

Kapitel 3

Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wird die Trächtigkeit des Elefanten unter drei verschiedenen Aspekten betrachtet: die sonographische Beschreibung der embryonalen Entwicklung, die Erstellung von Wachstumskurven anhand von Ultraschallmessungen und der Vergleich der neu entwickelten Formeln zur fötalen Altersbestimmung mit bereits bestehenden Formeln. Zusätzlich werden die verwendeten Ultraschalltechniken, die konventionelle 2D - Technik und die neue 3D - Technik, im Bezug auf ihren sinnvollen Einsatz zur Trächtigkeitsüberwachung beim Elefanten miteinander verglichen.

3.1 Vergleich der angewendeten Ultraschalltechniken

Die transrektale sonographische Untersuchung der Elefanten erfolgte vorzugsweise in Seitenlage. In stehender Position war die Trächtigkeit nicht optimal darstellbar, da besonders die kranialen Anteile des Uterus zu tief in die Bauchhöhle ragten. Zum Einsatz kamen hier sowohl 2D - als auch 3D - Ultraschalltechniken.

Die herkömmliche 2D - Echtzeitdarstellung eignete sich hervorragend zur Dokumentation fötaler Bewegungen. Auch die Pulsation von Herz und großen Gefäßen konnte visualisiert werden. Die verwendeten Geräte waren zudem portabel und einfach in der Handhabung. Nachteilig jedoch war der Aufwand zur Messung biometrischer Parameter. Um

eine möglichst optimale Einstellung der gewünschten Strukturen zu erzielen, wurden alle Messungen retrospektiv vorgenommen, wozu die Erstellung von Standbildern und deren anschließende Kalibrierung abhängig von der verwendeten Frequenz notwendig war.

Die 3D - Ultraschalltechnik hingegen ermöglichte die freie Wahl der Schnittebene innerhalb des gescannten Volumens. Im Multiplanar Modus werden drei senkrecht zueinander stehende Ebenen gleichzeitig dargestellt. Die freie Rotation der Ebenen anhand einer definierten Referenzebene gestattete so die optimale Einstellung ausgewählter biometrischer Parameter und deren exakte Messung ohne vorangehende Kalibrierung. Auch Strukturen, die im 2D - Echtzeitverfahren nicht akkurat erfasst wurden, konnten retrospektiv aus den Volumenscans extrahiert werden. Die topographische Darstellung des gescannten Volumens im Multiplanar Modus ermöglichte es dem Untersucher, sich eine genaue Vorstellung über die anatomische Lage und Ausdehnung von Organen zu machen. Dies erwies sich als besonders hilfreich für die Beschreibung der Entwicklung der extraembryonalen Organe und der Plazenta.

Die dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächenstrukturen im Render Modus gewährleistete einen plastischen Eindruck embryonaler bzw. fötaler Strukturen. Diese Art der Darstellung war auch für den Laien leichter zugänglich als herkömmliche zweidimensionale Ultraschallbilder. Die dreidimensionalen Rekonstruktionen konnten weiterhin so bearbeitet werden, dass störende Strukturen, die die freie Sicht auf den Fötus beeinträchtigten, entfernt werden konnten. Der Originalvolumendatensatz wurde dabei nicht verändert.

Ein weiterer Vorteil war die gute Verfügbarkeit der digital gespeicherten Volumenscans. Im Gegensatz zur Bildanalyse der 2D - Aufnahmen war ein externes Videogerät hier nicht notwendig. Die Volumenscans konnten entweder am Ultraschallgerät direkt oder am Computer ausgewertet werden. Jede gewünschte Einstellung konnte als separates Standbild gesichert werden.

Faktoren, die die Qualität des Volumenscans negativ beeinflussten waren vor allem Bewegungsartefakte, die zum einen durch die Darmperistaltik oder Atembewegungen der

trächtigen Elefantenkuh, zum anderen aber auch durch die Eigenbewegung des Fötus selbst verursacht wurden. Manches Mal war es aufgrund der ungünstigen Untersuchungsstellung schwierig, die Sonde ruhig zu halten, was ebenfalls zu Bewegungsunschärfe führte. Eine Beschleunigung der Volumengewinnung wirkte zwar den Bewegungsartefakten entgegen, ging aber andererseits mit einer Verringerung der Anzahl der Bildebenen einher und minderte somit die Qualität des Volumenscans.

Die falsche Positionierung des Schallkopfes war ein weiterer Faktor, der zu unbefriedigenden Ergebnissen führt. In diesem Falle wurden wichtige Strukturen nur teilweise oder überhaupt nicht erfasst. Das gescannte Volumen wurde sofort nach der Gewinnung beurteilt. Unzureichende Volumenscans wurden nicht gespeichert sondern nochmals wiederholt.

Da im Render Modus alle Informationen des dreidimensionalen Volumens auf eine zweidimensionale Ebene projiziert werden, erwies sich die Interpretation von Weichteilgeweben mit ähnlichem Kontrast als schwierig. Oberflächen hingegen, die beispielsweise von Flüssigkeit unterschiedlicher Echogenität umgeben waren, konnten sehr gut dargestellt werden.

Im Vergleich zu den portablen 2D - Ultraschallgeräten waren die 3D - Ultraschallgeräte wesentlich umständlicher in der Handhabung. Um einen guten Blick auf den geräteinternen Monitor zu gewährleisten musste das große Ultraschallgerät sehr nahe an der Elefantenkuh positioniert werden. Für diesen Vorgang musste die Elefantenkuh besonders gut trainiert sein, um ein plötzliches Aufstehen und Umstossen des Gerätes zu verhindern. Auch die Bedienung des Gerätes und die anschließende Analyse der Volumenscans erforderten einige Erfahrung seitens des Untersuchers.

3.2 Sonographische Charakterisierung der frühen pränatalen Entwicklung des Elefanten

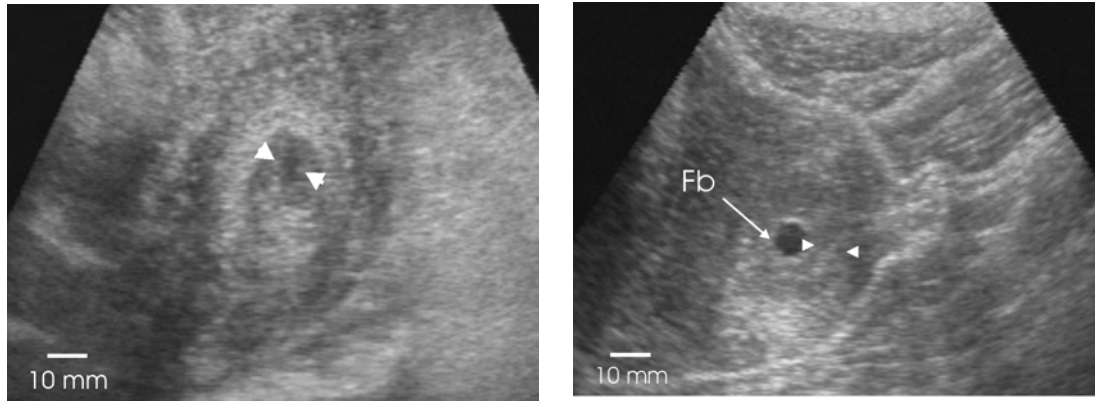
3.2.1 Pränatale Entwicklung von Tag 46 bis 80 p.o

Die ersten Anzeichen einer erfolgreichen Befruchtung zeigten sich als freie Flüssigkeitsansammlungen im Uteruslumen zwischen Tag 46 - 50 post ovulationem (Abb. 3.1(a)). Der Uterus war ödematisiert und von großen Blutgefäßen durchzogen.

Eine sichere Trächtigkeitsdiagnose war aber erst durch die Darstellung der embryonalen Fruchtblase an Tag 50 p.o möglich. Zu diesem Zeitpunkt konnte erstmals eine kugelige, flüssigkeitsgefüllte Fruchtblase im Uterushorn sonographisch nachgewiesen werden (Abb. 3.1(b)). Durch Schwenken des Schallkopfes konnte diese gegenüber anderen flüssigkeitsgefüllten Strukturen, wie beispielsweise Blutgefäßen und freien Flüssigkeitsansammlungen im Gewebe, deutlich abgegrenzt werden. Blutgefäße ergeben nur im Querschnitt eine runde Form und können auch aufgrund ihrer Pulsation von der Fruchtblase unterschieden werden. Die Fruchtblase befand sich im Lumen des Uterushorns, kranial des pseudouterinen Körpers. Sie war gut gegenüber dem Uterusgewebe abgrenzbar und durch zwei hyperechogene Linien gekennzeichnet. Diese zwei hellen Linien waren durch sogenanntes „enhancement“ bedingt: die geringe Dämpfung der Ultraschallwellen in Flüssigkeit lässt die Echos darunterliegender Strukturen, in diesem Fall die der Fruchtblasenmembran, verstärkt erscheinen.

In einem Fall wurden zusätzlich zu den Realtime - B - Mode - Aufnahmen auch Volumenscans dieser Struktur angefertigt. Bei der retrospektiven Bildanalyse im Multiplanar - Modus konnte durch die freie Wahl der Schnittebene ein virtueller Schwenk durch die Fruchtblase vorgenommen werden. Embryonale Strukturen waren nicht sichtbar.

Das die Fruchtblase umgebende Endometrium erschien im Vergleich zum restlichen Uterushorn verdickt und durch interstitielle Flüssigkeitsansammlung echoarm. Zwischen Tag 46 und Tag 70 p.o betrug die durchschnittliche Dicke des Endometriums 18 mm (n=10).



(a) Freie Flüssigkeit im Uteruslumen (Tag 46 p.o.)

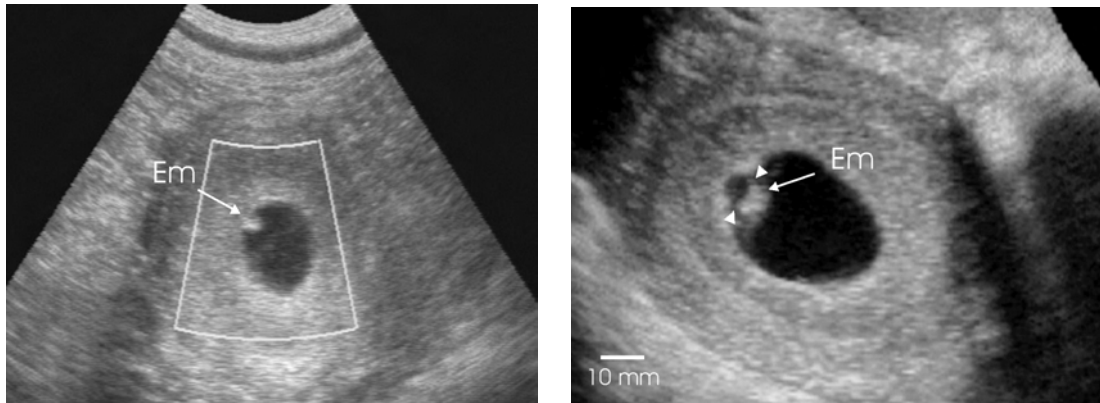
(b) Fruchtblase (Fb) mit umgebendem Endometrium (Pfeile) (Tag 50 p.o.).

Abbildung 3.1: Fruchtblase

Zwischen Tag 70 und Tag 80 p.o nahm die durchschnittliche Dicke auf 25 mm zu. Die Größe der rundlichen Fruchtblase nahm rapide zu: während der Durchmesser an Tag 50 p.o noch 9 mm betrug wurden an Tag 54 p.o 15 mm, und an Tag 58 p.o 26 mm gemessen. Die Form der Fruchtblase änderte sich dann von rund nach oval. Im Zeitraum von Tag 58 bis 70 p.o betrug ihre durchschnittliche Breite 28 mm und ihre durchschnittliche Höhe 35 mm ($n = 13$). Zwischen Tag 70 und 80 nahmen durchschnittliche Breite und Höhe auf 38 mm bzw. 47 mm zu ($n = 10$).

Eine helle, punktförmige embryonale Struktur von 5 mm wurde an Tag 62 p.o beobachtet (Abb. 3.2(a)).

