrate. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology* 2009; 458: 419-30.
- Eberspächer-Schweda E (2023) *AnaesthesiaSkills in veterinary medicine: Perioperative management in small, companion and domestic animals*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Eder K, Kamphues J, Liesegang A, Wolf P. Verdaulichkeit. In: *Supplemente zur Tierernährung und Diätetik für Studium und Praxis*, 13 edn. Kamphues J, Wolf P, Coenen M, Eder K, Liesegang A, Paßlack N, Vervuert I, Visscher C, Zebeli Q, Zentek J, eds. Hannover: M. & H. Schaper 2024: 13-8.
- Eller P, Eller K, Kirsch AH, Patsch JJ, Wolf AM, Tagwerker A, Stanzl U, Kaindl R, Kahlenberg V, Mayer G, Patsch JR, Rosenkranz AR. A Murine Model of Phosphate Nephropathy. *The American Journal of Pathology* 2011; 178: 1999-2006.

- Elliott SB (2010) Effects of pituitary pars intermedia dysfunction (PPID), season, and pasture diet on blood adrenocorticotrophic hormone and metabolite concentrations in horses. Thesis. University of Tennessee-Knoxville
- Entringer RP, Plumlee MP, Conrad JH, Cline TR, Wolfe S. Influence of diet on passage rate and apparent digestibility by growing swine. *Journal of Animal Science* 1975; 40: 486-94.
- Finco DR, Barsanti JA, Brown SA. Influence of dietary source of phosphorus on fecal and urinary excretion of phosphorus and other minerals by male cats. *American Journal of Veterinary Research* 1989; 50: 263-6.
- Flaminio MJBF, Rush BR. Fluid and electrolyte balance in endurance horses. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1998; 14: 147-58.
- Gäbel G. Wasser- und Natriumhaushalt. In: *Physiologie der Haustiere*, 6 edn. Breves G, Diener M, Gäbel G, eds. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 2022: 339-46.
- GfE: Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1982) Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Pferden. Mit Tabellen zur Berechnung der Nährstoffzufuhr. DLG-Verlag: Frankfurt
- GfE: Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (1994) Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Pferden. Mit Tabellen zur Berechnung der Nährstoffzufuhr. DLG-Verlag: Frankfurt
- GfE: Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2014) Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Pferden. DLG-Verlag: Frankfurt
- Giddings RF, Argenzio RA, Stevens CE. Sodium and chloride transport across the equine cecal mucosa. *American Journal of Veterinary Research* 1974; 35: 1511-4.

- Glatter M, Bochnia M, Wensch-Dorendorf M, Greef JM, Zeyner A. Feed Intake Parameters of Horses Fed Soaked or Steamed Hay and Hygienic Quality of Hay Stored following Treatment. *Animals* 2021; 11: 2729.
- Grunes DL, Welch RM. Plant contents of magnesium, calcium and potassium in relation to ruminant nutrition. *Journal of animal science* 1989; 67: 3485-94.
- Guzzo RA, Jackson SE, Katzell RA. Meta-analysis analysis. *Research in Organizational Behavior* 1987; 9: 407-42.
- Hagen KB, Tschudin A, Liesegang A, Hatt J-M, Clauss M. Organic matter and macromineral digestibility in domestic rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) as compared to other hindgut fermenters. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2015; 99: 1197-209.
- Haidich AB. Meta-analysis in medical research. *Hippokratia* 2010; 14: 29-37.
- Harrington DD, Walsh JJ. Equine magnesium supplements: Evaluation of magnesium oxide, magnesium sulphate and magnesium carbonate in foals fed purified diets. *Equine Veterinary Journal* 1980; 12: 32-3.
- Harris PA, Coenen M, Frape D, Jeffcott LB, Meyer H. Equine nutrition and metabolic diseases: nutrient requirements. In: *The equine manual*, 2 edn. Higgins AJ, Snyder JR, eds.: Saunders Elsevier 2006: 171-90.
- Hazell T. Minerals in foods: dietary sources, chemical forms, interactions, bioavailability. *World Review of Nutrition and Dietetics* 1985; 46: 1-123.
- Hedges LV. Meta-Analysis. *Journal of Educational Statistics* 1992; 17: 279-96.
- Hintz HF, Schryver HF. Availability to Ponies of Calcium and Phosphorus from Various Supplements. *Journal of Animal Science* 1972a; 34: 979-80.

