



UNIwersYTET MEDYCZNY
IM. PIASTÓW ŚLĄSKICH WE WROCLAWIU

Iek. Carsten Kantelberg

specjalista ortopedii i chirurgii urazowej w gabinecie ortopedycznym Promedi
Orthopaedie w Niemczech

*„Wpływ wyników analizy morfometrycznej nasady łuków kręgosłupa szyjnego na
technikę operacyjną”,*

*„Morphometric analysis of the cervical pedicles and Conclusions for posterior cervical
instrumentations”*

Rozprawa na stopień doktora w dziedzinie nauk medycznych w dyscyplinie medycyna.

Promotor:

Prof. dr hab. Szymon Dragan

Katedra i Klinika Ortopedii i Traumatologii Narządu Ruchu

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Recenzenci:

Prof. dr hab. Tomasz Kotwicki

Klinika Chorób Kręgosłupa i Ortopedii Dziecięcej

Uniwersytet Medyczny Im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

Dr hab. Celina Pezowicz

Katedra Inżynierii Biomedycznej, Mechatroniki i Teorii Mechanizmów

Politechnika Wroclawska

Wrocław, dnia 6 czerwca 2018 r.

Wprowadzenie:

Leczenie chirurgiczne niestabilnych złamań kręgosłupa, jego schorzeń i deformacji uległo na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci znacznym zmianom. Przez długi czas przedłużanie szkieletu techniką Crutchfield było jedynym sposobem leczenia świeżych, niestabilnych urazów kręgosłupa szyjnego. Pacjenci musieli pozostawać unieruchomieni do czasu wyleczenia.

Dopiero po sukcesach chirurgicznych w dyskopatii kręgosłupa szyjnego (Robinson i Smith, Cloward, Dereymaeker i Mulier, Dohn) powoli nabrało tempa leczenie chirurgiczne mające na celu stabilizację kręgosłupa szyjnego. Dzięki analizom biomechanicznym i coraz częstszemu stosowaniu implantów, narzędzia te uległy coraz większemu rozwojowi. Obecnie połączenie śrubowe nasad kręgów odcinka szyjnego jest złotym standardem w leczeniu niestabilności kręgosłupa. Ich zastosowanie umożliwia redukcję niestabilnych złamań i nowotworów poprzez wydłużanie i lordozację, zwiększenie przekroju korzenia i kanału kręgowego poprzez rozciągnięcie i zginanie - na przykład w zwężeniach kanału kręgowego i uciskach korzenia nerwowego, wyeliminowanie nieprawidłowych położań powstałych np. wskutek niestabilności zwyrodnieniowych oraz zwiększenie sztywności lub stabilności odcinków kręgosłupa, które mają być zespolone.

Przy wszystkich zaletach połączenie śrubowe nasad kręgów niesie ze sobą również pewne ryzyko, takie jak urazy tętnic kręgowych i nerwów, a także rdzenia kręgowego. Jest to spowodowane dużą zmiennością indywidualną i międzykręgową, a także specyficznymi uwarunkowaniami anatomicznymi kręgosłupa szyjnego: wąskimi nasadami, dużym poprzecznym kątem nachylenia nasady, bliskością i przebiegiem tętnicy kręgowej, niewielką odległością między ścianką nasady przyśrodkowej a workiem oponowym.

Określenie celu:

Celem pracy jest określenie morfometrii nasad kręgów kręgosłupa szyjnego oraz wyciągnięcie wniosków odnośnie instrumentów stosowanych w zabiegach w obrębie powierzchni grzbietowej odcinka szyjnego, z uwzględnieniem literatury dostępnej autorowi w chwili pisania niniejszego opracowania. W tym celu wszelkie dane morfometryczne kręgosłupa istotne dla pracy są oceniane w określonym czasie za pomocą TK i przetwarzane w odniesieniu do celu pracy.

Opis problemu:

Połączenie śrubowe nasad kręgów, które służy do stabilizacji kręgosłupa, stało się złotym standardem. Niemniej jednak nadal wiąże się z pewnymi zagrożeniami, w tym z dużą zmiennością indywidualną i międzykręgową. Utrudniają one chirurgowi przyjęcie odpowiednich założeń, aby bezpiecznie i bez komplikacji wykonać połączenie śrubowe nasad kręgów. Z tego powodu zbieranie danych morfometrycznych służy z jednej strony poprawie stopnia wyszkolenia chirurgów, ale może również służyć rozwojowi nowoczesnych narzędzi chirurgicznych, takich jak lokalizator. Oba środki okazały się pomocne w ograniczeniu występowania błędów, takich jak przebicie nasady kręgu, urazy tętnicy kręgowej lub rdzenia kręgowego.