Vom Embryo ausgehend zog sich eine ringförmige, echogene Membran entlang der inneren Fruchtblasenwand. An Tag 74 p.o schien sich der Pol der Fruchtblase, an welchem sich der Embryo befand, knopfartig in das umgebende Endometrium vorzuwölben. Das Endometrium stellte sich an dieser Stelle besonders echoreich dar (Abb. 3.2(b)). Der nun längliche Embryo befand sich weiterhin nahe der Uteruswand und war über seinen Haftstiel, der sich als helle Linie darstellte, mit dem Chorion verbunden.



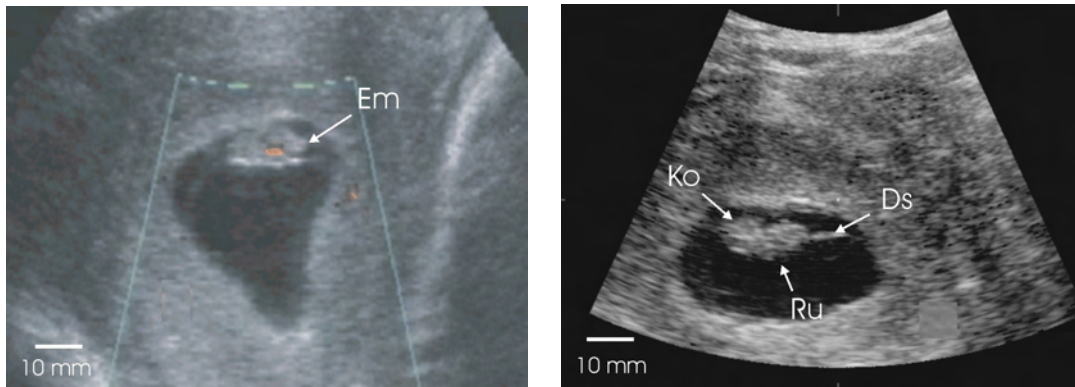
(a) Der Embryo (Em) ist am Tag 68 p.o als heller Punkt in der Fruchtblase sichtbar.

(b) Der Embryo (Em) hat eine längliche Form angenommen. Die Fruchtblase stülpt sich knopfartig in das echoreiche Endometrium vor (Pfeile) (Tag 74 p.o)

Abbildung 3.2: Früher Embryo

Die schon zuvor beobachtete ringförmige Membran war nun deutlicher erkennbar. Die Membran wies keine Falten auf und war mit klarer Flüssigkeit gefüllt. Basierend auf den Beobachtungen von Amoroso & Perry (1964), die bei einem 10 cm großen Embryo einen Dottersack identifiziert hatten und in Analogie zu anderen Spezies mit ähnlicher Plazentation, wie beispielsweise dem Hund, wird diese Membran als Dottersack bezeichnet. Der Dottersack füllte die embryonale Fruchtblase fast vollständig aus und nahm mit fortschreitender Trächtigkeit noch an Größe zu. Zwischen Tag 69 und 80 p.o betrug seine durchschnittliche Breite und Länge 24 mm bzw. 37 mm ($n = 9$).

Die Entwicklung der Gürtelplazenta wurde durch eine Aktivierung des Endometriums (Tag 74 - 78 p.o) initiiert: in unmittelbarer Nähe zum Embryo erschien die innere Schicht des Endometriums stärker echogen. Auf der gegenüberliegenden Seite der Fruchtblase war ebenfalls eine Aufhellung festzustellen.



(a) Darstellung des embryonalen Herz (rot) mittels Colour Doppler Flow (Tag 83 p.o). Die Dottersackmembran (Ds) zieht ventral des Embryos in gebogener Linie nach unten

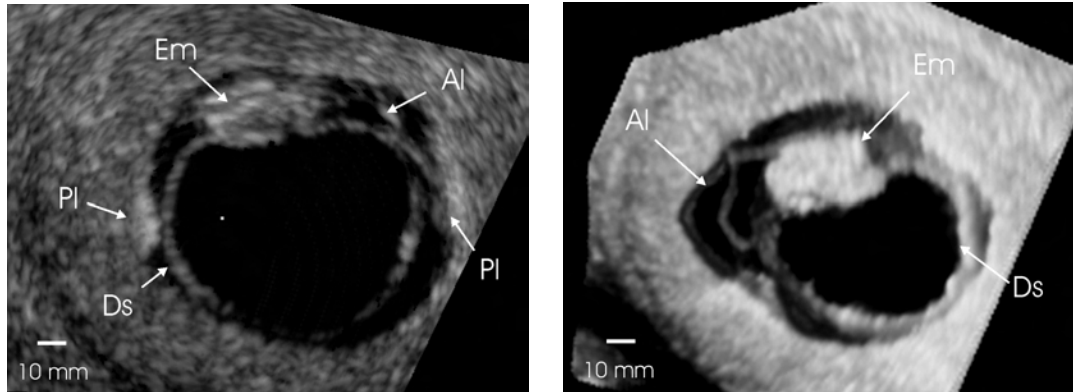
(b) Kopf (Ko) und Rumpf (Ru) des Embryos lassen sich bereits deutlich differenzieren (Tag 83 p.o). Die Dottersackmembran (Ds) ist als helle Linie am kaudalen Pol des Embryos erkennbar

Abbildung 3.3: Embryonales Herz und Differenzierung der Körperform

3.2.2 Pränatale Entwicklung von Tag 80 bis 100 p.o

Von Tag 80 p.o an wurde der embryonale Herzschlag als schnelles Flackern im Real-Time-Mode wahrgenommen. Mittels Colour Doppler Flow konnte der Blutfluss auch im Sonogramm dargestellt werden. Das Herz zeichnete sich hierbei als eine rote, rundliche Struktur in Nähe des Dottersacks ab (Abb. 3.3(a)). Anhand der Lage des Herzens und des Dottersacks in Bezug auf den Embryo wurden die Begriffe dorsal und ventral definiert: die Endometrium nahe Seite des Embryos wurde als dorsal, die dem Dottersack zugewandte Seite als ventral bezeichnet. Eine Differenzierung des Embryos in Kopf und Rumpf war erstmals an Tag 83 möglich, wobei sich der rundliche Kopf in der dorsalen Aufsicht durch eine Einziehung vom restlichen Körper absetzte (Abb. 3.3(b)). Das Verhältnis von Kopf und Rumpf betrug 1:1.

Weiterhin konnte eine zweite, dünnere und weniger echogene Membran beobachtet werden, welche sowohl den Embryo als auch den Dottersack umhüllte (Abb. 3.4). Diese Membran war ebenfalls flüssigkeitsgefüllt und wird im folgenden als Allantois angesprochen. Die Qua-



(a) 2D-Darstellung des Embryos (Em) mit Dottersackmembran (DS), Allantois (Al) und beginnender Plazenta (Pl) (Tag 85)

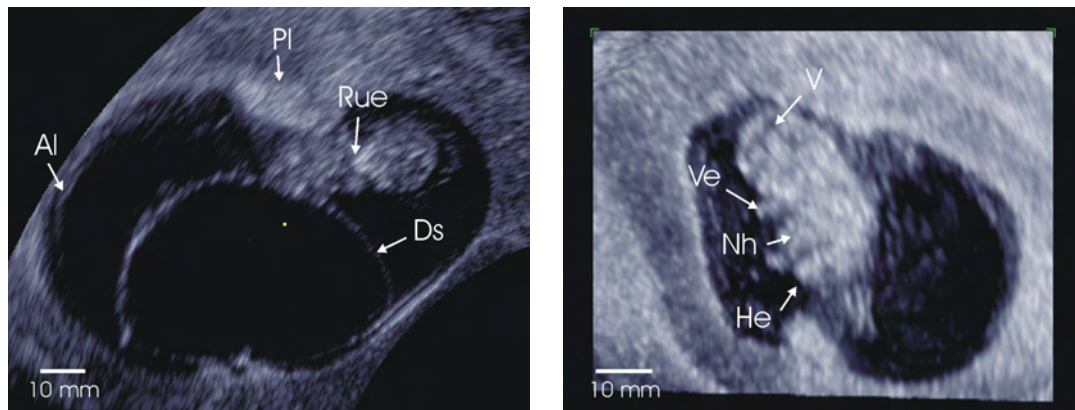
(b) 3D-Rekonstruktion desselben Embryos (Em) mit Dottersackmembran (DS) und Allantois (Al) (Tag 85)

Abbildung 3.4: 2D- und 3D-Darstellung von Dottersack und Allantois

lität der Flüssigkeit war klar und stellte sich sonographisch einheitlich schwarz dar. Schon kurze Zeit nach ihrem ersten Auftreten schien sich die Allantois in mehrere Kompartimente aufzugliedern. Mindestens zwei Hauptkompartimente, die zwischen sich den Dottersack einschlossen, konnten identifiziert werden.

Die zuvor beobachteten echoreichen Endometriumschichten entwickelten sich zu zwei runden Plazentainseln, die in die Länge wuchsen und in Form von Plazentabändern von beiden Seiten aufeinander zu strebten. Die Plazenta wölbte sich in die Fruchthöhle vor und wies im Querschnitt eine charakteristische ovale Form auf (Abb. 3.4 und Abb. 3.5(a)). Ihre durchschnittliche Höhe betrug zwischen Tag 83 und 100 p.o ca. 10 mm und ihre durchschnittliche Breite ca. 12 mm ($n = 11$). Die Struktur des Plazentagewebes war feingranuliert und besass eine mittlere Echogenität.

Die Form des Dottersackes änderte sich von prallrund nach oval. Im Querschnitt war der Dottersack in Form eines länglichen Säckchens, begrenzt durch zwei nahezu parallele, weisse Linien, die von einem Ende der Fruchtblase zum anderen reichten, zu erkennen (Abb. 3.6(a)). Zwischen Tag 80 und Tag 100 p.o schien der Dottersack mit einer durch-



(a) 3D-Rekonstruktion des Embryo mit Dotter-sack (DS) und Allantois (Al) (Tag 95 p.o.). Am Kopf ist bereits der dreieckige Rüssel (Rue) zu erkennen. Die Plazenta (Pl) ist quer getroffen.

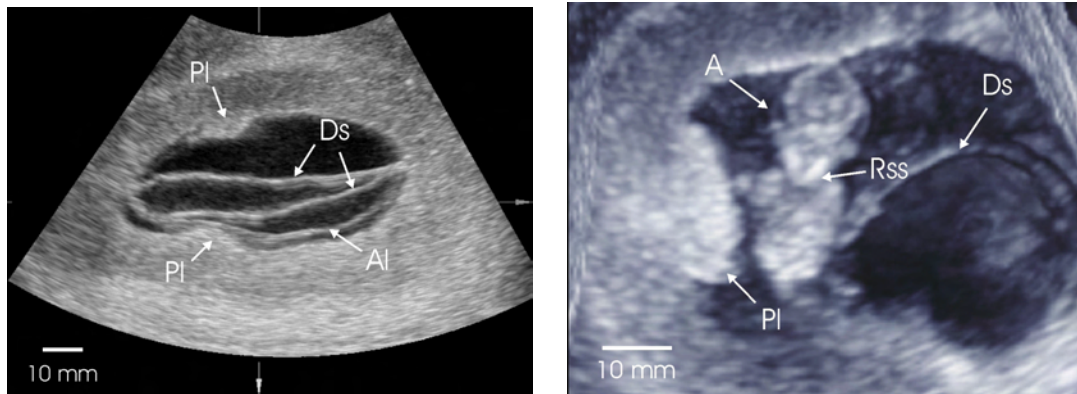
(b) 3D-Rekonstruktion eines Embryos in lateraler Ansicht (Tag 95 p.o.) mit Vorder- (Ve) und Hintere Extremitäten (He), Gehirnventrikeln (V) und Nabelauftrieb (Nh)

Abbildung 3.5: Extraembryonale Organe und 3D-Darstellung des Embryo

schnittlichen Länge von 38 mm und einer durchschnittlichen Breite von 25 mm ($n = 19$) seine größte Ausdehnung erreicht zu haben.

Ab Tag 88 p.o war der Kopf durch das Erscheinen eines dunklen, einheitlichen anechogenen Ventrikels gekennzeichnet. Nach rostral setzte sich der Kopf in die dreieckige Nase fort, die lateral durch zwei helle, echogene Linien begrenzt war (Abb. 3.5(a) und Abb. 3.6(b)). Im Vergleich zur Länge der Fruchtblase (ca. 50 mm) betrug die Körperlänge des Embryos annähernd ein Drittel (ca. 16 mm). Die Längsachse des Embryos war stark dorsokonvex gekrümmt (Abb. 3.5(b)).