- Hintz HF, Schryver HF. Magnesium Metabolism in the Horse. *Journal of Animal Science* 1972b; 35: 755-9.
- Hoffmann M, Steinhöfel O, Fuchs R. The digestibility of crude nutrients in horses. 2. Comparative studies on the digestive capacity of a thoroughbred horse, pony and wether. *Archiv für Tierernährung* 1987; 37: 351-62.
- Holbrook TC, Simmons RD, Payton ME, MacAllister CG. Effect of repeated oral administration of hypertonic electrolyte solution on equine gastric mucosa. *Equine Veterinary Journal* 2005; 37: 501-4.
- Holdø RM, Dudley JP, McDowell LR. Geophagy in the African elephant in relation to availability of dietary sodium. *Journal of Mammalogy* 2002; 83: 652-64.
- Hurwitz S. Homeostatic Control of Plasma Calcium Concentration. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology* 1996; 31: 41-100.
- Inoue Y, Osawa T, Matsui A, Asai Y, Murakami Y, Matsui T, Yano H. Changes of Serum Mineral Concentrations in Horses during Exercise. *Asian-Australian Journal of Animal Sciences* 2002; 15: 531-6.
- Jamieson MJ. Hyponatraemia. *British Medical Journal (Clinical research edition)* 1985; 290: 1723-8.
- Johnson PJ. Electrolyte and acid-base disturbances in the horse. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1995; 11: 491-514.
- Jowsey J, Reiss E, Canterbury JM. Long-term effects of high phosphate intake on parathyroid hormone levels and bone metabolism. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 1974; 45: 801-8.

Kapusniak LJ, Greene LW, Potter GD. Calcium, magnesium and phosphorus absorption from the small and large intestine of ponies fed elevated amounts of aluminum. *Journal of Equine Veterinary Science* 1988; 8: 305-9.

Kienzle E. Factorial Calculation of Nutrient Requirements in Lactating Queens. *The Journal of Nutrition* 1998; 128: S2609-S14.

Kienzle E, Zorn N. Bioavailability of minerals in the horse. *Proceedings of the 3rd European Equine Nutrition & Health Congress* 2006: 27-36.

Kienzle E, Burger A. Maintenance requirements of macro-elements in horses. *Übersichten zur Tierernährung* 2011; 39: 67-104.

Kienzle E, Bockhorni T. Nutrition of horses with equine pituitary pars intermedia dysfunction ("Cushing's syndrome") treated with pergolid - A field study. *Tierärztliche Praxis. Ausgabe G, Grosstiere/Nutztiere* 2018; 46: 249-56.

Kostytschew S, Berg V. Die Form der Calciumverbindungen in lebenden Pflanzengeweben. *Zeitschrift für wissenschaftliche Biologie. Abteilung E: Planta* 1929: 55-67.

Laflamme D, Backus R, Brown S, Butterwick R, Czarnecki-Maulden G, Elliott J, Fascetti A, Polzin D. A review of phosphorus homeostasis and the impact of different types and amounts of dietary phosphate on metabolism and renal health in cats. *Journal of Veterinary Internal Medicine* 2020; 34: 2187-96.

Langner K, Blaue D, Schedlbauer C, Starzonek J, Julliand V, Vervuert I. Changes in the faecal microbiota of horses and ponies during a two-year body weight gain programme. *PLoS One* 2020; 15: e0230015.

Lindinger MI, Waller AP. Tracing oral Na⁺ and K⁺ in sweat during exercise and recovery in horses. *Experimental Physiology* 2021; 106: 972-82.