Najnowocześniejsze rozwiązania:

Obecnie połączenie śrubowe nasad kręgów odcinka szyjnego jest złotym standardem w leczeniu niestabilności kręgosłupa. Jednak pomimo wszystkich korzyści, jakie niesie ze sobą ten zabieg, takich jak szczególnie wysoka sztywność, której nie można osiągnąć poprzez połączenie śrubowe masy bocznej, wiąże się on z pewnymi zagrożeniami, takimi jak urazy tętnic i nerwów kręgowych oraz rdzenia kręgowego. Niemniej jednak istnieją wystarczające dowody na to, że środki przedoperacyjne, takie jak radiologiczna ocena kręgu pacjenta lub lokalizacja niektórych punktów orientacyjnych w celu zapewnienia bezpiecznego umieszczenia śrub do nasad kręgów, mogą znacząco zminimalizować ryzyko.

Abumi i in. opisali w badaniu z 2000 roku powikłania mocowania śrubowego nasad kręgów w chirurgii rekonstrukcyjnej kręgosłupa szyjnego. Celem pracy była ocena ryzyka związanego z mocowaniem śrub w nasadach kręgów oraz znaczenia planowania przedoperacyjnego i technik chirurgicznych dla zmniejszenia ryzyka.

W tym celu przebadano 180 pacjentów, u których wykonano operację rekonstrukcyjną w obrębie kręgosłupa szyjnego z zastosowaniem mocowania śrubowego nasad kręgów w celu wykrycia powikłań, które mogą towarzyszyć tej metodzie. Schorzenia kręgosłupa obejmowały urazy kręgosłupa w 70 przypadkach oraz zmiany bezurazowe w 110 przypadkach. W nasady kręgów odcinka szyjnego wszczepiono łącznie 712 śrub, a promieniowanie rentgenowskie umożliwiło zlokalizowanie 669 śrub.

Badania te wykazały, że u jednego chorego doszło do uszkodzenia tętnicy kręgowej, z której krwawienie zatrzymano przy użyciu wosku kostnego. Tomografia komputerowa (TK) wykazała, że przez nasadę przebiło się 45 śrub, a 2 z 45 śrub spowodowały korzeniowe zapalenie nerwu (radikulopatię).

Oprócz tych powikłań nerwowo-naczyniowych, spowodowanych bezpośrednim działaniem śrub, u pacjenta zaobserwowano radikulopatię spowodowaną zwężeniem jatrogennym, co z kolei spowodowane było silnym zmniejszeniem nieprawidłowego ustawienia translacyjnego. Autorzy doszli do wniosku, że dowody klinicznie istotnych powikłań są bardzo małe, a powikłania spowodowane mocowaniem śrubowym nasad kręgów w kręgosłupie można znacznie zmniejszyć dzięki wystarczającemu obrazowaniu przedoperacyjnemu i przedoperacyjnemu badaniu nasad kręgów.

Reinhold i in. badali wykonalność i dokładność podosiowego wkręcania śrub w nasady kręgów w 2006 roku na podstawie danych morfometrycznych, mierząc wymiary i osie podosiowych nasad kręgów szyjnych za pomocą TK. Badanie przeprowadzono na sześciu ciałach ludzkich. W chwili śmierci badani mieli średnio 85 lat.

Nasady kręgów dolnych odcinków kręgosłupa (łącznie 60 nasad kręgów) zostały zmierzone za pomocą tomografii komputerowej. Próbkę podzielono na 2 grupy po 3 próbki i 30 nasad kręgów. W każdej grupie badano inny proces zespolenia śrubowego.

Pierwszym zabiegiem były minilaminotomie cząstkowe. Wiercenie przez nasadę kręgu wykonano za pomocą ręcznego urządzenia celowniczego umieszczonego po stronie przyśrodkowej nasady kręgu w kanale kręgowym. Przygotowanie otworu na śrubę monitorowane było przez fluoroskopię boczną. W drugiej badanej grupie do wiercenia otworów użyto znacznie bardziej skomplikowanego urządzenia celowniczego. Składała się ona z ramy z regulowanym ramieniem radiolokacyjnym, na którym znajdowały się instrumenty potrzebne do osadzenia śrub. Ramię zostało wyosiuwane zgodnie z osią nasady kręgu szyjnego, zgodnie z ustaleniami poczynionymi na podstawie poprzednich skanów przedoperacyjnych. Wiercenie monitorowano również za pomocą fluoroskopii bocznej. W obu technikach zastosowano śruby 3,5 mm. Spośród zamocowanych śrub 56 poddano analizie w odniesieniu do przedoperacyjnych obrazów TK.

