

C. Hasler¹ · W. Dick²

¹Kinderorthopädische Universitätsklinik Basel, Schweiz

²Orthopädische Universitätsklinik, Felix Platter-Spital, Schweiz

Spondylolyse und Spondylolisthesis im Wachstumsalter

Zusammenfassung

Die Problematik der Spondylolyse und Spondylolisthese im Wachstumsalter zeigt typische alters- und aktivitätsabhängige Charakteristika: die Interartikularportion bei Neugeborenen ist immer intakt. Spondylolysen bilden sich nur bei aufrecht Gehfähigen und meist schon im Kindesalter aus. Entsprechend der mechanischen Genese ereignen sich Spondylolysen im Sinne von Ermüdungsbrüchen häufiger bei repetitiven Hyperlordosierungen und Rotationen der Lumbalwirbelsäule, die in gewissen Sportarten wie Kunstturnen, rhythmische Sportgymnastik, Speerwerfen usw. gefordert und bewertet werden. Obwohl die Spondylolyse zu den häufigsten Diagnosen bei lumbalen Rückenschmerzen während des pubertären Wachstumsschubes gehört, sind dennoch nur wenige Träger einer Spondylolyse je symptomatisch. Zudem lässt sich der Schmerz meist durch Aktivitätseinschränkung, rumpfstabilisierendes Training, eventuell ergänzt durch vorübergehende Ruhigstellung in einem Korsett beherrschen. Bei Schmerzpersistenz und noch intaktem Discus intervertebralis im Gleitsegment ist eine Technik zur direkten knöchernen Überbrückung der Spondylolysezone („direct repair“) einer interkorporellen Spondylodese vorzuziehen. Geringgradige Olisthesen (Meyerding I, II) bedürfen wegen des vorhandenen Progressionsrisikos bei noch nicht abgeschlossenem Wachstums der regelmäßigen radiologischen Verlaufskontrollen. Ein Gleitgrad von über 50% bei einer Entdeckung vor dem Wachstumsabschluss stellt wegen des hohen Progredienzrisikos eine Indikation zur operativen Fusion dar. Höhergradiges Gleiten (Meyerding III, IV, V) und Kyphosierung des Gleitwirbels geht mit Veränderungen der Wirbelsäulenstatik und

damit auch kosmetisch auffallender und funktionell ungünstiger Beckensteilstellung, relativer Rumpfkürzung und kompensatorisch vermehrter LWS-Lordose einher, weshalb in diesen Fällen eine Reposition und Stabilisation des Gleitwirbels einer Fusion in situ vorzuziehen ist.

Schlüsselwörter

Spondylolyse · Spondylolisthese · Sagittales Profil · Pars interarticularis · Wachstum

Definitionen

“Spondylolyse“ wird eine Unterbrechung der Pars interarticularis (Isthmus) des Wirbelbogens genannt.

“Spondylolisthesis“ ist die Bezeichnung für das Gleiten eines Wirbelkörpers gegenüber dem darunter gelegenen.

Die Spondylolysen und Spondylolisthesen erlangen meist erstmals in der Pubertät Bedeutung als eine der häufigsten Diagnosen bei lumbalen Rückenschmerzen. Die hohe relative Häufigkeit in der Normalpopulation und die gutartige Prognose bei Schmerzzuständen bedingen eine optimale Kommunikation mit Patient und Eltern, um eine frühe Pathologisierung des Befundes und eine Kategorisierung als „Rückenpatient“ zu vermeiden. Die Kenntnis der Pathogenese mit Dysbalance zwischen biomechanischem Stress und ossärer Resistenz im Bereich der Interartikularportion, sowie das Wissen um den natürlichen Verlauf bilden die Grundlagen

für die kompetente Beratung und Therapie insbesondere auch bei aktiven Sportlern mit belastungsabhängigen lumbalen Rückenschmerzen und Spondylolysen.

Epidemiologie

Die meisten Spondylolysen werden als Tribut an das aufrechte Gehen im Kleinkindesalter und frühen Schulalter, weniger in der Adoleszenz, erworben, was sich in einer Rate von 4,4% mit 6 Jahren respektive von 6%–7% bei Erwachsenen niederschlägt [6]. Vom 20.–80. Lebensjahr bleibt die Inzidenz dann stabil. Diese Angaben gelten nur für die weiße Bevölkerung, bei anderen ethnischen Gruppen wurden ganz andere Werte gefunden, so zum Beispiel die höchsten Raten bei den Inuit mit einer Inzidenz von bis zu 50% bei Skelettuntersuchungen [30]. Männliche Individuen sind generell bis zu 3-mal häufiger betroffen und zeigen öfters ein zusätzliches Gleiten, wogegen bei den weiblichen Patienten im Durchschnitt höhere Gleitgrade gefunden werden. Im Alter von 6 Jahren geht eine Lyse in 10% mit einem Gleiten einher, bei den Erwachsenen liegt in ca. 30% ein Gleiten vor [6].