- Lindinger MI. Oral Electrolyte and Water Supplementation in Horses. *Veterinary Sciences* 2022; 9: 626.
- Lindner A (1983) Untersuchungen zum Natriumstoffwechsel des Pferdes bei marginaler Versorgung und zusätzlicher Bewegungsbelastung. Dissertation. Tierärztliche Hochschule Hannover
- Lineva A, Kirchner R, Kienzle E, Kamphues J, Dobenecker B. A pilot study on in vitro solubility of phosphorus from mineral sources, feed ingredients and compound feed for pigs, poultry, dogs and cats. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2019; 103: 317-23.
- Lucke JN, Hall GN. Further studies on the metabolic effects of long distance riding: Golden Horseshoe Ride 1979. *Equine Veterinary Journal* 1980; 12: 189-92.
- Lwin K-O, Matsui H. Comparative Analysis of the Methanogen Diversity in Horse and Pony by Using *mcrA* Gene and Archaeal 16S rRNA Gene Clone Libraries. *Archaea* 2014; 2014: 483574.
- Mack JK, Alexander LG, Morris PJ, Dobenecker B, Kienzle E. Demonstration of uniformity of calcium absorption in adult dogs and cats. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2015; 99: 801-9.
- Mack SJ, Dugdale AH, Argo CMcG, Morgan RA, McGowan CM. Impact of water-soaking on the nutrient composition of UK hays. *The Veterinary Record* 2014; 174: 452.
- MacKay EM, Oliver J. Renal damage following the ingestion of a diet containing an excess of inorganic phosphate. *The Journal of Experimental Medicine* 1935; 61: 319.

- McCutcheon LJ, Geor RJ, Hare MJ, ECKER GL, Lindinger MI. Sweating rate and sweat composition during exercise and recovery in ambient heat and humidity. *Equine Veterinary Journal* 1995; 27: 153-7.
- Meyer H, Zentek J, Habernoll H, Maskell I. Digestibility and Compatibility of Mixed Diets and Faecal Consistency in Different Breeds of Dog. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 1999; 46: 155-66.
- Mortimer CE, Müller U (2010) *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*, 10 edn. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Neustädter L-T (2015) Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer unterschiedlichen Mengenelementversorgung auf den Mineralstoffhaushalt von Pferden. Dissertation. Tierärztliche Hochschule Hannover
- NRC (National Research Council) (2006) *Nutrient Requirements of Dogs and Cats*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- NRC (National Research Council) (2007) *Nutrient Requirements of Horses: Sixth Revised Edition*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- Ori Y, Herman M, Gafer U, Chagnac A, Korzets A, Tobar A, Chernin G, Izhak OB. Acute Phosphate Nephropathy—An Emerging Threat. *The American Journal of the Medical Sciences* 2008; 336: 309-14.
- Pagan JD. Nutrient digestibility in horses. *Advances in equine nutrition* 1998: 77-83.
- Paßlack N, Schmiedchen B, Raila J, Schweigert FJ, Stumpff F, Kohn B, Neumann K, Zentek J. Impact of Increasing Dietary Calcium Levels on Calcium Excretion and Vitamin D Metabolites in the Blood of Healthy Adult Cats. *PLoS One* 2016; 11: e0149190.

- Pastoor FJH, van 'T Klooster ATH, Mathot JNJJ, Beynen AC. Increasing Phosphorus Intake Reduces Urinary Concentrations of Magnesium and Calcium in Adult Ovariectomized Cats Fed Purified Diets. *The Journal of Nutrition* 1995; 125: 1334-41.
- Pierce EC, Appleman CO. Role of ether soluble organic acids in the cation-anion balance in plants. *Plant Physiology* 1943; 18: 224.
- Potter SJ, Bamford NJ, Baskerville CL, Harris PA, Bailey SR. Comparison of Feed Digestibility between Ponies, Standardbreds and Andalusian Horses Fed Three Different Diets. *Veterinary Sciences* 2021; 9: 15.
- Ritz E, Hahn K, Ketteler M, Kuhlmann MK, Mann J. Phosphate Additives in Food—a Health Risk. *Deutsches Ärzteblatt International* 2012; 109: 49-55.
- Rose RJ, Arnold KS, Church S, Paris R. Plasma and sweat electrolyte concentrations in the horse during long distance exercise. *Equine Veterinary Journal* 1980; 12: 19-22.
- Rucker R, Storms D. Interspecies Comparisons of Micronutrient Requirements: Metabolic vs. Absolute Body Size. *The Journal of Nutrition* 2002; 132: 2999-3000.
- Rucker RB. Allometric scaling, metabolic body size and interspecies comparisons of basal nutritional requirements. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2007; 91: 148-56.
- Russell Wms B, Burch R. The principles of humane experimental technique. Special edition South Mimms, Potters Bar, Herts, England: Universities Federation for Animal Welfare 1959; 165

Saastamoinen M, Särkijärvi S, Valtonen E. The Effect of Diet Composition on the Digestibility and Fecal Excretion of Phosphorus in Horses: A Potential Risk of P Leaching? *Animals* 2020; 10: 140.