Dokładność umiejscowienia śrub w nasadach kręgów nie różniła się istotnie pomiędzy tymi dwiema technikami chirurgicznymi. Jednakże w drugiej metodzie chirurgicznej występowała tendencja do ograniczania poważnych błędów w rozmieszczeniu.

Stwierdzono, że C4 i C5 są szczególnie krytycznymi poziomami w kręgosłupie, z których każdy ma trzy błędne umiejscowienia. Autorzy doszli do wniosku, że konieczna jest przedoperacyjna ocena tomografii komputerowej z wielokrotną rekonstrukcją przed wprowadzeniem śrub w kręgosłupie szyjnym.

Neo et al. opublikowali w 2008 roku badanie, w którym badał częstotliwość występowania i leczenie jatrogennego uszkodzenia tętnic kręgowych podczas chirurgicznego

leczenia kręgosłupa szyjnego. Choć rzadko się to zdarza, wiążą się one z poważnymi komplikacjami dla pacjenta. Pojawiły się one szczególnie podczas dekompresji przedniej kręgów szyjnych (częstotliwość występowania od 0,3% do 0,5%) lub tylnego przezstawowego mocowania śruby w stawie szczytowo-obrotowym (metoda mocowania Magerla, częstotliwość występowania od 0% do 8,2%).

Nowoczesne zabiegi, takie jak połączenie śrubowe nasad kręgów szyjnych lub fiksacja masy bocznej kręgu szczytowego, również wiążą się z ryzykiem jatrogenego uszkodzenia tętnic kręgowych. W większości przypadków powikłań tamponada okazała się skuteczna, ale w przypadku, gdy krwawienie nie może być kontrolowane, zaleca się szybkie skonsultowanie się z zespołem ds. zabiegów wewnątrznaczyniowych. Przedoperacyjna, dokładna ocena tętnic kręgowych wydaje się być najlepszym sposobem uniknięcia jatrogenego uszkodzenia tętnic kręgowych i późniejszego uszkodzenia pooperacyjnego.

W badaniu opublikowanym w 2009 r. Liu Y et al wyjaśnili, że stosowanie śrub do nasad kręgów szyjnych w chirurgii tylnego odcinka kręgosłupa szyjnego niesie ze sobą nieodłączne ryzyko chorób układu nerwowo-naczyniowego. Wyniki kliniczne zespalania śrubowego nasad kręgów odcinka szyjnego analizowano retrospektywnie i oceniano skuteczność kliniczną oraz bezpieczeństwo leczenia.

Badaniem objęto 25 chorych z niestabilnością kręgosłupa szyjnego z zastosowaniem laminoplastyki jedno-/dwupunktowej C3/C7, ręcznym przykręceniem śrub do nasady kręgu i zespoleniem kości. Trzech z nich było leczonych z powodu urazów, a 22 z powodu zmian zwyrodnieniowych. Zastosowano klasyfikację JOA (Japońskie Stowarzyszenie Ortopedyczne) i zaobserwowano poprawę. Ponadto oceniano NDI (Neck Disability Index) pod względem stabilności segmentowej, szybkości perforacji kory nasady kręgu i innych parametrów powikłań.

Średni okres obserwacji uczestników wynosił 16,6 miesiąca. W porównaniu z wartościami przedoperacyjnymi po 6 miesiącach nastąpiła poprawa JOA średnio o $4,10 \pm 0,84$ punktu. Po 6 miesiącach i późniejszym okresie obserwacji połączone segmenty utrzymywały się na stabilnym poziomie.

Perforacja kory nasady kręgu wyniosła 8,0% bez zaobserwowanych powikłań nerwowo-naczyniowych. Autor zaleca wykorzystanie przedoperacyjnego obrazowania radiologicznego do celów planowania chirurgicznego. Według Liu Y. et al. połączenie śrubowe nasad kręgów szyjnych zapewnia bezpieczne i zadowalające wyniki w leczeniu niestabilności kręgosłupa szyjnego. Zdaniem autorów metoda ta wybiega w przyszłość.