Anatomie

Die Spondylolyse als uni- oder bilateraler Defekt in der Pars interarticularis (Isthmus) kann sich morphologisch

Dr. Carol-C. Hasler
Orthopädische Abteilung, Universitäts-
Kinderspital beider Basel, Römergasse 8,
4005 Basel/Schweiz,
E-Mail: cjhasler@swissonline.ch

C. Hasler · W. Dick

Spondylolysis and spondylolisthesis during growth

Abstract

Spondylolysis and Spondylolisthesis present with typical age and activity-related issues: in newborns the pars interarticularis is always intact. Only bipedal ambulators develop spondylolysis, mostly during early childhood. Corresponding to the mechanical etiology, the incidence of spondylolysis is higher in athletes who repeatedly have to hyperextend and rotate their lumbar spine for example gymnasts, javelin throwers etc. Spondylolysis is one of the most frequent diagnosis among adolescents with lumbar back pain. However, most of the people with an interrupted Pars interarticularis (about 6% of the population) never become symptomatic or if they do, they respond very well to conservative treatment (adaptation of physical activity, active physical therapy and bracing). If pain persists in combination with an intact intervertebral disc of the slipped segment, we recommend a direct repair of the Pars interarticularis instead of an intersegmental fusion. Patients with low grade Spondylolisthesis (Meyerding I, II) require repeated radiological follow-up during growth because of the inherent risk of slip progression. If a slip of more than 50% is detected before the end of growth, operative treatment is indicated. High grade olisthesis (Meyerding III, IV) leads to anterior shift of the whole trunk, kyphosis of the slipped vertebra with subsequent compensatory lumbar hyperlordosis and flattening of the thoracic spine. Pelvic flexion is clinically evident. Reduction of the slipped and kyphotic vertebra with correction of the spinal, sacral and pelvic profile is recommended and preferable to simple fusion in situ.

Keywords

Spondylolysis · Spondylolisthesis · Sagittal profile · Pars interarticularis · Growth

sehr unterschiedlich präsentieren: von der einfachen Spaltbildung bis zur echten Pseudarthrose mit deutlicher Knochenschlücke sind Übergangsformen möglich. Selbst Elongationen der Pars sind möglich, wenn nach stattgehabter Fraktur die Heilungszone in der Verknöcherungsphase durch die Translation des vorderen Wirbelanteils eine Art Kallotaxis erfährt. Kombinationen mit kontralateralen Pedikelfrakturen bei Sportlern sind beschrieben. Zu 90% befindet sich die Spondylolyse im 5. Lendenwirbel, seltener auf den Niveaus L4 oder gar L3, wobei den letzteren häufiger ein Trauma zugrunde liegt und sie vermehrt mit Schmerzen assoziiert sind.

Der Defekt ist meist mit fibrocartilaginösem Gewebe gefüllt, welches sich in der MRT in der T1-Gewichtung signalarm und in der T2-Gewichtung im Sinne einer fibrocartilaginären Pseudarthrose mit intermediärer Signalintensität darstellt. Manchmal werden aber auch ligamentäre Strukturen gefunden mit histologisch und immunhistochemisch nachgewiesenen Knochendebris als Ausdruck einer abgelaufenen Fraktur [5]. Histologische Untersuchungen und Methylenblauinjektionen in die angrenzenden Facettengelenke haben eine synoviale Pseudarthrose mit Gelenkkommunikation nachgewiesen [29]. Nervenendigungen und Neuropeptide in diesem pseudarthrotischen Gewebe lassen vermuten, dass eine Quelle des meist geäußerten tieflumbalen Schmerzes direkt im Defekt selber liegt [28]. Alternativ kommen der Diskus und die Nervenwurzeln als Ort der Schmerzentscheidung in Frage.

Ätiologie und Pathogenese

Die Frage, ob einer Spondylolyse eine Ossifikationsanomalie respektive Anlageanomalie im Bereich der Pars, nur eine lokale Schwäche, einfach nur chronisch repetitiver mechanischer Stress oder ein akutes Trauma bei einem sonst normalen Isthmus zugrunde liegt, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen. Die biomechanische Gesamtsituation der unteren lumbalen Wirbelsäule und des lumbosakralen Überganges als Ergebnis von aufrechtem Gang, Haltung und bestimmten Sportarten mit repetitiven Mikrotraumata ist sicher der entscheidende Faktor:

- ▶ Aufrechter Gang: bei keinem Säugling wurde je eine Lyse entdeckt, ebenso wenig bei Patienten, die wegen einer neurologischen Grunderkrankung nie gehfähig waren und auch nicht bei 4-beinigen Säugetieren.
- ▶ Haltung: eine Hyperlordose der Lumbalwirbelsäule z. B. bei thorakalem M. Scheuermann oder bei gehfähigen Diplegikern mit Hüftbeugekontrakturen prädisponiert zur Ausbildung einer Spondylolyse [9].
- ▶ Experimentell ist die Spondylolyse durch entsprechenden lokalen Stress reproduzierbar [13].
- ▶ Wiederholte Mikrotraumata, v. a. bei Sportarten mit repetitiver Hyperlordosierung der Lendenwirbelsäule, resultieren eindeutig in einer zum Teil mehrfach erhöhten Spondylolyserate im Vergleich zur Gesamtpopulation.
- ▶ Eine genetische Disposition im Sinne einer erhöhten Vulnerabilität der Pars interarticularis oder eines vergrößerten Processus articularis inferior L5 spielt ebenso eine Rolle [6, 35].
- ▶ Dysplasien des Wirbelbogens, sei es kongenital respektive als Folge von Wachstumsstörungen, werden bei Patienten mit Spondylolyse gehäuft gefunden, so z. B. in Form einer Spina bifida occulta.