Sage AP, Lu J, Tintut Y, Demer LL. Hyperphosphatemia-induced nanocrystals upregulate the expression of bone morphogenetic protein-2 and osteopontin genes in mouse smooth muscle cells in vitro. *Kidney International* 2011; 79: 414-22.

Schiele K (2008) Einfluss reduzierter Futterzuteilung zweier verschiedener Heuqualitäten auf Passagedauer und Verdaulichkeit bei Ponies. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München

Schmitt S (2018) Untersuchung zur Anpassung des Calciumstoffwechsels adulter Hunde an längerfristige marginale Calciumversorgung. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München

Schneider P, Müller-Peddinghaus R, Pappritz G, Trieb G, Trautwein G, Ueberberg H. Potassium Hydrogen Phosphate Induced Nephropathy in the Dog. II. Glomerular Alterations. *Veterinary Pathology* 1980a; 17: 720-37.

Schneider P, Pappritz G, Müller-Peddinghaus R, Bauer M, Lehmann H, Ueberberg H, Trautwein G. Potassium Hydrogen Phosphate Induced Nephropathy in the Dog. I. Pathogenesis of Tubular Atrophy. *Veterinary Pathology* 1980b; 17: 699-719.

Schott II HC, Hinchcliff KW. Treatments affecting fluid and electrolyte status during exercise. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1998; 14: 175-204.

Schryver HF, Craig PH, Hintz HF, Hogue DE, Lowe JE. The Site of Calcium Absorption in the Horse. *The Journal of Nutrition* 1970; 100: 1127-31.

Schryver HF, Hintz HF, Lowe JE. Calcium and Phosphorus Inter-relationships in Horse Nutrition. *Equine Veterinary Journal* 1971; 3: 102-9.

Schryver HF. Intestinal absorption of calcium and phosphorus by horses. *Journal of the South African Veterinary Association* 1975; 46: 39-42.

Schwarz F. Pferdefütterung: Fütterung von Freizeit- und Sportpferden. In: Kirchgeßner Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis, 14 edn. Stangl G, Schwarz F, Roth F, Südekam K-H, Eder K, eds. Frankfurt: DLG-Verlag 2014: 543-65.

Schwarzwald CC. Cardiovascular system. In: *Equine medicine, surgery and reproduction*, 2 edn. Mair TS, Love S, Schumacher J, Smith RKW, eds. Edinburgh: Saunders Elsevier 2013: 133-58.

Seidell A (1928) *Solubilities of Inorganic and Organic Compounds: A Compilation of Quantitative Solubility Data from the Periodical Literature*, 2 edn. van Nostrand

Selkurt EE. Sodium excretion by the mammalian kidney. *Physiological Reviews* 1954; 34: 287-333.

Siedler S, Dobenecker B. Effect of different P sources in high phosphorus diets with balanced Ca/P ratio on serum PTH, P and calcium levels as well as apparent digestibility of these minerals in dogs. *Proceedings of the 19th European Society of Veterinary and Comparative Nutrition (ESVCN) Congress 2015*: 17-9.

Snow DH, Kerr MG, Nimmo MA, Abbott EM. Alterations in blood, sweat, urine and muscle composition during prolonged exercise in the horse. *Veterinary Record* 1982; 110: 377-84.

Spooner HS, Nielsen BD, Schott II HC, Harris PA. Sweat composition in Arabian horses performing endurance exercise on forage-based, low Na rations. *Equine Veterinary Journal* 2010; 42: 382-6.