Mit der Differenzierung des Embryos in Kopf und Rumpf begann auch die Entwicklung der Extremitäten, die zunächst als rundliche Knospen seitlich des Rumpfes hervortraten. Die Vorderextremitäten konnten bereits mit 88 Tagen identifiziert werden, die Hinterextremitäten mit 95 Tagen (Abb. 3.5(b)). Der Embryo zeigte bereits ruckartige Streckbewegungen des gesamten Körpers, wobei auch die Vorderextremitäten vor und zurück geführt wurden. Nahe seiner Austrittsstelle am Bauch des Embryos zeigte der Nabel eine Auftrei-



(a) Fruchtblase mit Dottersackmembranen (Ds) und Allantoismembran (Al). Die Plazenta (Pl) ist quer angeschnitten (Tag 96 p.o.)

(b) 3-D-Rekonstruktion eines Embryos (Tag 98 p.o.). Die Augen (A) und der Rüssel (Rss) sind schon deutlich auszumachen. Der Dottersack (Ds) nimmt noch einen großen Teil der Fruchtblase ein. Die Plazenta (Pl) stellt sich echoreich dar.

Abbildung 3.6: 3D-Darstellung des Embryos

bung von ca. 10 mm Durchmesser (Abb. 3.5(b)). Dieses Phänomen ist in der Humanmedizin gut beschrieben und wird dort als „physiologische Nabelhernie“ bezeichnet. Durch das für dieses Entwicklungsstadium charakteristische starke Wachstum der Leber werden Dünndarmschlingen aus dem Bauchraum verdrängt und rutschen in den Nabelstrang, der dadurch eine typische Erweiterung erfährt. Eine Erweiterung des Nabelstranges beim Elefanten wurde zwischen Tag 95 und 118 beobachtet (Abb. 3.5(b), Abb. 3.7 und Abb. 3.9). Nach der Erweiterung wurde der Nabel wieder schlanker und die darin verlaufenden von der Allantois stammenden Gefäße setzten ihren Weg zur Plazenta fort. Der Gefäßstrang besass einen Durchmesser von ca. 4 mm.

In der Lateralansicht des Schädels wurden ab Tag 95 p.o die zusammenhängenden Ventrikelsysteme als gewundenes schwarzes Band sichtbar (Abb. 3.5(b)). Es konnte zwischen dem kranialen Prosencephalon, dem kaudalen Metencephalon und dem dazwischenliegenden Mesencephalon differenziert werden. Die Augen traten als schwarze, flüssigkeitsgefüllte Bläschen am Gesichtsschädel hervor. Der Rumpf setzte ohne merklichen Übergang am Kopf

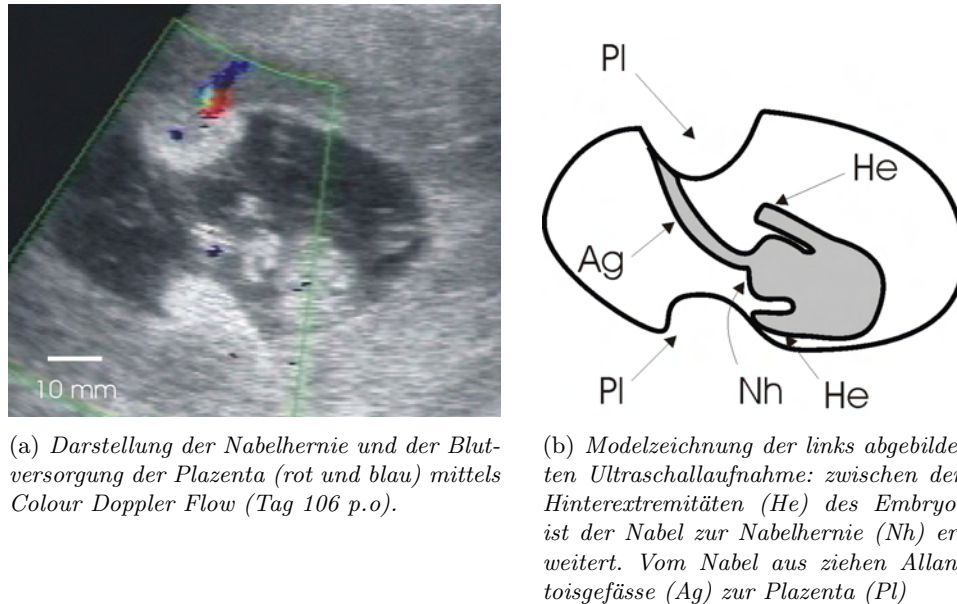


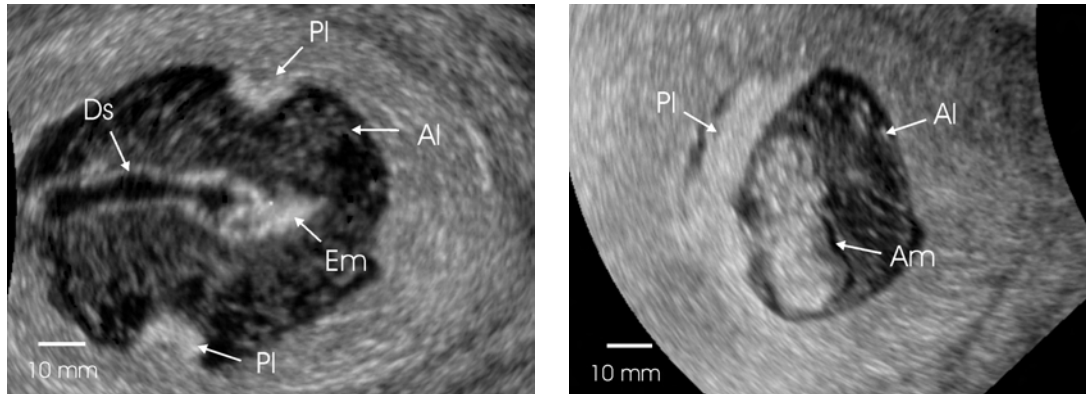
Abbildung 3.7: Sonogramm und schematische Zeichnung der physiologischen Nabelhernie

an und setzte sich nach kaudal in einen breiten Schwanz fort.

3.2.3 Pränatale Entwicklung von Tag 100 bis 120 p.o

Die Qualität der Allantoisflüssigkeit änderte sich im Gegensatz zum Dottersack: während sich die Allantoisflüssigkeit anfangs sehr echoarm und damit schwarz darstellte, war ab Tag 100 p.o eine Trübung in Form einer erhöhten Echogenität zu beobachten (Abb. 3.8(a)). Die Amnionmembran war schwierig darzustellen. Ein flüssigkeitsgefüllter Spalt um den Embryo wurde jedoch als Amnionhöhle gedeutet (Abb. 3.8(b)).

Der Dottersack bildete sich langsam zurück: im Zeitraum von Tag 100 bis Tag 120 p.o nahm die Breite auf 20 mm und die Länge auf 30 mm ab (n =17). Die ursprünglich weite Öffnung der Bauchhöhle in den Dottersack verengt sich zusehends und wurde stiel förmig (Abb 3.10(a)). In Bezug auf seine Lage zum Embryo zeigte sich der Dottersack variabel. Mal befand er sich ventral, dann wieder lateral und auch dorsal des Embryos. Mit der



(a) Die Allantois (Al) ist im Gegensatz zum Dottersack (Ds) mit trüber Flüssigkeit gefüllt. Der Embryo (Em) ist schräg angeschitten (Tag 103 p.o)

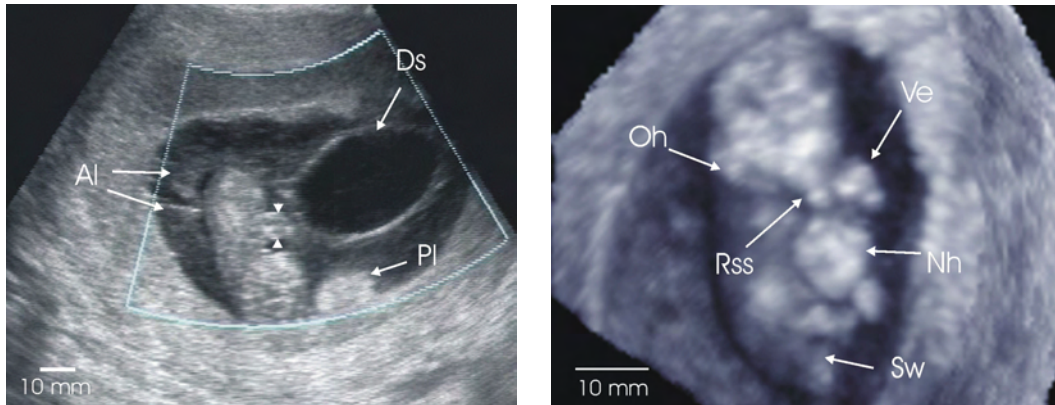
(b) Die Plazenta (Pl) wächst bandförmig um die Fruchtblase. Die Amnionhöhle (Am) grenzt sich gegenüber der Allantois (Al) durch einen schmalen, mit klarer Flüssigkeit gefüllten Spalt ab (Tag 103 p.o).

Abbildung 3.8: Dottersack und Amnionhöhle

Schrumpfung des Dottersackes füllte nun die Allantois die Fruchtblase aus und stellte nach allen Seiten hin Kontakt zur Fruchtblasenwand her.

Der Embryo orientierte sich meist parallel zur bandförmigen Plazenta und zeigte verstärkt ruckartige Streckbewegungen des gesamten Körpers. Die Körperlängsachse war deutlich weniger gekrümmt. Eine beginnende Verknöcherung des Schädels konnte ab Tag 103 p.o in Form einer erhöhten Echogenität des Scheitelbeins, Os parietale, festgestellt werden. Seitlich am Kopf wurden die Ohren als rundliche Fortsätze sichtbar. Eine Verlängerung der Nase führte zur Ausbildung des typischen Rüssels. Der Rüssel war kurz und gestreckt und wurde bedingt durch die gebeugte Kopfhaltung zwischen den Vorderbeinen gehalten (Abb. 3.9(b)). Alle vier Extremitäten standen seitlich vom Körper ab und konnten nun eindeutig als Vorder- bzw. Hintergliedmassen angesprochen werden.

Neben der fortschreitenden Verknöcherung des Schädels konnten ab Tag 108 p.o auch weitere anatomische Details des Gehirns dargestellt werden. Im transaxialen Schnittbild zeigte sich ein bandförmiges Mittellecho, was innerhalb des Gehirnschädels von kaudal nach krani-



(a) Embryo mit physiologischer Nabelhernie (Pfeile) (Tag 106 p.o.). Der Dottersack (Ds) befindet sich ventral, die beiden Allantoissacke (Al) treffen sich über dem Rücken. Die Plazenta (Pl) ragt in die Fruchthöhle.

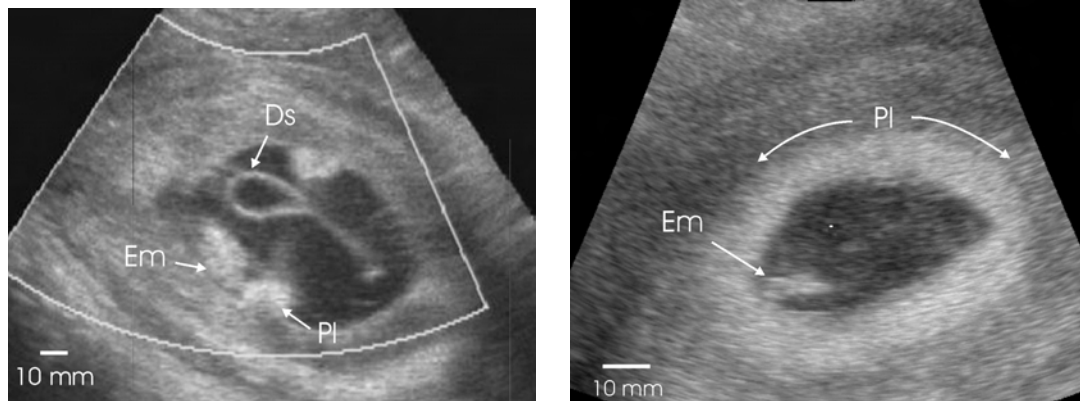
(b) 3-D-Rekonstruktion des gleichen Embryos. Neben der physiologischen Nabelhernie (Nh) sind Ohr (Oh), Rüssel (Rss) und Vorderextremität (Ve) gut erkennbar (Tag 102 p.o.).