Symptomatik und klinische Befunde

Spondylolysen werden vornehmlich bei Adoleszenten erstmals symptomatisch, meist mit Beginn des pubertären Wachstumsschubs. Typischerweise treten lumbale Rückenschmerzen unter körperlicher Belastung, bei längerem Stehen und Sitzen auf als Ausdruck des mechanischen Stresses im Bereich der Pars interarticularis bei aufrechter Haltung. Seltener werden Gesäß- und ischi- algiforme Schmerzen geäußert. Klinisch findet sich ein Druck- und Rüttelschmerz über dem Dornfortsatz L5, sowie ein Pseudolasègue infolge der schmerzhaften Verspannung der ischio-kruralen Muskulatur. Typischer Weise kann durch forcierte Reklination, vor allem bei ipsilateralem Einbeinstand und Zurücklehnen durch den damit ausgelösten Druck des Processus articularis inferior L4 auf die Pars interarticularis L5 ein entsprechendes Missempfinden provoziert werden. Der Gang imponiert

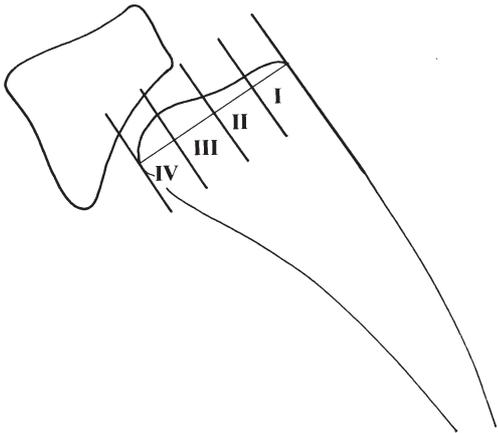


Abb. 1 ◀ **Schweregrad der Spondylolisthese, Einteilung nach Meyerding [18]: Das Sakrumplateau wird in Viertel unterteilt. Die Position der Wirbelunterkante L5 bestimmt den Gleitgrad, im Beispiel Meyerding Grad III**

pseudospastisch als Ausdruck der Hüftlendenstrecksteife, wogegen das sagittale Wirbelsäulenprofil unauffällig erscheint.

Auch im Falle einer begleitenden geringgradigen Spondylolisthese (Meyerding I, II; Einteilung s. Abb. 1) bleiben Beschwerden und Befunde identisch. Höhergradiges Gleiten mit lumbosakraler Kyphosierung und Rumpfschwerpunktverlagerung hingegen führt zu einer kosmetisch und funktionell auffälligen Störung des sagittalen Profils. Am augenfälligsten sind dabei die Haltungsmechanismen distal und proximal des Gleitwirbels, welche versuchen, die Rumpfbalance wiederherzustellen: Beckenaufrichtung (Retroversion) mit steilem Sakrum, Hyperlordose der Lendenwirbelsäule eventuell bis zur Brustwirbelsäule (Abb. 2). Sekundäre Skoliosen als Folge eines asymmetrischen Gleitens sind häufig. Relative Hüftbeugung als Folge der Beckenaufrichtung, sowie konsekutive Kniebeugung lassen den Patienten wie einen Seiltänzer im Schiebegang gehen. Eine Spondyloptose (Gleiten über 100% mit Kontaktverlust zwischen L5 und S1) lässt den Rumpf verkürzt erscheinen.

Gleitgrad und Symptomatik korrelieren wenig, hingegen führt die Kyphosierung bei hohem Gleitgrad zu entsprechenden Kompensationsmechanismen und Beschwerden. Meist bestehen keine neurologischen Auffälligkeiten: Parästhesien, Paresen, eine Cauda-equina-Symptomatik und Inkontinenz kommen nur ausnahmsweise vor, wahrscheinlich weil der langsame Gleitprozess entsprechende Adaptationen zulässt.

Ergänzend zur Anamnese und der klinischen Untersuchung wenden einige Autoren diagnostische Infiltrationen mit Lokalanästhetika an, v. a. um das Resultat eines allfälligen operativen Ein-

griffs präziser voraussagen zu können. Der prognostische Wert ist jedoch zweifelhaft, da auch erfolgreiche Infiltrationen eine Schmerzpersistenz nach operativer Stabilisierung nicht ausschließen [4].

Differenzialdiagnose von lumbalen Rückenschmerzen im Wachstumsalter

Bei einem großen Teil von Kindern und Jugendlichen mit Rückenschmerzen kann keine exakte Diagnose gestellt werden, oder die gestellten Diagnosen stehen nicht mit den geäußerten Beschwerden im Zusammenhang. Nach den Myogelosen gehört die Spondylolyse mit oder ohne Gleiten zusammen mit dem lumbalen M. Scheuermann zu den häu-

figsten Gründen für nichttraumatische lumbale Rückenschmerzen im Wachstumsalter (Tabelle 1). Im Erwachsenenalter stellt eine Olisthese von mehr als 25% oder die seltenere Lyse auf Höhe L4 einen Risikofaktor für lumbale Rückenschmerzen dar. In Anbetracht der hohen Inzidenz von 6% Lysen in der Normalpopulation und der Tatsache, dass sie meist ohne Symptome einhergehen, sollen auch bei nachgewiesener Lyse unbedingt andere Ursachen differenzialdiagnostisch in Betracht gezogen werden.

Bereits anamnestisch lässt sich meist anhand der Art und Stärke der Schmerzen eine erste Eingrenzung vornehmen. Bei weiterer Unklarheit führen Bildgebung und/oder Entzündungslabor weiter, wobei diese bei starken Schmerzen und/oder einer Anamnese-dauer von mehr als 4 Wochen sofort vorgenommen werden sollten.