- Stangl G. Mineralstoffe, Vitamine und sonstige Wirkstoffe: Mengenelemente. In: Kirchgeßner Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis, 14 edn. Stangl G, Schwarz F, Roth F, Südekam K-H, Eder K, eds. Frankfurt: DLG-Verlag 2014a: 177-92.
- Stangl G. Die Verdauung: Die Verdaulichkeit und ihre Beeinflussung. In: Kirchgeßner Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis, 14 edn. Stangl G, Schwarz F, Roth F, Südekam K-H, Eder K, eds. Frankfurt: DLG-Verlag 2014b: 35-45.
- Stanik K (2006) Tierartlich vergleichende Literatur und experimentelle Arbeiten zu Effekten unterschiedlicher Calcium-Aufnahmen auf die Calcium-Homöostase beim arbeitenden Pferd. Dissertation. Tierärztliche Hochschule Hannover
- Steffen C, Dobenecker B. The Phosphate Additives Phosphoric Acid and Sodium Phosphate Lead to Hyperphosphatemia as well as Increased FGF23 and Renal Phosphate Excretion in Healthy Cats. Journal of Urology and Renal Diseases 2023; 8: 1338.
- Stewart AJ. Magnesium homeostasis and derangements. Equine Fluid Therapy 2015: 76-87.
- Stürmer K (2005) Untersuchungen zum Einfluss der Fütterung auf den Säure-Basen-Haushalt bei Ponys. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München
- Swartzman JA, Hintz HF, Schryver HF. Inhibition of calcium absorption in ponies fed diets containing oxalic acid. American Journal of Veterinary Research 1978; 39: 1621-3.
- Takeda E, Yamamoto H, Taketani Y. Effects of Natural and Added Phosphorus Compounds in Foods in Health and Disease. Clinical Aspects of Natural and Added Phosphorus in Foods 2017: 111-21.

- Tasker JB. Fluid and electrolyte studies in the horse. 3. Intake and output of water, sodium, and potassium in normal horses. *Cornell Veterinarian* 1967; 57: 649-57.
- Theelen MJP, Luiken REC, Wagenaar JA, Sloet van Oldruitenborgh-Oosterbaan MM, Rossen JWA, Zomer AL. The Equine Faecal Microbiota of Healthy Horses and Ponies in The Netherlands: Impact of Host and Environmental Factors. *Animals* 2021; 11: 1762.
- Toribio RE. Essentials of Equine Renal and Urinary Tract Physiology. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 2007; 23: 533-61.
- Toribio RE. Magnesium and disease. *Equine internal medicine*. 3rd edition. St Louis (MO): Saunders 2010: 1291-5.
- Uribarri J, Calvo MS. Hidden Sources of Phosphorus in the Typical American Diet: Does it Matter in Nephrology? *Seminars in Dialysis* 2003; 16: 186-8.
- Van Doorn DA, Everts H, Wouterse H, Beynen AC. The apparent digestibility of phytate phosphorus and the influence of supplemental phytase in horses. *Journal of Animal Science* 2004a; 82: 1756-63.
- Van Doorn DA, Van der Spek ME, Everts H, Wouterse H, Beynen AC. The influence of calcium intake on phosphorus digestibility in mature ponies. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2004b; 88: 412-8.
- Van Doorn DA, Everts H, Wouterse H, Homan S, Beynen AC. Influence of high phosphorus intake on salivary and plasma concentrations, and urinary phosphorus excretion in mature ponies. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 2011; 95: 154-60.
- Van Doorn DA, Schaafstra FJWC, Wouterse H, Everts H, Estepa JC, Aguilera-Tejero E, Beynen AC. Repeated measurements of P retention in ponies fed rations with various Ca: P ratios. *Journal of Animal Science* 2014; 92: 4981-90.

- Van Milgen J, Noblet J. Energy Partitioning in Growing Pigs: The Use of a Multivariate Model as an Alternative for the Factorial Analysis. *Journal of Animal Science* 1999; 77: 2154-62.
- Van Ost S (2015) Eine Feldstudie zu Energiebedarf und Rationsgestaltung bei Hochleistungsspringpferden. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München
- Vermorel M, Vernet J, Martin-Rosset W. Digestive and energy utilisation of two diets by ponies and horses. *Livestock Production Science* 1997; 51: 13-9.
- Vervuert I, Kienzle E. Assessment of nutritional status from analysis of blood and other tissue samples. In: *Equine Applied and Clinical Nutrition: health, welfare and performance*. Geor RJ, Harris PA, Coenen M, eds. Edinburgh: Saunders Elsevier 2013: 425-42.
- Waller AP, Lindinger MI. Tracing Acid-Base Variables in Exercising Horses: Effects of Pre-Loading Oral Electrolytes. *Animals* 2022; 13: 73.
- Westendorf ML, Williams CA. Effects of Excess Dietary Phosphorus on Fecal Phosphorus Excretion and Water Extractable Phosphorus in Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* 2015; 35: 495-8.
- Wilkinson SR, Welch RM, Mayland HF, Grunes DL. Magnesium in Plants: Uptake, Distribution, Function, and Utilization by Man and Animals. In: *Metal Ions in Biological Systems: Compendium on Magnesium and Its Role in Biology, Nutrition, and Physiology*. Sigel H, Sigel A, eds. New York: Marcel Dekker 1990: 33-52.
- Wolffram S. Funktionen des Dünndarms und seiner Anhangdrüsen. In: *Physiologie der Haustiere*, 6 edn. Breves G, Diener M, Gäbel G, eds. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 2022: 433-56.