Abbildung 3.9: 2D- und 3D-Darstellung von Embryo und physiologischer Nabelhernie

al verlief. Dieses Mittelecho wurde als Falx cerebri identifiziert, die aus der Verschmelzung der inneren Durablätter entsteht. Der Sinus cavernosus konnte nicht dargestellt werden. Innerhalb der flüssigkeitsgefüllten Venrikel wölbte sich der Plexus choroideus als echogene, feingranulierte Struktur hervor und füllte diese zum großen Teil aus (Abb. 3.11(a)). Eine dünne, echoarme dunkle Linie, die sich in der dorsalen Ansicht von kaudal nach kranial zog und in den Gehirnentrikel übergang, charakterisierte den liquorgefüllten Wirbelkanal (Abb. 3.11(b)). Der Kopf war vom Thorax über einen kurzen Hals abgesetzt.

Der Thoraxdurchmesser war etwas kleiner als der Schäeldurchmesser. Seitlich wurde der Thorax durch den stärker reflektierenden Rippenbogen begrenzt. In seinem kranialen Teil war das pulsierende Herz als dunkler Schatten zu sehen. Sowohl das Herz als auch die Nabelgefäße konnten mittels Colour Doppler Flow dargestellt werden (Abb. 3.12).

Mit 119 Tagen begann die Verknöcherung der langen Röhrenknochen. Die Diaphysen von Femur und Humerus erzeugten helle, gut definierte Echos. Auch Knochen des Vorder bzw. Hinterbeins wurden sichtbar, liessen sich jedoch noch nicht in Radius und Ulna bzw. Ti-



(a) Der gestielte Dottersack (Ds) ist in seiner Lage in Bezug auf den Embryo (Em) variabel. Die Plazenta (Pl) ist quer angeschnitten (Tag 108 p.o).

(b) Die Plazenta (Pl) bildet einen geschlossenen Ring um die Fruchtblase. Ein kleiner Teil des Embryos (Em) ist angeschnitten (Tag 110 p.o).

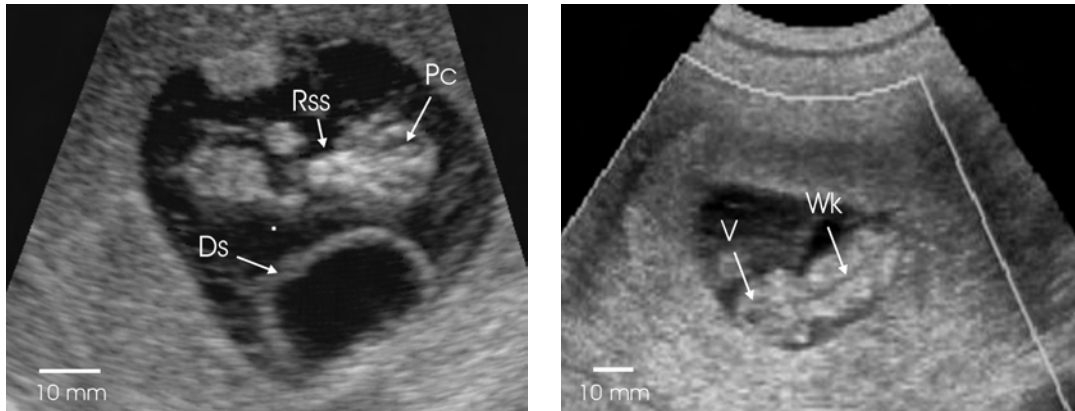
Abbildung 3.10: Gestielter Dottersack und geschlossene Gürtelplazenta

bia und Fibula differenzieren. Die Vordergliedmassen waren im Ellenbogengelenk und die Hintergliedmassen im Kniegelenk gebeugt. Durch die weiterreichende Verknöcherung des Skelettsystems wurden kaudal die Beckenknochen sichtbar.

Von den Organen der Bauchhöhle trat als erstes die Magenblase an Tag 113 als kugelige, echoarme Struktur seitlich des kaudalen Anteils des linken Rippenbogens hervor, liess sich jedoch noch nicht sehr deutlich abgrenzen. Die Leber stellte sich gegenüber der Lunge etwas weniger echogen dar, so dass die Grenze des Bauchraums zum Thorax definiert werden konnte.

Die Gesamtlänge des Embryos (ca. 40 mm) betrug ungefähr die Hälfte der Fruchtblasenlänge (ca. 80 mm).

Die fortgeschrittene Plazentaentwicklung zeigte sich darin, dass die ursprünglich getrennten Plazentainseln weiter aufeinander zu gewachsen waren und nun einen Ring bildeten. Mit der 2D - Ultraschalltechnik erwies es sich als schwierig, den gesamten Plazentaring in einer Schnittebene darzustellen. Die 3D - Ultraschalltechnik hingegen ermöglichte innerhalb



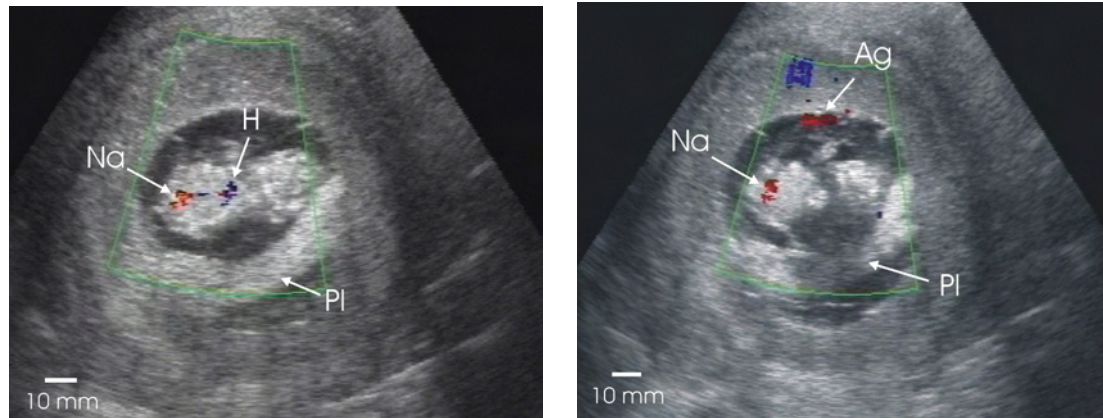
(a) Im sagittalen Anschnitt stellt sich der Plexus choroideus (Pc) als echoreiche Struktur innerhalb des Gehirnventrakels dar. Der Rüssel (Rss) befindet sich zwischen den Vorderextremitäten (Tag 108 p.o).

(b) Der Wirbelkanal (Wk) zieht als echoarme, dunkle Linie von kaudal nach kranial in den Gehirnventrakel (V) (Tag 108 p.o).

Abbildung 3.11: Plexus choroideus und Wirbelkanal

des gescannten Volumens die Einstellung beliebiger Ebenen. Der Ringschluss der Plazenta konnte auf diese Weise eindeutig nachgewiesen werden. Von den drei mit 3D - Ultraschall untersuchten Elefanten zeigten zwei Föten mit 105 bzw. 110 Tagen einen geschlossenen Plazentaring (Abb. 3.10(b)). Beim dritten Föten liess sich ein vollständiger Ringschluss der Plazenta auch in späteren Stadien nicht nachweisen. Die Untersuchung der Nachgeburt dieses Föten zeigte, dass auch die geburtsreife Plazenta noch durch häutiges Allantochorion unterbrochen war. Im Gegensatz zur Plazentalänge hatten Höhe und Breite der Plazenta im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Entwicklungsstadien kaum zugenommen. Der größte Teil der Allantois blieb weiterhin plazentafrei. Zwischen Tag 100 und 120 p.o betrug die durchschnittliche Höhe ca. 11 mm und die durchschnittliche Breite ca. 15 mm ($n = 20$). Gegenüber dem Endometrium war das Plazentagewebe deutlich stärker echogen.

Die Versorgung der Elefantenplazenta mit Blut wurde von den Allantoisgefäßen gewährleistet, die vom Nabel des Embryos in die Peripherie zogen (Abb. 3.12). Die Nabelarterie und Nabelvene zweigten sich kurz nach ihrem Austritt aus der Bauchhöhle in mehrere



(a) Darstellung des embryonalen Herz (H) (blau) und der Nabelgefäße (Na) (rot) mittels Colour Doppler Flow (Tag 110 p.o). Ventral ist das Plazentaband (Pl) zu sehen.

(b) Darstellung der Nabelgefäße (Ag) (rot) bei ihrem Austritt am Nabel (Na) und ihrer Insertion an der Plazenta (Pl) mittels Colour Doppler Flow (Tag 110 p.o).

Abbildung 3.12: Herz und Nabelgefäße

Gefäßpaare auf, die wiederum aus je einer Vene und einer Arterie bestanden. Die eigentliche Nabelschnur war durch diese besondere Gefäßkonstellation daher relativ kurz. Mittels Colour Doppler Flow konnte die Fließrichtung des Blutes bestimmt werden: rot dargestellte Gefäße fließen zum Herzen hin, blau dargestellte Gefäße vom Herzen weg. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im embryonalen und fötalen Kreislauf die Lunge zur Sauerstoffanreicherung des Blutes noch nicht in Funktion ist. Vielmehr übernimmt hier die Plazenta diese Aufgabe. Zum Herzen hinziehende Gefäße führen daher sauerstoffreiches Blut aus der Plazenta, während vom Herzen wegziehende Gefäße sauerstoffarmes Blut transportieren.

3.2.4 Pränatale Entwicklung von Tag 120 bis 130 p.o

Im Verlauf der Trächtigkeit wurde die Lungen - Leber - Grenze noch besser erkennbar. Thorax und Schädel besaßen mit durchschnittlich 24 mm bzw. 26 mm ein Verhältnis von ca. 1:1 und waren über einen kurzen Hals miteinander verbunden. Der Hals war durch ein gut ausgebildetes Nackenband, Ligamentum nuchae, gekennzeichnet. Eigenbewegun-

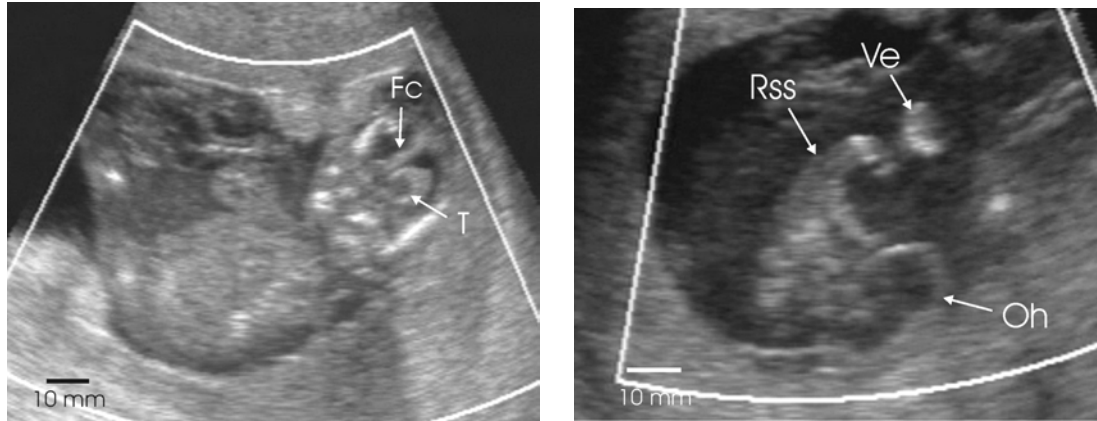
gen des Fötus wurden zunehmend häufiger. Es wurden sowohl ruckartige Bewegungen der Vorderbeine vom Körper weg und wieder zurück als auch Drehungen des Kopfes beobachtet. Mit 125 Tagen p.o führte der Fötus Drehbewegungen um seine Längs- und Querachse aus. Anhand der prominenten Magenblase konnte nun zwischen der linken und rechten Körperseite differenziert werden. Der Rüssel war weiter in die Länge gewachsen und zeigte eine leichte Biegung zur Brust hin. Unterhalb des Rüssels war die Maulspalte sichtbar. Im Leberparenchym zog die Vena umbilicalis als echoarme, dunkle Linie nach kaudal. Kranial der Beckenknochen war die Harnblase als dunkler Schatten angedeutet. Die Körperhaltung war weniger gekrümmt.