Bildgebung

Röntgen

Die konventionell radiologische Abklärung bildet immer noch die Basis der Primärdiagnostik von Spondylolysen, wie auch der Verlaufsbeobachtung des Gleitens. Die Zentrierung des Röntgenstrahls auf den lumbosakralen Übergang respektive der 30° nach oben gerichtete Strahlengänge bei der anteropo-

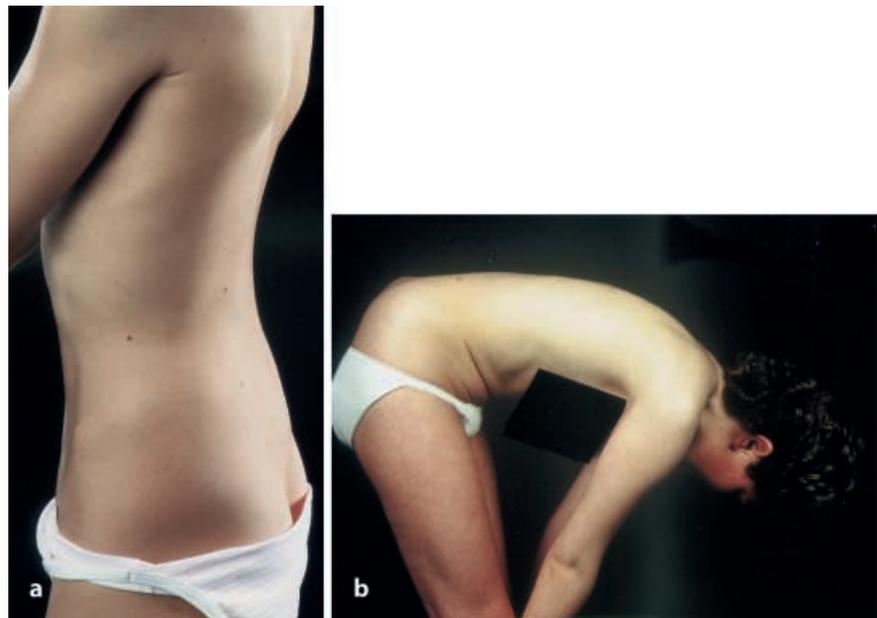


Abb. 2a, b ▲ **13-jähriges Mädchen. a Spondylolisthese Grad IV mit lumbosakraler Kyphosierung: kompensatorische Beckenaufrichtung mit steilem Sakrum und Lordosierung der Brustwirbelsäule. b Verkürzung der Ischiokruralmuskulatur mit konsekutiver Hüft-Lenden-Stei-fe**

Tabelle 1

Differenzialdiagnose lumbaler Rückenschmerzen im Wachstumsalter nach Häufigkeit

Diagnose	Schmerzanamnese	Spezifische klinische Befunde	Weiterführende Untersuchung
Myogelose	Leicht bis mäßig Akut ohne Trauma	Lokale Druckdolenz, Muskelverhärtung	Röntgen erst nach 4 Wochen Dauer
Spondylolyse	Leicht bis mäßig Chronisch, kein Trauma Bei längerem Stehen, Sitzen, Sport	Lokale Druckdolenz, Rüttelschmerz Reklinationsschmerz	Röntgen lumbosakr. Übergang a.p., lateral Evtl. Szintigraphie (SPECT), MRT
Spondylolisthesis >50%	Gesäß, Ischiokruralmuskulatur, evtl. ischialgiform	Rumpfverkürzung, steiles Sakrum Hoher Fingerbodenabstand Verminderte Hüftflexion	Röntgen lumbosakraler Übergang a.-p., lateral
Lumbaler Scheuermann (Kompressions)Frakturen	Stark Aktivitätsabhängig, evtl. auch nachts	Lumbale Kyphosierung Flachrücken	Röntgen LWS a.p., lateral
Schwere lumbale Skoliose	Leicht bis mäßig	Wirbelsäule aus dem Lot	
Tumoren (Osteoblastom, aneurysmatische Knochenzyste, Langerhanszell-Histiozytose)	Starke Nachtschmerzen (Osteoblastom)		Röntgen. Szintigraphie, wenn positiv MRT
Diskushernie	Ischialgie	Neurologische Befunde pathologisch	MRT
Spondylodiszitis	Stark Nachts stärker	Meist kein Fieber	Röntgen initial meist unauffällig Labor (CRP, Leukozyten, Blutsenkungsgeschwindigkeit) (Leukozyten)Szintigraphie, wenn positiv MRT

sterioren Aufnahme erreicht eine höhere Sensitivität als die Standardübersichtsaufnahmen der lumbalen Wirbelsäule. Die Aufnahmen müssen am stehenden Patienten durchgeführt werden, um das Gleitsegment der Schwerkraft auszusetzen und damit den maximalen Gleitgrad aufzudecken. Nur rund ein Drittel aller Interartikularportionen ist innerhalb von 15°–45° zur schrägen Röntgenprojektion ausgerichtet, was den fraglichen Wert von zusätzlichen Schrägaufnahmen erklärt [25]. Da zudem die Gonadendosis im Vergleich zur Basisabklärung in den beiden Standardebenen verdoppelt wird, sollten zusätzliche Schrägaufnahmen unterlassen werden (Abb. 3).

Bei Verlaufsbeobachtungen von Olisthesen genügt gar eine laterale Aufnahme in ca. 6- bis 12-monatlichem Abstand. Als Folge des Gleitprozesses sind am 5. Lendenwirbel und am sakralen Plateau meist Zeichen der Wachstumsstörungen ersichtlich: die Rückverlagerung des Nucleus pulposus führt über eine Druckerhöhung im hinteren Wir-

belanteil respektive am ventralen Sakralplateau zu einer hemmenden Wachstumsstörung. Damit ergeben sich als sekundäre Veränderungen eine Keilform des Gleitwirbel, sowie eine S-Form des Intervertebralraumes L5/S1 und Kuppelform des Sakralplateaus (Abb. 4).