Postępowanie wyjaśniające:

Do gromadzenia danych wykorzystano skany obrazujące urazy mnogie. Obrazowanie przeprowadzono u pacjentów, którzy doznali wypadku i mieli odpowiednie wskazania w związku z przebiegiem wypadku. Nie wykonano pomiarów patologicznych trzonów kręgowych i nasad kręgow.

Do przeprowadzenia badań udostępniono był tomograf komputerowy firmy Siemens, a dokładniej model Somatom Sensation 64. Wszyscy pacjenci byli skanowani w pozycji leżącej. Zastosowano tomografie spiralne z 120 KV i zmienną grubością warstwy 3 mm mA (dostosowane do potrzeb pacjenta), przy czym rekonstrukcje wykonano z warstwą o grubości 1,5 mm. Przekrój wykonywano zawsze równoległe do trzonu kręgowego. Odpowiednie pomiary wykonano w oknie kości.

Wszystkie pomiary wykonuje badacz. Minimalizuje to błędy wynikające z subiektywnej oceny odległości pomiarowych lub punktów orientacyjnych kości. Długości pomiarowe są anatomicznie znormalizowane, aby uniknąć błędu subiektywnego oznaczania. Oznacza to, że pomiary mogą być sprawdzone w każdej chwili. Po dokonaniu pomiaru wszystkich trzonów kręgowych, są one mierzone po raz drugi przez tego samego badacza w celu sprawdzenia odtwarzalności pomiarów. Nie bierze się pod uwagę trzonów kręgowych lub nasad kręgow, które nie pozwalają na standaryzowane pomiary z powodu zmian patologicznych i braku odpowiednich anatomicznych punktów orientacyjnych.

Zmierzone odległości i kąty:

Wewnętrzna średnica nasad kręgow:

Wewnętrzna średnica nasad kręgow jest mierzona w płaszczyźnie poprzecznej. Do standaryzacji wybierana jest warstwa środkowa, w której średnica jest węższa. Oś nasady kręgu tworzy kąt 90° z odległością pomiarową, tak że obie są do siebie prostopadłe.

Przy pomiarze nie uwzględnia się zagęszczeń (Compacta). O ile to możliwe, zawsze mierzone są obie nasady kręgu.

Średnica zewnętrzna nasady kręgu:

Średnica zewnętrzna oraz średnica wewnętrzna nasady kręgu w płaszczyźnie poprzecznej jest mierzona w tej samej warstwie środkowej, co ta ostatnia. Również w tym przypadku odległość znajduje się pod kątem prostym do osi nasady kręgu, a w pomiarze uwzględnione jest zagęszczenie (Compacta). Również tu mierzone są obie nasady kręgu.

Długość nasad kręgu plus trzonu kręgowego w osi nasady:

Odległość ta jest również mierzona w warstwie poprzecznej. Biegnie ona od najbardziej grzbietowej struktury kostnej nasady kręgu w osi nasad do granicy strony brzusznej trzonu kręgowego, bez uwzględnienia strony brzusznej zagęszczenia. Odległość tę określa się w literaturze jako długość cięciwy (chord length). Zarówno prawa, jak i lewa nasada kręgu są mierzone w tej samej warstwie poprzecznej.

Poprzeczny kąt nachylenia nasady kręgu:

Nasady kręgów mierzy się również w warstwach poprzecznych, w których określono zarówno średnicę wewnętrzną, jak i średnicę zewnętrzną nasady kręgu.

Kąt poprzeczny to kąt pomiędzy odległością biegnącą przez oś nasady kręgu a silnie strzałkową odległością przebiegającą przez lub równoległe do wyrostka kolczystego.

Introduction:

Surgical treatment of unstable fractures of the spine, diseases and deformities has changed considerably over the last decades. For a long time the skeletal extension in the technique reported by Crutchfield presented the only treatment of unstable cervical spine injuries. With this technique the patients were immobilized until healing.

Only after the operative successes in cases of cervical disc disease (Robinson and Smith, Cloward, Dereymaeker and Mulier, Dohn), the operative procedures for the stabilization of the cervical spine enforced slowly. Through biomechanical analyzes and increasing use of implants the instruments have been continuously developed. Nowadays, the cervical pedicle screw placement is the gold standard for the treatment of spinal instability. Through its use, it is possible to reset unstable fractures and tumors through extension and lordosis, to increase the cross section of root and spinal canal through distraction and flexion - as for example in stenosis of the spinal canal and nerve root compression, to eliminate misalignments which have arisen because of degenerative instabilities, and to increase the rigidity or stability of spine sections that are to be fused.