Der Dottersack war weiter geschrumpft und seine Wandstärke hatte zugenommen. Die durchschnittliche Breite zwischen Tag 120 und 130 p.o betrug 15 mm, die Länge 22 mm ($n = 5$).

Paarige Allantoisgefäße durchzogen als helle, doppelbandige Strukturen die Fruchtblase und inserierten an der Plazenta. Die durchschnittliche Höhe der Plazenta zwischen Tag 120 bis 130 p.o betrug 14 mm, die durchschnittliche Breite 23 mm ($n = 7$). An der Innenseite der Allantoismembran wurden dünne, helle Vorwölbungen in die Allantoissäcke hinein beobachtet. Anhand von eigenen Beobachtungen, die an Elefantenplazenten gemacht wurden, und anhand der Beschreibungen von Amoroso & Perry (1964) wurden diese Strukturen als Allantoiskörperchen gedeutet. Die Allantoiskörperchen konnten bei einem Afrikanischen Elefanten an Tag 126 p.o beobachtet werden. Bei den untersuchten Asiatischen Elefanten waren zu diesem Zeitpunkt noch keine Allantoiskörperchen zu sehen.

3.2.5 Pränatale Entwicklung von Tag 130 bis Tag 145 p.o

Der Fötus nahm erwartungsgemäss an Größe zu und füllte die Fruchtblase zum größten Teil aus. Ab Tag 130 p.o konnten zusätzliche anatomische Details des Gehirns ausgemacht werden. Neben dem zweigelappten Plexus choroideus, der deutlich an Größe zugenommen hatte, war jeweils lateral der Falx cerebri der Thalamus im Querschnitt (Abb. 3.13(a)) als



(a) Beidseits der Falx cerebri (Fc) stellt sich der Thalamus (T) als rundlicher Schatten dar (Tag 133 p.o).

(b) Seitlich am Kopf ist das elefantentypische Ohr (Oh) zu sehen. Der Rüssel (Rss) ist deutlich länger und leicht gebogen und berührt ein Vorderbein (Ve) (Tag 133 p.o).

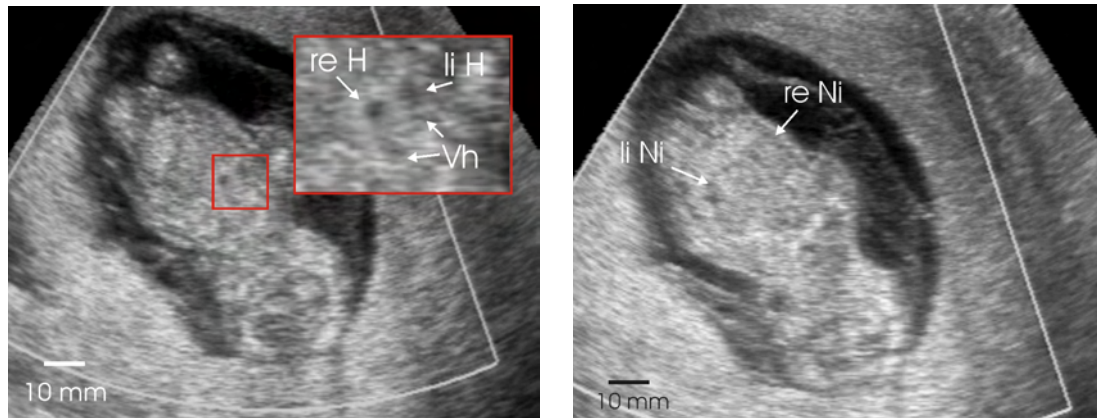
Abbildung 3.13: Kopf und Gehirnstrukturen

rundliches, echoarmes Oval sichtbar.

In der horizontalen Schnittebene besaß der Thalamus eine längliche Form. Die Verknöcherung der Schädelknochen hatte ein Stadium erreicht, in welchem der Kopf lateral durch das stark reflektierende Os parietale begrenzt wurde. Der Schluss des Neuralrohrs war weiter fortgeschritten und die Erweiterung zum vierten Gehirnventrikel hatte sich verengt. In der verknöcherten Wirbelsäule war das liquorgefüllte Rückenmark als Wirbelkanal sichtbar. Das Hinterhauptbein, Os occipitale, erzeugte ein deutlich schwächeres Echo. In der axialen Ansicht des Gesichtsschädels konnte die Orbita mit dem darinliegenden Auge dargestellt werden. Die Augenlinsen waren noch nicht zu sehen.

Die paramediane Untersuchungsebene zeigte Ober- und Unterkiefer mit Maulspalte. Seitlich am Kopf setzten sich die Ohren deutlich ab (Abb. 3.13(b)). In der 3D - Rekonstruktion wird die äußere Gestalt, die schon sehr an einen adulten Elefanten erinnert, deutlich (Abb. 3.16(a)).

Am Herzen konnten rechte und linke Herzkammer unterschieden werden (Abb. 3.14(a)).



(a) Fötale Herz mit rechter (re H) und linker (li H) Herzkammer sowie den beiden Vorhöfen (Vh) (Tag 130 p.o)

(b) Das kaudale Abdomen wird nahezu vollständig von linker (li Ni) und rechter Niere (re Ni) ausgefüllt (Tag 130 p.o).

Abbildung 3.14: Herz und Nieren

Die Wand der Herzkammern erzeugte mittelstarke Echos und schloss echoarmes Blut ein. Kranial der Herzkammern deuteten sich die Vorhöfe an (Abb. 3.14(a)). Die kräftigen Kontraktionen des Herzmuskels waren ebenfalls zu sehen. Als größtes Gefäß zog sich die Aorta von kranial nach kaudal unterhalb der vollständig verknöcherten Wirbelsäule entlang.

Die Lunge war in rechten und linken Lungenflügel differenzierbar und gegenüber der Leber echoarm (Abb. 3.17(a)). In der dorsalen Ansicht bildeten die kaudalen Anteile der Lungenflügel die Grenze zum Abdomen.

Im kaudalen Abdomen wurden erstmals die Nieren an Tag 130 p.o als große, ovale Schatten mittlerer Echogenität sichtbar (Abb. 3.14(b)). Ihre Länge betrug 12 mm, ihre Breite 8 mm. In der Mitte der Nieren befand sich eine echoärmere, runde Stelle, welche auf das Vorhandensein von Flüssigkeit hindeutete. An Tag 145 p.o grenzten sich die Nieren (Abb. 3.17(b)) und noch deutlicher ab. Ihre Länge betrug nun 18 mm und ihre Breite 11 mm. Die Echogenität der Nieren war etwas kleiner als die der Lungen. Zwischen den Nieren lag die prominente, flüssigkeitsgefüllte kreisrunde Harnblase, die über den Urachus mit den Allantoissäcken verbunden war.

In der ventrodorsalen Ansicht war die Austrittsstelle der Nabelgefäße aus dem kaudalen Abdomen sichtbar. Eine Erweiterung des Nabels konnte nicht mehr nachgewiesen werden.

Aufgrund der Bewegungen des Fötus konnte zwischen Ruhephasen und Phasen erhöhter Aktivität unterschieden werden. In Phasen erhöhter Aktivität drehte sich der Fötus um Längs- und Querachse. Die Vorder- und Hinterbeine führten rudernartige Bewegungen aus. Während der Ruhephasen lag der Fötus hingegen nahezu bewegungslos in der Fruchtblase, was für die Qualität der Volumenscans von Vorteil war.

Der gestielte, ovale Dottersack war weiterhin vorhanden. Mit einer durchschnittlichen Breite von 12 mm und einer Länge von 16 mm ($n = 9$) hatte seine Größe nochmals deutlich abgenommen. Trotz des klaren Inhalts und der verdickten Wand des Dottersacks ist jedoch nicht auszuschließen, dass ein Anschnitt eines Allantoissackes als Dottersack fehlinterpretiert wurde.

Die weissliche Grundfläche der Allantois wurde von echoärmeren, dunklen Bereichen durchbrochen, so dass ein netzartiger Eindruck entstand. Helle, doppelbandige Strukturen, welche die Fruchtblase durchzogen, wurden als Doppelmembranen, gebildet von aneinander grenzenden Allantoissäcken, gedeutet. Die Membranen waren leicht gewellt und flotierten in der Fruchtblasensflüssigkeit. Entlang dieser Membranen liefen gut ausgeprägte Gefäße vom Nabel zur Plazenta. Die charakteristischen Allantoiskörperchen waren nun auch bei Asiatischen Elefanten zu sehen.

Das Wachstum der Plazenta wurde besonders in einer Zunahme der durchschnittlichen Breite zwischen Tag 130 und 145 p.o auf 28 mm deutlich ($n = 15$). Die durchschnittliche Höhe des Plazentabandes hatte mit 15 mm nur geringfügig zugenommen. Die zuvor einheitlich helle Textur der Plazenta war durch Bereiche geringer Echogenität aufgelockert. Mittels Colour Doppler Flow wurden diese Bereiche als Blutgefäße und blutgefüllte Lakunen identifiziert. Die in die Fruchthöhle ragende Oberfläche der Plazenta erschien etwas unregelmässig.

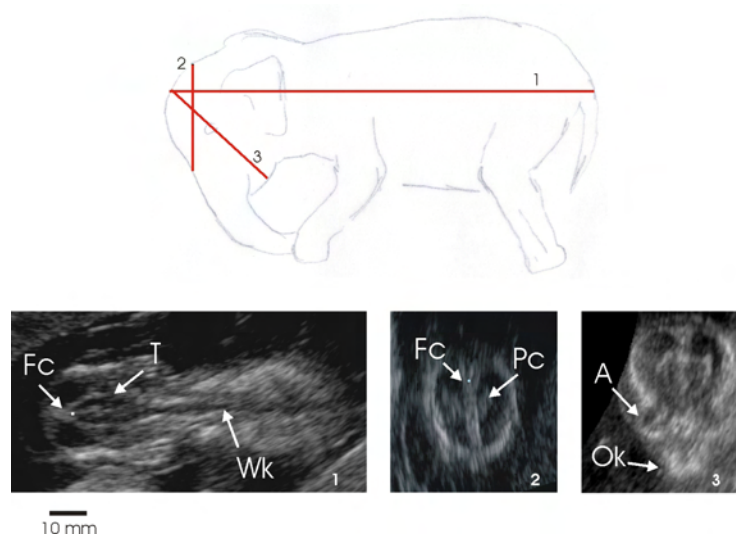
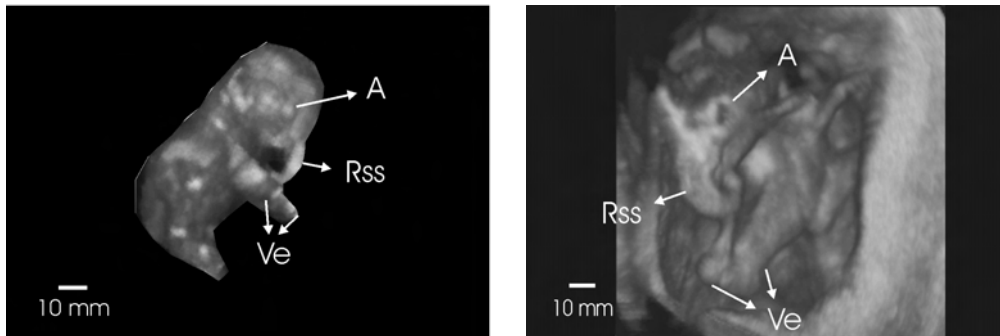


Abbildung 3.15: Im Horizontalschnitt (1) verläuft der Wirbelkanal (Wk) als schwarze Linie von kaudal nach kranial. Beidseits der Falx cerebri (Fc) ist der Thalamus (T) zu sehen (Tag 130 p.o). Im Transversalschnitt (2) stülpt sich der Plexus choroideus (Pc) in die Ventrikel hervor (Tag 130). Der Gesichtsschädel mit Augen (A) und Oberkiefer (Ok) wird in der coronal-axialen Ebene (3) dargestellt (Tag 138).