Technetium^{99m}-Szintigraphie

Die Technetium^{99m}-Szintigraphie ist sensitiver als konventionelle Röntgenaufnahmen. Ihr Wert liegt weniger in der primären Diagnostik, sondern mehr in der Unterscheidung zwischen etablierten Pseudarthrosen und Defekten in Heilung, welche unter Immobilisierung als Ergänzung zu den übrigen konservativen Primärmaßnahmen konsolidieren können [34]. Eine szintigraphische Abklärung kann auch von juristischer Tragweite sein, wenn es gilt, eine traumabedingte Lyse von einem Zufallsbefund abzugrenzen. Untersuchungen zur Korrelation zwischen Schmerzanamnese und Szintigraphiebefund bei Patienten mit radiologisch verifizierter Spon-

dylolyse haben gezeigt, dass bei akuten Schmerzen und/oder einem Trauma in der Anamnese meist eine Mehranreicherung als Ausdruck der Umbau- und Reparatursprozesse zu erkennen ist. Dementsprechend zeigen Szintigraphien dem klinischen Heilungsverlauf folgend ebenfalls abnehmende Aktivitäten [16]. Unterschiedliche Kombinationen von Röntgen- und Szintigraphiebefunden lassen die in Tabelle 2 dargestellten Schlüsse zu.

SPECT („single-photon emission computed tomography“)

Die SPECT eliminiert die Übereinanderprojektion der planaren Szintigraphie, ist sensitiver und spezifischer als diese und weist zudem einen besseren Kontrast auf [17]. Die Aktivität korreliert mit den Symptomen [1]. Die Befunde ändern sich je nach Zustand der Lyse und der Olisthesis: „ruhige“ Pseudarthrose oder „aktive“ Fraktur, Olisthesis mit beginnender Diskopathie und Mikrofrakturen an den Endplatten, Remodelling-



Abb.3 ◀ **15-jährig, männlich:**
Von re. nach li.: Spondylolyse L5 mit Spondylolisthese Grad I nach Meyerding. Keine zusätzliche Information durch die Schrägaufnahmen mit typischer „Hündchenfigur mit Halsband“. Konsolidation 6 Monate nach Direktverschraubung mit Morscher-Hakenschraube

prozesse oder beginnende degenerative Veränderungen ändern das Bild. Präoperativ erlauben szintigraphische Untersuchungen möglicherweise auch eine gewisse prognostische Aussage: In einer retrospektiven Untersuchung hatten Patienten, welche von einer operativen Sanierung profitierten, eine präoperativ positive SPECT, während bei denen ohne Anreicherung die Schmerzen persistierten [24].

Computertomographie

Die Computertomographie ist sensitiver als die konventionelle Röntgenabklärung und spezifischer als die szintigraphischen Untersuchungen. Nachteil ist die Strahlenbelastung. Im axialen Computertomogramm kann es bisweilen schwierig sein, eine Spondylolyse zu diagnostizieren oder auszuschließen. Insbesondere die Abgrenzung gegenüber den direkt benachbarten und ebenfalls vertikal ausgerichteten Facettengelenken kann schwierig sein.

Die Frage nach einer Spondylolyse kann jedoch relativ einfach und rasch beantwortet werden, wenn die Schichten spezifisch auf die Kontinuität des kortikalen Rings, bestehend aus Wirbelkörperhinterwand, Pedikel- und Laminainnenseite, sowie vorderem Teil des Processus spinosus, durchgesehen werden: ist dieser Ring auf keiner Höhe intakt, darf eine Spondylolyse diagnostiziert werden („incomplete ring sign“), wenn ein Status nach Laminektomie oder eine Spina bifida occulta ausgeschlossen sind ([15]; Abb. 5). Dies gelingt einfach anhand der Anamnese im Falle der Laminektomie respektive der posterioren Lokalisation des Unterbruchs bei einer Spina bifida.

Magnetresonanztomographie (MRT)

Es gibt keine optimale Ebene für die MRT-Evaluation der Pars interarticularis, da diese sowohl gegenüber der Sagittal- wie auch der Koronar- und Frontalebene schräg ausgerichtet ist. Am geeignetsten ist jedoch die Sagittalebene, weil sie eine Beurteilung der Foramina und des Durchmesser des Spinalkanals in der Medianebene zulässt, welcher als indirektes Zeichen einer Spondylolyse oder auch nur Elongation der Pars vergrößert sein kann [14]. Die T1-Gewichtung ist sensitiver als die T2-Gewichtung. Eine verminderte Signalintensität im Bereich der Pars kann aber nicht automatisch mit einem Defekt gleichgesetzt werden, da jede Art der Knochenmarkverdrängung in diesem Bereich, zum Beispiel durch Sklerosierung, das Signal vermindert. Eine Sklerose der Pars ist der häufigste Grund für eine falsch-positive Diagnose.

Der Vorteil der MRT liegt neben der fehlenden Strahlenbelastung vor allem auch in der möglichen Beurteilung von

fraglichen Foraminalstenosen, sowie des Zustandes des Diskus im Gleitsegment. Obwohl die klinische Relevanz von Diskusdegenerationen im MRT von Kindern und Jugendlichen noch unklar ist, stellt eine Diskuspathologie im Gleitsegment ein Argument gegen eine Direktreparatur der Spondylolyse dar. Das MRT findet damit vor allem bei Patienten mit Wurzelsymptomatik und bei der Wahl des optimalen chirurgischen Vorgehens seine Berechtigung.

Sonographie

Mit der Sonographie kann das Ausmaß des Wirbelgleitens strahlenfrei mit einer Genauigkeit von 0–3 mm im Vergleich zum seitlichen Röntgenbild wiedergegeben werden [32]. Diese Art der Bestimmung ist vor allem zur Verlaufsbeobachtung und zur Vermeidung häufiger Bestrahlung im Beckenbereich wertvoll, hat jedoch im klinischen Alltag noch keine weite Verbreitung gefunden.