With all the advantages that come with the pedicle screw placement, it also carries some risks, such as injuries of the vertebral arteries and nerves, as well as the spinal cord. This is due to the large individual and intervertebral variabilities, as well as to the special anatomical conditions of the cervical spine: narrow pedicle, large transverse angle of the pedicle, proximity and course of the vertebral artery, short distance between the medial pedicle wall and dural sac.

Objective:

The aim of the work is to elicit the morphometry of the pedicles of the cervical spine and to draw up conclusions for posterior cervical instrumentation based on these data obtained, taking into account the literature on the subject, which was accessible to the author at the time of writing this paper. For this, the morphometric data of all spines which have been detected by CT during a certain period of time are evaluated and processed with regard to the objective of this font.

Problem:

The pedicle screw placement, which serves for the stabilization of the spine, has emerged as a gold standard. Nevertheless, it still has some risks, which are among others in the great individual and intervertebral variability. These make it very difficult for a surgeon to make the correct assumptions to perform a pedicle screw placement safely and without complications. Therefore, the collection of morphometric data serves on the one hand for a better training of the surgeon, but on the other hand also for the development of modern surgical tools such as a locator. Both measures have been proven to reduce errors, such as a pedicle breakout, a violation of the vertebral artery or spinal cord in the frequency of their occurrence.

State of research:

The cervical pedicle screw placement is the gold-standard for the treatment of the instability of the spine. Although it provides a lot of benefits, such as stiffness superior to the one experienced in lateral mass screw placement, it comes along with serious possible complications such as injuries of the vertebral arteries and nerves as well as the spinal cord. Nevertheless there is plenty of evidence, that preoperative management, such as: radiologic evaluation of the patient's vertebra or the localization of certain landmarks for the safe placement of pedicle screws, can reduce this risk dramatically.

Abumi et al. described in a study from 2000, the complications of the pedicle screw fixation in the restoration surgery of the cervical spine. Aim of this work was to evaluate the risks which are associated with the pedicle screw fixation and to estimate the importance of preoperative planning and surgical techniques that are used to reduce the risks. For this purpose, 180 patients who had undergone a reconstructive procedure in the cervical spine, through the use of pedicle screw fixation, in order to experience the complications that may be associated with this method. The diseases of the cervical spine ranged from spinal injuries in 70 cases and non-traumatic lesions in 110 cases. In total, 712 screws were implanted into the cervical pedicle and there were 669 screws implanted by X-ray. In these studies it showed that one patient had an injury of the vertebral artery, the bleeding was quenched with bone wax. Using CT it showed that 45 screws had broken through the pedicle and 2 of 45 screws caused a root-neuritis (radiculopathy). In addition to these neurovascular complications, which were caused by the direct action of the screws, one patient had a radiculopathy caused by an iatrogenic stenosis, which was in turn due to a too strong reduction of the translational deformity. The authors concluded that the evidence of clinically significant complications were very low and that complications,

which occur through the pedicle screw fixation in the cervical spine, could be significantly reduced by sufficient preoperative image acquisition and analysis of the pedicle before the procedure.

Reinhold et al. investigated in 2006 the feasibility and accuracy of the subaxial cervical pedicle screw placement based on morphometric informations. Here the dimensions and axes of the subaxial cervical pedicles were measured by CT. The study was performed at six human cadavers. These were on average 85 years old at the time of their deaths. The pedicles of the lower cervical spine (60 pedicles) were measured by CT. The samples were divided into 2 groups of 3 samples or 30 pedicles. At each group a different screw placement was tested. As the first method paraarticular minilaminotomies were used. The hole through the pedicle was performed with a manual target device which has been mounted on the medial side of the pedicle in the spinal canal. The preparation of the screw hole was monitored by lateral fluoroscopy. In the second examined group a considerably more complex target device was used to drill the holes. It consisted of a frame with an adjustable, radiolucent arm which was wearing the instruments, which were necessary for the placement of the screws. The arm was aligned according to the cervical pedicle axis, as it had been found in previous preoperative scans. The drilling was also monitored with lateral fluoroscopy. In both techniques 3,5 mm screws were used. Of the implanted screws 56 could be evaluated with respect to the pre-operative CT images. The accuracy of the pedicle screw placement pointed no great differences between the two surgical techniques. However there was a tendency that with the second surgical method severe misplacements occurred less frequently. C4 and C5 were found to be particularly critical vertebral levels, in each of which three misplacements occurred. The authors came to the conclusion that a preoperative CT evaluation with multi-level reconstructions prior to the implementation of screws in the cervical spine is necessary.