3.2.6 Pränatale Entwicklung von Tag 145 bis 240 p.o

Im Vergleich zur frühen Trächtigkeit war der Fötus von relativ wenig Fruchtwasser umgeben. Oft lagen Körperteile sehr nahe an der Plazenta, so dass eine gute Darstellung bestimmter Strukturen erschwert war. Auch verlegten die fötalen Membranen und die trübe Allantoisflüssigkeit den freien Blick auf den Fötus. Hinzu kam die zunehmende Aktivität des Fötus; die schon beschriebenen Bewegungen der Gliedmassen wurden zunehmend heftiger.

Die Körperhaltung des Fötus entsprach der eines adulten Elefanten (Abb. 3.16(b)). Die Körperachse besass nur noch eine leichte dorsokonvexe Biegung und die Gliedmassen waren locker gestreckt. In Bezug auf die Detailgenauigkeit nahm die Bildqualität durch die Verwendung kleinerer Frequenzen ab. Der Fötus befand sich häufig unterhalb der mütterlichen Harnblase. Manches Mal konnte der Fetus überhaupt nicht aufgefunden werden.



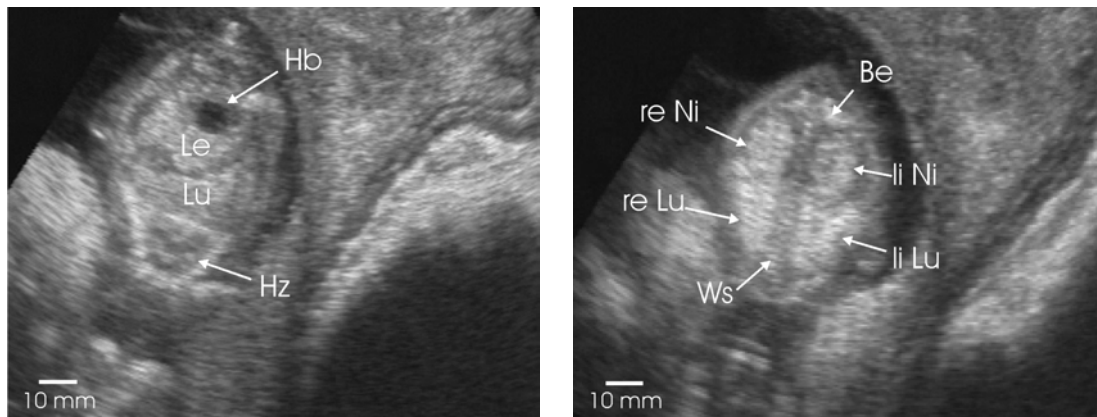
(a) 3D-Rekonstruktion eines Fötus an Tag 133 p.o. Vordergliedmassen (Ve), Rüssel (Rss) und Auge (A) sind eindeutig zu erkennen

(b) 3D-Rekonstruktion eines Fötus an Tag 168 p.o. Der Rüssel (Rss) ist zur Brust hin eingerollt. Seitlich am Kopf ist ein Auge (A) zu sehen. Die Vordergliedmassen (Ve) sind leicht gestreckt

Abbildung 3.16: Vergleich der äusseren Körperform des Fötus mit 133 und 168 Tagen p.o.

Mit 151 Tagen waren die Augenlinsen zu sehen, die sich als helle, runde Scheiben von den dunklen Augäpfeln abhoben. Mit 169 Tagen konnten eindeutige Kaubewegungen des Fötus gezeigt werden. Der Unterkiefer öffnete und schloss sich dabei mehrmals in Folge. Zunge, Gaumensegel und Speiseröhre waren sichtbar. Es ist anzunehmen, dass der Fötus während der Kaubewegung Fruchtwasser abschluckte. Der Rüssel war länger geworden und die Rüsselspitze konnte in Richtung Maul geführt werden. In der zuvor echolosen, schwarzen Magenblase zeichnete sich nun eine leicht echogene Verschattung ab. Der Durchmesser der Magenblase hatte weiter zugenommen. Am Herzen konnten sowohl die beiden Herzkammern und ihre Vorhöfe als auch die Aufzweigung der Aorta gezeigt werden. (Abb. 3.18). Körpernah war eine deutliche Pulsation des Nabelstrangs im Rhythmus der Herzschlag festzustellen. Im Querschnitt konnten die vier Gefäße des Nabelstrangs als hell umrandete Kreise dargestellt werden.

Die Gehirnv ventrikel hatten ebenfalls an Größe zugenommen. In der Lateralansicht wurde die Aufteilung in vier, durch leichte Einziehungen voneinander abgesetzte Hirnbläschen deutlich. Innerhalb der Falx cerebri konnte der Sinus cavernosus als ein mit Flüssigkeit gefüllter Hohlraum dargestellt werden. Die Nieren waren weiterhin deutlich im Abdomen



(a) In der ventralen Ansicht ist das Herz (Hz) als dunkler Schatten im Thorax zu sehen. Kaudal davon befinden sich Lunge (Lu), Leber (Le) und Harnblase (Hb) (Tag 145 p.o).

(b) In der dorsalen Ansicht werden linke (li Lu) und rechte (re Lu) sowie linke (li Ni) und rechte (re Ni) Niere durch die Wirbelsäule (Ws) getrennt. Kaudal ist der Beckenknochen (Be) zu sehen (Tag 145 p.o).

Abbildung 3.17: Lunge, Leber und Niere

zu sehen. Ihre Länge betrug mit 191 Tagen 32 mm, ihre Breite 21 mm.

Die Größe und Häufigkeitsverteilung der Blutlakunen innerhalb der Plazenta hatte zugenommen. Die Allantoisgefäße waren weiterhin sehr prominente Strukturen in der Fruchtblase. Durch das Colour Doppler Flow Verfahren konnten die paarigen Gefäße in Arterie und Vene differenziert werden. Die Allantoiskörperchen waren größer geworden und wiesen unterschiedliche Gestalt auf. Einige Allantoiskörperchen waren knopfartig geformt, andere waren lang gestielt. Die Durchmesser der Allantoiskörperchen variierten von 0,3 mm bis 0,5 mm.

Durch das stetige Größenwachstum wurde es immer schwieriger, den gesamten Fötus in einem Bild einzufangen. Oft waren nur einzelne Körperteile, wie beispielsweise die Hintergliedmassen oder der Kopf, darstellbar. Die Lage des Fötus war oft derart, dass der Kopf in Bezug auf das Muttertier nach kranial und ventral zeigte und die Hinterfüße nach kaudal und dorsal gestreckt waren.

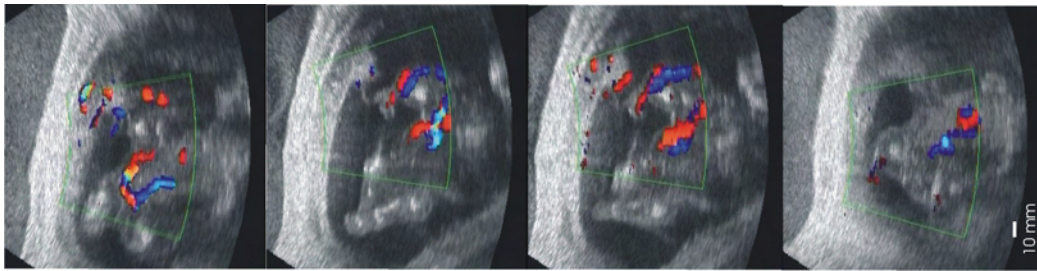


Abbildung 3.18: Fötale Zirkulation

Mit 226 Tagen p.o konnte der fötale Kopf mit eingerolltem Rüssel das letzte Mal mittels transrektaler Sonographie dargestellt werden. In der darauffolgenden Zeit sank der Fötus mit dem Kopf voran tiefer in die Bauchhöhle ab und nur die nach kaudal zeigenden Hintergliedmassen konnten noch gelegentlich aufgefunden werden.

In Tab. 3.2.6 sind alle wichtigen sonographischen Merkmale nach ihrem zeitlichen Auftreten während der Trächtigkeit zusammenfassend aufgeführt. Das Auftreten eines Merkmals bezieht sich hierbei auf den Zeitpunkt, an welchem es zum ersten Mal beobachtet wurde. Individuelle Unterschiede zwischen den einzelnen Elefanten wurden nicht berücksichtigt.

Sonographisches Merkmal	Trächtigkeitsalter
Fruchtblase	
erstes Auftreten	Tag 50
mrundliche Form	Tag 50 - 70
ovale Form	ab Tag 70
Dottersack	
erstes Auftreten	Tag 68
rundliche Form	Tag 68 - 100
ovale Form	ab Tag 100
Allantois	
erstes Auftreten	Tag 85
Allantoiskörperchen	ab Tag 126
Embryo/Fötus	
rundliche Form	Tag 68 - 74
längliche Form	ab Tag 74
Herzschlag	ab Tag 80
Differenzierung Kopf/Rumpf	ab Tag 83
Extremitäten	ab Tag 88
dreieckige Nase	ab Tag 88
Rüssel	ab Tag 88
Magenblase	ab Tag 113
Leber - Lungen - Grenze	ab Tag 113
Ossifikat. d. langen Röhrenknochen	ab Tag 119
Harnblase	ab Tag 140
Niere	ab Tag 130
Physiolog. Nabelhernie	
erstes Auftreten	ab Tag 95
Verschwinden	Tag 118
Gehirn	
anechogener Ventrikel	Tag 88
Mittelecho	ab Tag 108
Pl. choroideus	ab Tag 108
Thalamus	ab Tag 130
Plazenta	
Plazentainseln	Tag 83
geschlossener Ring	ab Tag 108
Blutlakunen	ab Tag 150

Tabelle 3.1: Übersicht über das Auftreten ausgewählter sonographischer Merkmale

3.3 Pränatales Wachstum des Elefanten

3.3.1 Beschreibung des pränatalen Wachstums anhand von Ultraschallmessungen

Um anhand von Ultraschallmessungen fötale Wachstumskurven zu erstellen, wurden vier verschiedene biometrische Parameter ausgewählt: Scheitel-Steiss-Länge (SSL), Biparietaler Abstand (BPA), Thoraxdurchmesser (TH) und Femurlänge (FL).

Von allen untersuchten Elefanten war der Zeitpunkt der Ovulation entweder durch künstliche Besamung oder durch den beobachteten Deckakt in Verbindung mit täglichen Hormonmessungen bekannt (Tab. 2.1). Der Tag der Ovulation wurde in Bezug auf das Alter der Trächtigkeit bzw. des Fötus als Tag 0 definiert. Jedem Messwert konnte so das exakte fötale Alter zugeordnet werden. Es wurde angestrebt, bei jeder Untersuchung alle biometrischen Parameter zu erheben. Dies war aufgrund der Lage und Erreichbarkeit des Fötus nicht immer möglich.

Die SSL war derjenige biometrische Parameter, der am frühesten erhoben werden konnte. Die erste Messung der SSL erfolgte an Tag 62 p.o und betrug 5,0 mm. Mit fortschreitender Größenzunahme gestaltete sich die Messung der SSL immer schwieriger, da die Haltung des Fötus den Messwert zunehmend beeinflusste. Auch konnte der gesamte Fötus später nicht immer in einem Ultraschallfenster dargestellt werden. Um dennoch einen Wert für die SSL zu erhalten, wurde in diesem Fall die Länge des Kopfes zur Rumpflänge addiert. Das letzte Mal konnte die SSL an Tag 202 p.o gemessen werden. Ihre Länge betrug 205,3 mm.

Der BPA wurde erstmals an Tag 88 p.o mit 7,3 mm gemessen. Vor diesem Zeitpunkt hatte noch keine Differenzierung in Kopf und Rumpf stattgefunden. Die späteste BPA Messung erfolgte an Tag 226 mit 91,3 mm.

Die Thoraxmessungen lagen im Zeitraum von Tag 99 bis 240 p.o zwischen 10,5 und 88,0 mm.