Tabelle 2

Röntgen: keine Lyse erkennbar;
 Szintigraphie ohne Anreicherung

Andere Schmerzursache als Spondylolyse wahrscheinlich

Röntgen: keine Lyse erkennbar;
 Szintigraphie mit Anreicherung

Verdacht auf eine Stressfraktur. Angesichts der hohen Sensitivität und niederen Spezifität der Szintigraphie muss die Diagnose „Spondylolyse“ mit Vorsicht gestellt werden. Sportpause und Trainingsumstellung ratsam

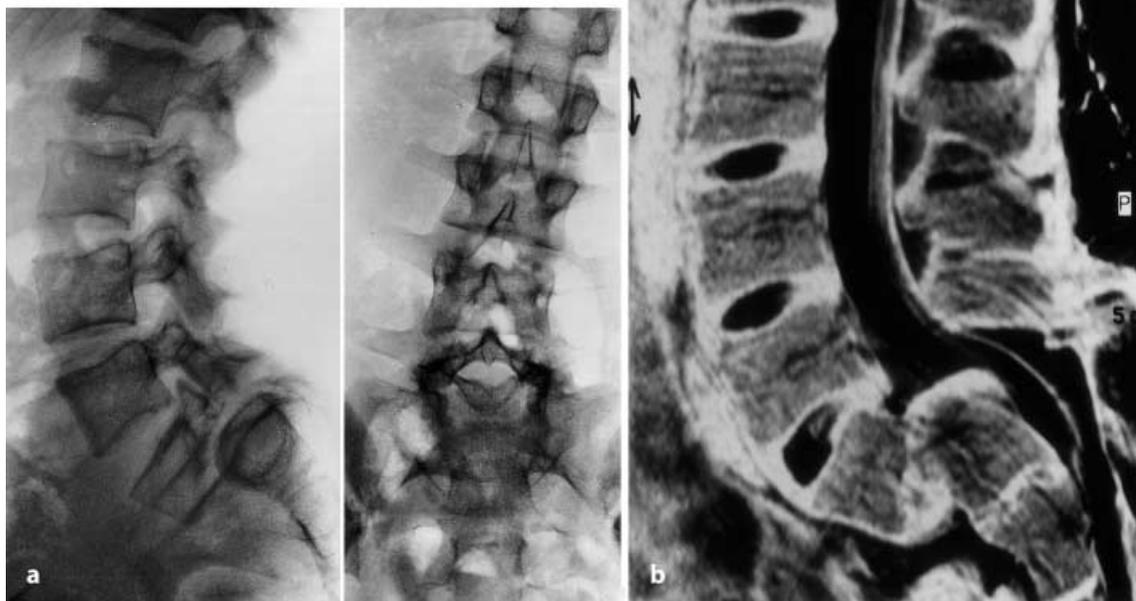
Röntgen: Lyse erkennbar;
 Szintigraphie mit Anreicherung

Stressfraktur in Heilung. Eine vorübergehende Ruhigstellung im Korsett sollte diskutiert werden

Röntgen: Lyse erkennbar;
 Szintigraphie ohne Mehranreicherung

Etablierte Pseudarthrose, welche unter Ruhigstellung im Korsett nicht ausheilen wird

Abb. 4a, b ► 13-jährig, weiblich. a Spondylolisthesis Grad IV mit Wachstumsstörung im hinteren Wirbelanteil mit umgekehrter Keilwirbelbildung und domförmigem Sakrumplateau. In der a. p.-Aufnahme ergibt sich aufgrund der lumbosakralen Kyphosierung eine axiale Sicht auf L5. b In der Magnetresonanztomographie Nucleus pulposus ohne Signalintensität als Zeichen der Diskusdegeneration



Spontanverlauf

Die Hauptsorge der Patienten und ihrer Eltern gilt der Chronifizierung von Schmerzzuständen und der Zunahme des Wirbelgleitens. Das Wirbelgleiten ist ein langsamer Prozess und nach Wachstumsabschluss seltener. Bei der Erstkonsultation im Wachstumsalter weist der Großteil der Patienten bereits eine, meist allerdings geringgradige Olisthese auf: rund ein Fünftel zeigt gar kein Gleiten, die Hälfte einen Gleitgrad I nach Meyerding, der Rest verteilt sich auf die Grade II–IV [26]. Bei Erstkonsultation fand Frederickson 1984 bei 500 Schulkindern nur in 10% der Spondylolysen eine Begleitolisthese, mit 20 Jahren war der Anteil auf 28% gestiegen, wobei niemand symptomatisch war [6]. Ein erhöhtes Progressionsrisiko besteht, wenn schon vor dem pubertären Wachstumsschub ein Gleiten von mehr als 20% stattgefunden hat. Beträgt der Gleitgrad gar schon 50% bei der Erstentdeckung vor dem Wachstumsabschluss, so ist das Progressionsrisiko derart, dass eine operative Fusion indiziert ist. Nach Wachstumsabschluss ist die Zunahme äußerst

seltener und rechtfertigt weitere regelmäßige radiologische Verlaufskontrollen nicht mehr.