Neo et al. published a study in 2008 in which he examined the incidence and treatment of iatrogenic injury of the vertebral arteries, which occurred during a surgical treatment of the cervical spine. Although these are rare, they are associated with significant complications for the patient. These occurred especially in an anterior cervical decompression (incidence 0.3% to 0.5%) or in a posterior atlantoaxial transarticular screw fixation (Magerl fixation, incidence 0% to 8.2%). Even modern methods, such as the screw fixation of cervical pedicles or a fixation of the

lateral masses of the atlas present a risk for iatrogenic injury of the vertebral arteries. A tamponade was found to be effective in most cases when complications occurred. However, a prompt consultation of an endovascular team is recommended if the bleeding cannot be controlled. Preoperative, careful evaluation of the vertebral arteries seems to be the best way to avoid iatrogenic injury to the vertebral arteries and to avoid postoperative secondary damage.

In a study published in 2009, Liu Y et al explained that the attachment of the cervical pedicle screws in the posterior cervical spine surgery poses an inherent risk of neurovascular diseases. The clinical results of those treated with cervical pedicle screws were analyzed retrospectively and the clinical efficacy and safety of this treatment were evaluated. 25 patients with instability of the cervical spine with a C3/C7 single or double laminoplasty, a manual cervical pedicle screw placement and bone transplant fusion were examined. Three of the patients were treated due to a trauma, 22 patients because of a degenerative process. The JOA (Japanese Orthopedic Association) score was applied and its improvement rate observed. In addition, the NDI (Neck Disability Index), the segmental stability, the pedicle cortex perforation rate and other complication parameters were evaluated. The average follow-up was 16.6 months. Compared to preoperative values, the JOA improved by an average of 4.10 ± 0.84 points 6 months after surgery. After 6 months and adjoining end-follow-up the fused segments were stable. The pedicle cortex perforation rate was 8.0% with no observed neurovascular complications. The author advises to use preoperative radiological imaging for surgical planning. Cervical pedicle screw placement provides after Liu Y. et al. safe and satisfactory results in the treatment of instability of the cervical spine. According to the authors, this method is forward-looking.

Procedure of the study:

For data collection, use is made of poly- trauma scans. These were carried out on patients of accidents, which showed appropriate indications due to the circumstances of their accident. Pathological vertebral bodies and pedicles were not measured.

To carry out the investigations a CT scanner from Siemens with the exact designation Somatom Sensation 64 was available. All patients were scanned in the supine position. Spiral CTs with 120 kV and variable mAs (patient-specific) with 3 mm slice thickness were run, whereas the reconstructions were made with a slice thickness of 1.5 mm. The sections were always placed parallel to the vertebral body. The adequate measurements were performed in the bone window.

One examiner performs all measurements. Thus errors can be minimized, which are based on different subjective assessments of measuring distances or bony landmarks. The measured distances are anatomically standardized to avoid the error of the subjective determination. Therefore the measurements can be controlled at any time. After all vertebral bodies were once measured, they are measured a second time by the same examiner to check the reproducibility of the measurements. Vertebral bodies or pedicles, which do not permit standardized measurements due to pathological changes and lack of corresponding anatomical landmarks, are not considered.

Measured distances and angles:

Internal pedicle diameter:

The internal pedicle diameter is measured in the transverse plane. For standardization a central layer is chosen in which the diameter is narrowest. The pedicle axis forms a 90° angle with the measured distance, so that both are perpendicular to one another. In the measurement the compacta is not included. As far as possible both pedicles are always measured.

External pedicle diameter:

The external pedicle diameter is also measured just like the internal pedicle diameter in the transverse plane in the same middle layer as the latter. Again, the measured distance is at right angle to the pedicle axis and the compacta is included in the measurement. Likewise, both pedicles are measured.

Pedicle length plus vertebral body in axis of the pedicle:

This distance is measured in the transverse slice. It runs from the dorsal most bony structure of the pedicle in the axis of the pedicle to the anterior vertebral body margin without the ventral compacta. This distance is termed in the literature as chord length. There are measured both the right and the left pedicle in the same transverse slice.

Transverse pedicle angle:

The pedicles are also measured in the transverse slices in which both the internal pedicle diameter and the external pedicle diameter were determined. The transverse angle is the angle between the line through the pedicle axis and a strictly sagittal line through or parallel to the spinous process.