- Zeyner A (2002) Ernährungsphysiologische Wirkungen eines Austauschs von stärkereichen Komponenten durch Sojaöl in der Reitpferdeernährung. Habilitationsschrift. Georg-August-Universität Göttingen
- Zeyner A, Romanowski K, Vernunft A, Harris P, Kienzle E. Scoring of sweat losses in exercised horses – a pilot study. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 2014; 98: 246-50.
- Zeyner A, Romanowski K, Vernunft A, Harris P, Müller A-M, Wolf C, Kienzle E. Effects of Different Oral Doses of Sodium Chloride on the Basal Acid-Base and Mineral Status of Exercising Horses Fed Low Amounts of Hay. PLoS One 2017; 12: e0168325.

8. TABELLENANHANG

Die für die Meta-Analyse verwendeten Daten in Form einer detaillierten Tabelle sowie deren Quellenangaben sind der beigefügten CD entnehmbar.

9. DANKSAGUNG

Mein größter Dank gilt Frau Prof. Dr. Ellen Kienzle für die Überlassung des Themas und die angenehme Betreuung bei der Entstehung dieser Arbeit. Danke für Ihr einzigartiges Engagement und Ihren Glauben an mich. Ich wünsche Ihnen nur das Beste in Ihrem wohlverdienten Ruhestand.

Bei Dr. Natalie Dillitzer möchte ich mich vielmals für das gegenseitige Vertrauen und ihr Verständnis bedanken. Ich schätze es sehr, dass Du die Vollendung dieser Arbeit durch die flexible Arbeitszeitgestaltung ermöglicht hast.

PD Dr. Linda Böswald danke ich herzlich für die stets liebe und sofortige Beantwortung all meiner Fragen sowie die Hilfe mit den verwendeten Programmen. Danke, dass Du mir immer ein positives Gefühl vermittelt hast.

Ein weiterer Dank gilt Dr. Carmen Klein, die maßgeblich die Liebe zur Tierernährung in mir geweckt hat. Ohne Dich wären meine Praktika am Lehrstuhl nicht dieselben gewesen.

Außerdem möchte ich allen Mitarbeitenden und Mitdotorandinnen am Lehrstuhl für die gemeinsame Zeit danken - insbesondere Dr. Christina Pankratz, welche mir mit Rat und Tat zur Seite stand - sowie meinen derzeitigen Kolleginnen und Kollegen, durch welche mir die Arbeit erst richtig Spaß macht.

Ein riesiges Dankeschön geht von Herzen an meine Eltern, die mir das Studium ermöglicht und immer an mich geglaubt haben. Ohne Eure unerschütterliche Liebe und Unterstützung wäre das alles nicht möglich gewesen!

Besonders danken möchte ich meiner Freundin Malin und meinem Bruder Dennis fürs unermüdliche Korrekturlesen und Eure aufbauenden Worte sowie all meinen Freunden, die mich begleitet und motiviert haben und immer für mich da gewesen sind.

Von ganzem Herzen danke ich meinem Verlobten Christopher für seine liebevolle Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt. Danke, dass Du immer an meiner Seite bist!

Nicht zuletzt darf ein kleiner Dank an unsere treue vierbeinige Begleiterin Nele nicht fehlen, die mich an die wichtigen Pausen erinnert und mir durch unsere Spaziergänge im Grünen neue Kraft geschenkt hat, um mit frischer Energie weiterzuarbeiten.