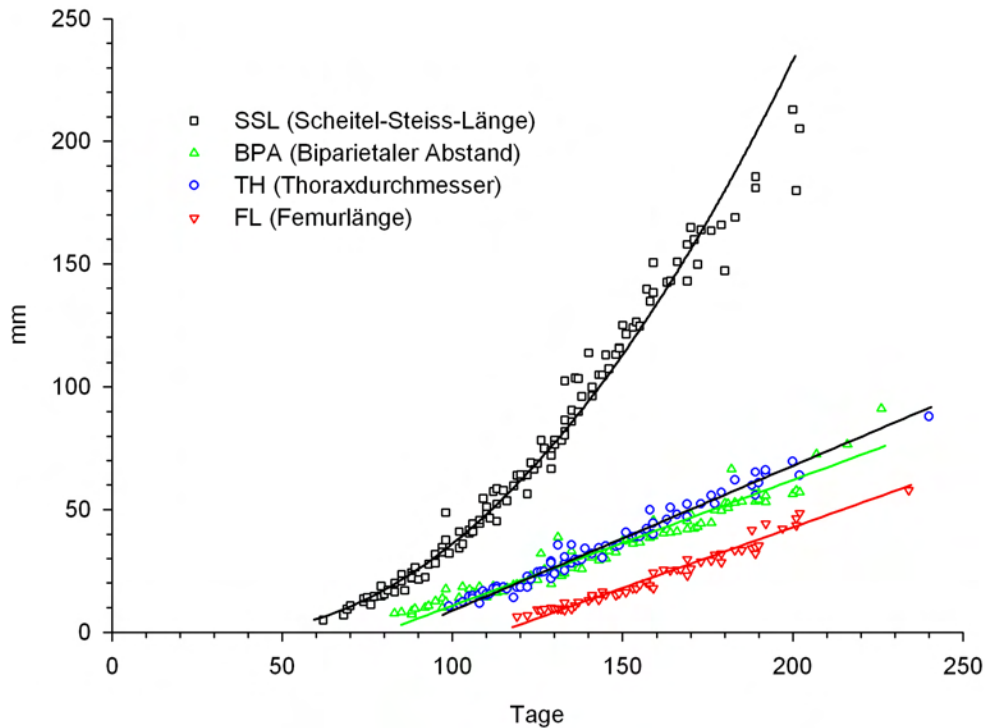


Abbildung 3.19: Scheitel - Steiss - Länge (SSL), Biparietaler Abstand (BPA), Thoraxdurchmesser (TH) und Femurlänge (FL) aufgetragen gegen fötales Alter

Die FL konnte erst in später in der Trächtigkeit bestimmt werden. Erstmals wurde die FL an Tag 119 p.o mit 6,4 mm gemessen. Die letzte Messung fand an Tag 234 p.o statt und betrug 58,0 mm.

Mittels Regressionsanalyse wurden anhand der Ultraschallmessungen Wachstumskurven zur pränatalen Altersbestimmung erstellt. Da die Messwerte sowohl aus Ultraschalluntersuchungen Asiatischer ($n = 10$) als auch Afrikanischer Elefanten ($n = 9$) stammten, wurde zuvor mittels Kovarianzanalyse überprüft, ob es einen speziesspezifischen Unterschied zwischen den Regressionslinien der erhobenen biometrischen Parametern und dem fötalen Alter gibt. Keine der Regressionslinien ergab jedoch signifikante Unterschiede in Steigungen oder Achsenabschnitten (Alter und $SSL^{1/2}$: $p(\text{Steigung}) = 0,091$, $p(\text{Achsenabschnitt})$

= 0,947; Alter und BPA: $p(\text{Steigung}) = 0,405$, $p(\text{Achsenabschnitt}) = 0,751$; Alter und TH: $p(\text{Steigung}) = 0,522$, $p(\text{Achsenabschnitt}) = 0,647$; Alter und FL: $p(\text{Steigung}) = 0,890$, $p(\text{Achsenabschnitt}) = 0,979$). Für die Erstellung der Wachstumskurven (siehe 3.19) werden daher nachfolgend die Messdaten der Afrikanischen und der Asiatischen Elefanten zusammengefasst. Die lineare Regressionsanalyse mit dem Modell $\text{Alter} = m * \text{Parameter} + c$ ergab folgende Ergebnisse:

$$\text{Alter} = 78,98 + 1,95 * \text{BPA} \quad (3.1)$$

→ $R^2 = 0,95$; $F(1,105) = 2195,5$; $p < 0,001$

$$\text{Alter} = 85,32 + 1,69 * \text{TH} \quad (3.2)$$

→ $R^2 = 0,98$; $F(1,76) = 3640,7$; $p < 0,001$

$$\text{Alter} = 113,55 + 1,69 * \text{FL} \quad (3.3)$$

→ $R^2 = 0,97$; $F(1,54) = 1467,2$; $p < 0,001$

Das Alter wird hierbei in Tagen angegeben. BPA, TH sowie FL werden in mm angegeben.

Die pseudolineare Regression zwischen Alter und SSL mit dem Modell $\text{Alter} = m * \text{SSL}^{1/2}$ ergab:

$$\text{Alter} = 35,14 + 10,80 * \text{SSL}^{1/2} \quad (3.4)$$

→ $R^2 = 0,98$; $F(1,114) = 5936,67$; $p < 0,001$

Die Angabe des Alters erfolgt hier ebenfalls in Tagen, die von SSL in mm.

Wie aus Abbildung 3.19 ersichtlich, nimmt SSL von Tag 62 bis ca. Tag 100 etwas langsamer zu als von Tag 100 bis Tag 226. Während die verschiedenen Messwerte anfangs sehr nahe beisammen liegen, nimmt ihre Streuung mit fortschreitender Trächtigkeit zu. Dies ist einerseits auf die bereits angesprochenen, von Messung zu Messung variierenden Körperhaltung

zurückzuführen, andererseits dürften auch individuelle Unterschiede im Größenwachstum eine zunehmende Rolle spielen. Die Werte für BPA entsprechen bis ca. Tag 140 den Werten von TH. Danach ist TH etwas größer als BPA. Die Steigung von FL ist ungefähr gleich groß wie die von BPA und TH. Mit den Formeln 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4 ist es nun möglich, das fötale Alter bei unbekanntem Konzeptionszeitpunkt im Rahmen einer einmaligen Ultraschalluntersuchung anhand von Ultraschallmessungen zu bestimmen. Die Wahl des jeweiligen biometrischen Parameters ist dabei abhängig von der Lage und Orientierung des Fötus in Bezug auf den Schallkopf. Auch das Trächtigkeitsalter ist von Bedeutung: SSL beispielsweise kann schon sehr früh bestimmt werden, während FL erst in der zweiten Hälfte des ersten Trimesters messbar wird. Aus Abb. 3.19 ist weiterhin zu ersehen, dass Ultraschallmessungen lediglich im Zeitraum von Tag 62 bis Tag 226 durchgeführt werden können. Dies entspricht ca. einem Drittel der Gesamtträchtigkeit.

3.3.2 Validierung der Formeln nach Huggett & Widdas und Craig

ID	$SSL_{ultraschall}$ [mm]	SSL_{lineal} [mm]	Masse [g]
WB1	30,2	33,0	7,2
WB2	64,5	66,8	24,4
WB3	73,3	78,1	47,8
WB4	120,0	116,0	133,7
WB5	140,0	146,2	288,1
WB6	180,0	185,5	554,3

Tabelle 3.2: Untersuchungsdaten der formalinfixierten Föten (WB1-6)

Die bisher verwendeten Formeln zur pränatalen Altersbestimmung beim Elefanten nach Huggett & Widdas (1951)(siehe Seite 24) und nach Craig (1984)(siehe Seite 24) beruhen auf dem Zusammenhang von fötaler Masse und Alter. Da die fötale Masse von lebenden Föten in utero nicht bestimmt werden kann, ist ein direkter Vergleich der Formeln nicht möglich.

Um dennoch einen Vergleich anstellen zu können, wurden zusätzlich zu den Daten der sonographisch untersuchten Elefanten (E1-19) Daten formalinfixierter Föten (WB1-6, EF1-16)

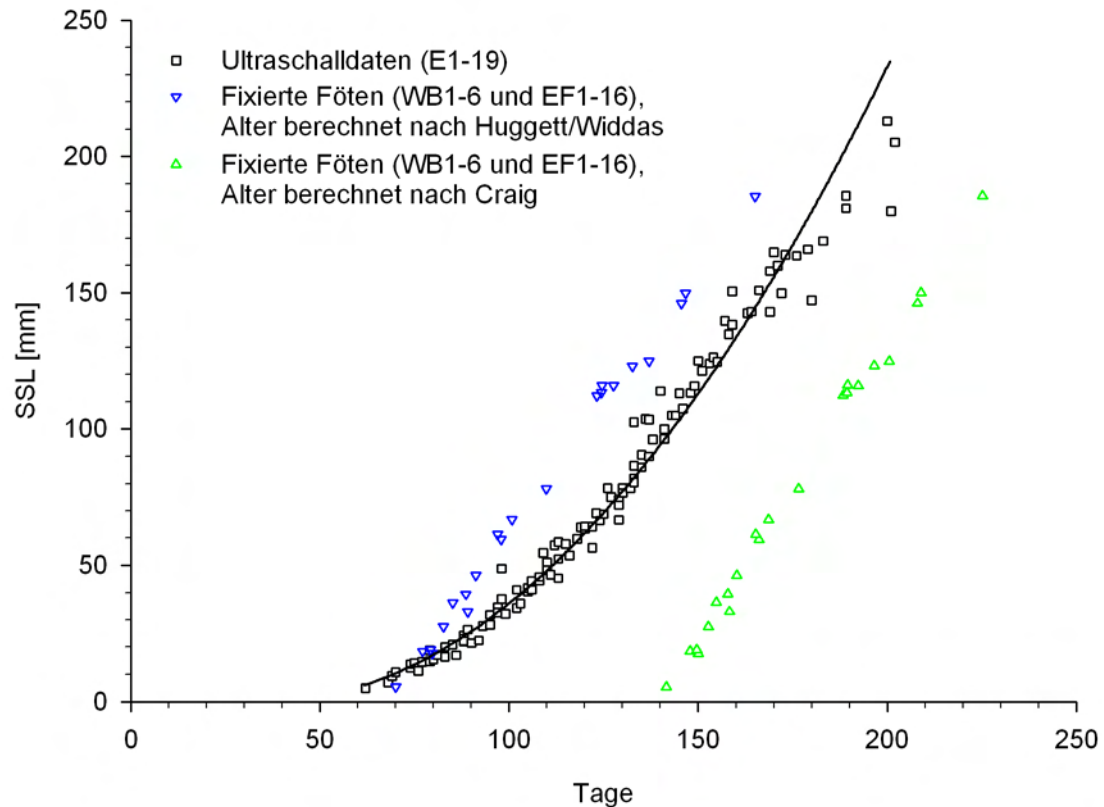


Abbildung 3.20: Die Scheitel - Steiss - Länge (SSL) der untersuchten Elefanten (E1-19, siehe Tab. 2.1) ist gegen das bekannte fötale Alter aufgetragen. Das Alter der formalinfixierten Föten (WB1-6, siehe Tab. 3.2) und EF1-16, entnommen aus Gaeth *et al.* (1999), wurde anhand ihrer Masse nach Huggett & Widdas (1951)(siehe Seite 24) bzw. nach Craig (1984)(siehe Seite 24) berechnet.

in unterschiedlichen Entwicklungsstadien verwendet. Zwar ist das Alter der formalinfixierten Föten unbekannt, ihre Masse jedoch kann bestimmt werden. Bei den Föten WB1-6 handelt es sich um Ausstellungsstücke aus dem Krüger Nationalpark Museum, die während der culls in den Jahren 1964 - 1994 geborgen wurden. Die formalinfixierten Föten wurden im Jahre 1997 von Dr. Hildebrandt und Dr. Görnitz gewogen und sonographisch im Wasserbad untersucht.

Die Untersuchung wurde auf Videoband aufgezeichnet. Weiterhin wurde SSL per Lineal

bestimmt (SSL_{lineal}). Im Rahmen dieser Arbeit wurde SSL zusätzlich retrospektiv aus den Videoaufnahmen der Ultraschalluntersuchungen ($SSL_{ultraschall}$) ermittelt. Die so gewonnenen Daten sind in Tab. 3.2 aufgeführt. Die Angaben zu fötaler Masse und SSL der Föten EF1-16 sind der Publikation „The developing renal, reproductive, and respiratory system of the African elephant suggest an aquatic ancestry“ von Gaeth *et al.* (1999) entnommen. SSL von EF1-16 wurde ausschliesslich per Lineal bestimmt. Zur Validierung der Messungen, welche retrospektiv aus den Ultraschallaufnahmen gewonnen wurden, wurde $SSL_{ultraschall}$ (WB1-6) mit SSL_{lineal} (WB1-6) verglichen. Wie bereits aus Tab. 3.2 ersichtlich, besteht zwischen den beiden Methoden kein signifikanter Unterschied (lineare Regression durch den Nullpunkt: $SSL = 1,026 * SSL_{ultraschall}$, $R^2 = 0,999$, $p < 0,001$).