Je früher die Spondylolyse entstanden ist, desto eher liegt auch eine Spina bifida occulta vor, welche ihrerseits als Resultat der Instabilität und nicht als Ursache der Lyse anzusehen ist. Die Bogenschlussstörung trägt als weiterer Instabilitätsfaktor zu einem erhöhten Gleitrisiko bei. Wenn die Lyse hingegen erst beim Adoleszenten oder später entsteht, zum Beispiel beim Leistungssportler, fehlt meist eine Bogenschlussstörung. Das Progressionsrisiko korreliert zudem mit der Art der Entstehung: Akut traumatische Lysen sind instabiler und weisen ein höheres Progressionsrisiko auf [12]. Ein großer Processus transversus scheint stabilisierend zu wirken, möglicherweise weil die iliolumbalen Ligamente stärker ausgebildet sind [22]. Wie bei der alleinigen Spondylolyse weisen Patienten mit geringem Gleiten meist keine Symptome auf, oder allfällige Schmerzen sind sehr gut einer konservativen Therapie zugänglich. Als Risikofaktoren für Schmerzen gelten folgende Zustände [26]:

- Grad der Olisthesis >10 mm bzw. 25%,
- verminderter lumbaler Index (<75%),
- Spondylolyse L4,
- vermehrte lumbale Lordose,
- früher Symptombeginn.

Im Langzeitverlauf über 28 Jahre bei 31 Patienten mit Durchschnittsalter 13 Jahre bei Entdeckung zeigten sich 20 Patienten beschwerdefrei, 8 klagten über geringe Beschwerden und nur 2 waren operiert, was den benignen Verlauf widerspiegelt [11].

Welche Rolle der häufiger und früher als in der Normalpopulation vorhandenen Diskopathie bei der Schmerzentstehung zukommt, ist noch unklar [26]. Bei symptomatischen Patienten wurde zudem häufig eine Degeneration im Diskus oberhalb des Gleitsegmentes gefunden [27].

Sport

Pathologien am lumbosakralen Übergang von Athleten sind Ausdruck der sportartspezifischen lokalen Überbelastung. Bei Sportarten mit repetitiver Hy-

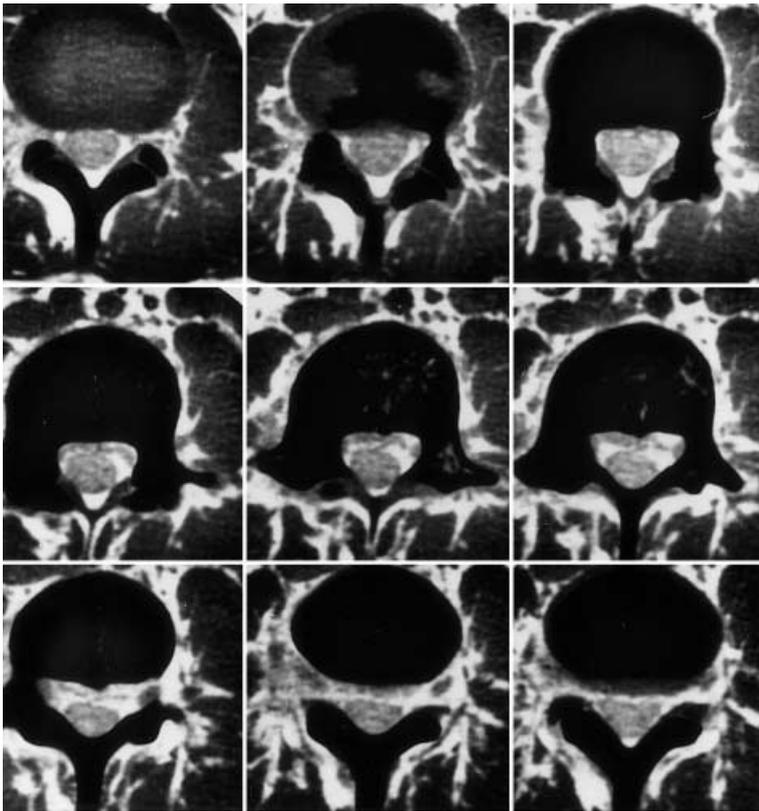


Abb. 5 ▲ Zeigt sich in der Computertomographie in mindestens einer Schicht ein durchgehender knöcherner Ring (wie hier in der mittleren Reihe, Abbildung rechts), so liegt eine normale Wirbelmorphologie vor. Andernfalls handelt es sich um ein „incomplete ring sign“ und damit um eine Spondylolyse, sofern der Defekt im Bereich der Pars interarticularis liegt

perextension und Rotation der Lumbalwirbelsäule besteht gegenüber der Normalbevölkerung eine erhöhte Inzidenz von Spondylolysen (Tabelle 3). Bei 3152 spanischen Eliteathleten wurde eine durchschnittliche Prävalenz von 8% gefunden, was etwa dem Wert der Gesamtbevölkerung entspricht. Bei Wurfsporthern (z. B. Speerwerfern) hingegen betrug die Prävalenz 27%, bei der rhythmischen Sportgymnastik und beim Rudern je ca. 17%. Andere Autoren haben höhere Zahlen gefunden mit 47% bei Speerwerfern, 43% bei Turmspringern, 32% bei Kunstturnern, 30% bei Ringern und 23% bei Gewichthebern [31]. Bei Sportarten mit asymmetrischer Belastung, aber auch bei einer Kunstturnerin wurde die Kombination von unilateralen Lysen mit kontralateralen Pedikelfrakturen beschrieben, welche asymptomatisch verlaufen und selbst unter Weiterführen des Trainings spontan ausheilen können. Dies ist wahrscheinlich nur möglich bei intaktem Diskus und entsprechendem Muskelkorsett [8].

Akuten lumbalen Rückenschmerzen bei jungen Sportlern liegt als häufigster Grund in bis zu 50% eine Spondylolyse zugrunde [19]. Zudem besteht eine höhere Inzidenz lumbaler Rückenschmerzen bei Sportlern mit hoher Belastung der LWS vor allem bei Hyperextension und Rotation. Eine Spondylolyse führt einerseits zu einer Destabilisierung andererseits aber auch zu mehr Beweglichkeit, was in Sportarten wie der rhythmischen Sportgymnastik, Kunstturnen aber auch im Ballett als besonderes Merkmal der Eleganz gewichtet und bewertet wird. Es mag sein, dass das Vorhandensein einer Spondylolyse bewusst oder unbewusst als positives frühes Selektionskriterium wirkt, und die erhöhte Inzidenz von Spondylolysen bei diesen Athletinnen z. T. auch dadurch bedingt ist.