Da für die fixierten Föten E1-16 $SSL_{ultraschall}$ nicht vorliegt, wurde für nachfolgende Berechnungen SSL_{lineal} verwendet.

Die Datensätze der formalinfixierten Föten (WB1-6, EF1-16) und der sonographisch untersuchten trächtigen Elefanten (E1-19) konnten graphisch gegenübergestellt werden, indem jedem SSL - Wert ein bestimmtes Alter zugeordnet wurde (Abb. 3.20). Das Alter der formalinfixierten Föten wurde hierfür einmal nach Huggett & Widdas (1951) und einmal nach Craig (1984) berechnet. Da von allen sonographisch untersuchten Elefantenkühen der Ovulationszeitpunkt durch künstliche Besamung oder durch beobachteten Deckakt in Verbindung mit täglichen Hormonmessungen bekannt war, war auch das Alter der in utero untersuchten Föten bekannt und musste nicht berechnet werden. Aus Abb. 3.20 geht hervor, dass die Föten nach der Formel von Huggett & Widdas etwa 20 Tage zu jung eingestuft werden. Craigs Formel hingegen überschätzt das fötale Alter um ca. 20 bis 65 Tage.

3.3.3 Beschreibung des pränatalen Wachstums des Elefanten anhand der Masse formalinfixierter Elefantenföten

Um eine neue Formel zur fötalen Altersbestimmung anhand der fötalen Masse zu entwickeln, wurde mittels linearer Regressionsanalyse ein Zusammenhang zwischen SSL und der

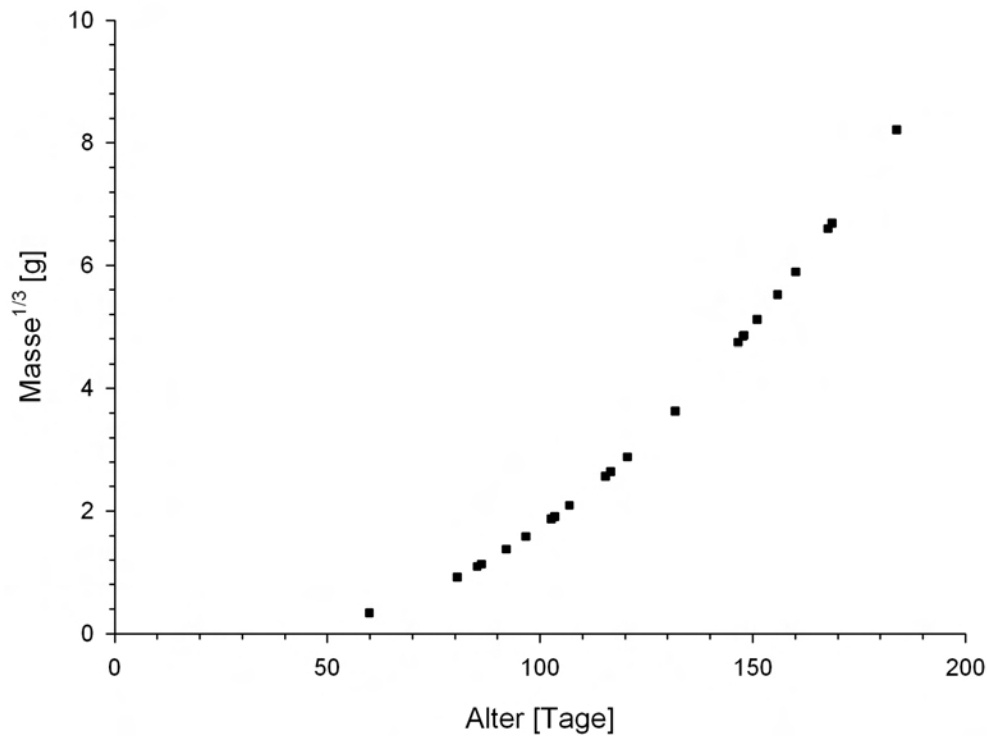


Abbildung 3.21: Die Masse der formalinfixierten Föten WB1-6 (siehe Tab. 2.1) und EF1-16 (entnommen aus Gaeth *et al.* (1999)) ist gegen ihr fötales Alter, berechnet nach Formel(3.4), aufgetragen.

dritten Wurzel der fötalen Masse ω formuliert:

$$SSL = 23,10 * \omega^{\frac{1}{3}} - 3,28 \quad (3.5)$$

$$\rightarrow R^2 = 0,99; F(1,20) = 3177,7; p < 0,001$$

Die Darstellung des Verhältniss zwischen fötalem Alter und Masse erfolgte durch Abschätzung des Alters nach Formel (3.4). Obwohl Huggett&Widdas und Craig ein lineares Verhältnis zwischen der dritten Wurzel der Masse und fötalem Alter postulieren, zeigt Abb. 3.21, dass dieses Verhältnis im beschriebenen Zeitraum nichtlinear ist. Mit einer quadratischen Gleichung kann der Zusammenhang zwischen der dritten Wurzel der Masse und fötalem

Alter adäquat formuliert werden. Der umgekehrte Zusammenhang zwischen Alter und der dritten Wurzel der Masse lässt sich folglich mit einer Wurzelfunktion beschreiben:

$$\text{Alter} = 28,43 + 54,20 * (\omega^{\frac{1}{3}})^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

→ $R^2 = 0,99$; $F(1,20) = 3177,7$; $p < 0,001$

$$\text{Alter} = 28,43 + 54,20 * \omega^{\frac{1}{6}} \quad (3.7)$$

3.3.4 Wachstumsmodelle nach Gompertz und von Bertalanffy

Um das pränatale Wachstum des Elefanten über den gesamten Verlauf der Trächtigkeit zu beschreiben, wurden die Wachstumsmodelle nach Gompertz (1825) und von Bertalanffy (1960) verwendet (Abb. 3.22). Als Wachstumsgröße diente hierfür die Scheitel - Steiß - Länge (SSL). Da transrektale Sonographie nur im ersten Drittel der Trächtigkeit möglich war, wurden zusätzlich zu den Ultraschalldaten (E1-E19) SSL - Messungen von abor-tierten Föten bekannten Alters verwendet (A1-3, siehe Tab. 2.2). Als Endwert für das pränatale Wachstum wurde eine Scheitel-Steiß-Länge von 100 cm angenommen, die auf der Längenmessung von den drei Neugeborenen der untersuchten Elefanten E17, E18 und E19 beruht.

Die Wachstumsmodelle nach Gompertz (1825) und von Bertalanffy (1960) zeigen einen sigmoiden Verlauf und müssen durch nichtlineare Regression an die SSL - Messungen angepasst werden. Die jeweiligen Parameter wurden iterativ bestimmt. Die Robustheit des Verfahrens wurde durch Variation der Startwerte überprüft. Die Formel nach Gompertz (1825) lautet:

$$W(t) = A * e^{-e^{(b-ct)}} \quad (3.8)$$

W ist die entsprechende Wachstumsgröße, in diesem Fall also die Scheitel - Steiß - Länge zum Zeitpunkt t. A ist der Endwert für t gegen unendlich. Die Parameter b und c charakterisieren Anstieg und Wendepunkt der Kurve. Aus der nichtlinearen Regression ergaben sich für die Parameter folgende Werte: $b = 1,87 \pm 0,02$, $c = (7,2 \pm 0,2) * 10^{-3}$ und

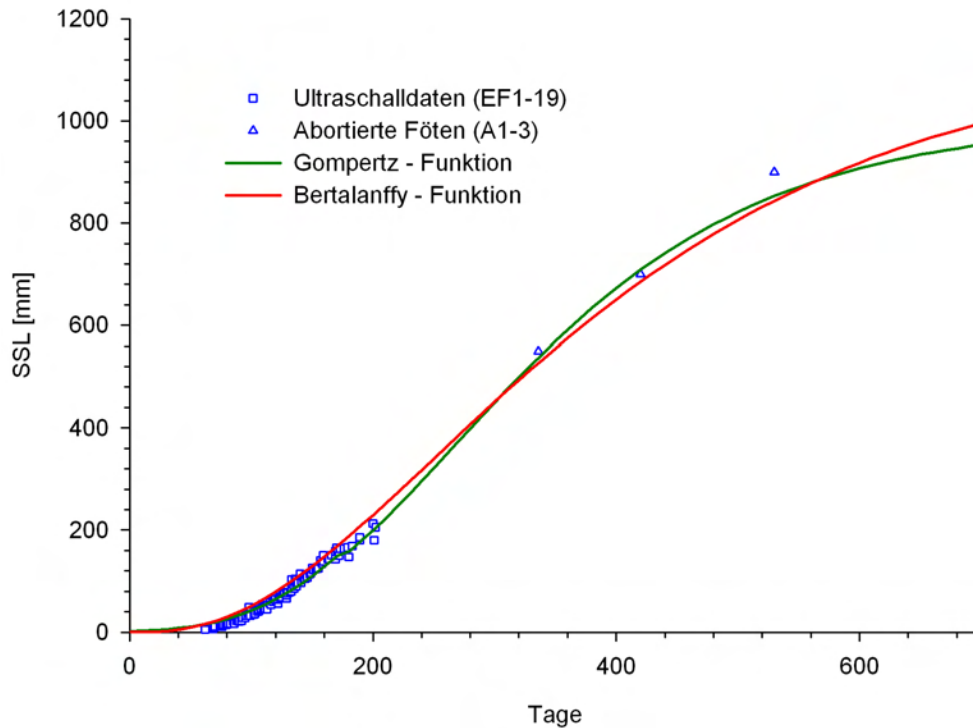


Abbildung 3.22: Wachstumsmodelle nach Gompertz und von Bertalanffy, angepasst an die Scheitel - Steiss - Längen (SSL)- Messungen sonographisch untersuchter Elefanten (E1-19, siehe Tab. 2.1) und abortierter Elefantenföten bekannten Alters (A1-3, siehe Tab. 2.2)

$$A = (1008 \pm 19) \text{ mm}; R^2 = 0,99.$$

Für den Endwert des pränatalen Wachstums A ergibt sich also ein Wert von ca. 1000 mm. Zum Zeitpunkt der Geburt, nach 660 Tagen, besäße das Neugeborene nach diesem Wachstumsmodell eine Scheitel - Steiss - Länge von ca. 946 mm.

Das Wachstumsmodell nach von Bertalanffy (1960) lautet:

$$W(t) = \left(\frac{f}{g} - \left(\frac{f}{g} - W_0^{\frac{1}{3}} \right) * e^{-\frac{1}{3}gt} \right)^3 \quad (3.9)$$

W_0 steht hier für das Wachstumsgröße zum Zeitpunkt $t = 0$ und ist in diesem Fall sehr klein. Die Asymptote für t gegen unendlich ist gegeben durch $(\frac{f}{g})^3$. Die Parameter f und g bestimmen wiederum Anstieg und Wendepunkt der Kurve. Das iterative Verfahren ergab

für die Parameter f , g und W_0 folgende Werte: $f = (0,138 \pm 0,006)$, $g = (0,0132 \pm 0,0007)$ und $W_0 = 2,83 * 10^{-8}$ mm; $R^2 = 0,98$

Nach dem Wachstumsmodell von von Bertalanffy ergibt sich eine Asymptote, die gegen den Endwert von 1148 mm strebt. Zum Geburtszeitpunkt nach 660 Tagen liegt die Scheitel - Steiss - Länge bei 968 mm.

Für beide Wachstumsmodell ergeben sich zum Geburtszeitpunkt also Scheitel -Steiss - Längen, die unterhalb des durchschnittlichen Wertes von 1000 mm, gemessen bei den drei Neugeborenen der Elefanten E17, E18 und E19, liegen. Die Modelle bewegen sich jedoch in einem durchaus realistischen Bereich.