Eine Spondylolyse per se sollte nicht Ausschlusskriterium sein für die Ausübung von entsprechenden Risikosportarten, sofern nicht ein höhergradiges Gleiten oder ungünstige morphologische Faktoren vorliegen wie eine Sak-

rumkyphose, lumbosakrale Übergangsstörungen oder eine verminderte Diskushöhe. Die Beurteilung der Sportfähigkeit muss individuell aufgrund der vorhandenen Instabilität, des Gleitgrades respektive der Gleitprogredienz und der Beschwerden erfolgen. Das Progredienrisiko einer leichten Olisthese kann klinisch nicht und im Röntgen nur mäßig zuverlässig vorausgesagt werden, weshalb vor allem während der Adoleszenz halbjährliche radiologische oder sonographische Nachkontrollen angezeigt sind. Bei progredientem Gleiten sind Sportarten mit axialer Belastung (v. a. Sprünge) oder repetitiver lumbaler Hyperextension und Rotation zu vermeiden. Eine Spondylolyse mit leichter Olisthese ist keine Kontraindikation für Wettkampfsport, sofern keine Symptome bestehen und regelmäßige sportmedizinische Betreuung gewährleistet ist [21]. Zwischen Trainingsintensität und Ausmaß des Gleitprozesses scheint keine Korrelation zu bestehen.

Therapie

Konservative Therapie

Die konservativen Therapieoptionen umfassen Aktivitätseinschränkung und -anpassung, physikalische Therapie und Korsettruhigstellung. Patienten mit zufällig entdeckter Spondylolyse ohne oder mit nur geringgradigem Gleiten (Meyering I, II) bedürfen keiner Behandlung,

Tabelle 3

Sportarten mit erhöhter Inzidenz von Spondylolysen und Spondylolisthesen

Kunstturnen
Rhythmische Sportgymnastik
Ballet
Trampolinspringen
Turmspringen
Hyperlordosierende Kautschuk-Kontorsionisten
Dreisprung
Ringern
Judo
Speerwerfen
Golf
Basketball
Rudern
Brust- und Delphinschwimmen
Gewichtheben

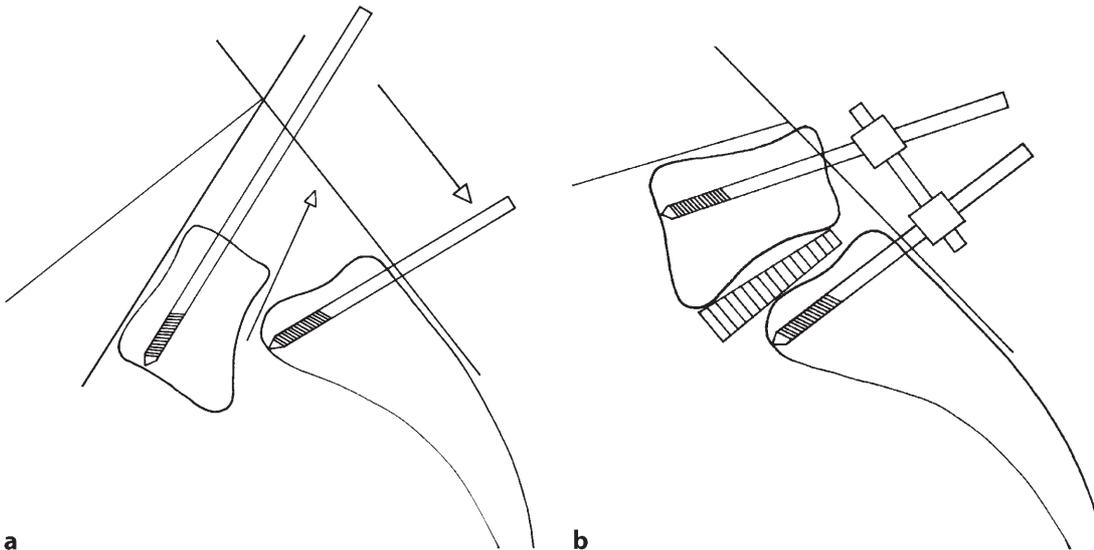


Abb. 6a, b ▲ Operationstechnik der ventrodorsalen Reposition und Spondylose L5/S1 bei Translation und Kyphosierung von L5. Nach Resektion des Diskus L5/S1 und Einsetzen eines Knochenspans von ventral, wird in einem 2. Operationsschritt von dorsal transpedikulär instrumentiert mit Aufrichtung (Lordosierung) von L5

höchstens der Verlaufsbeobachtung des Gleitvorganges. Patienten und Eltern sollen über die Häufigkeit von Spondylolyse in der Normalbevölkerung und ihre benigne Prognose aufgeklärt werden, um eine Stigmatisierung und weitergehende bildgebende Abklärungen, wie auch unnötige Therapien zu vermeiden. Bei erstmaligem Auftreten von typischen, spondylolyseassoziierten Symptomen rechtfertigt sich ein mehrmonatiges „aktiv“ konservatives Vorgehen, welches in den meisten Fällen auch von Erfolg gekrönt ist: Belastungsreduktion, -modifikation und aktive Physiotherapie, eventuell ergänzt durch eine Korsetttherapie, müssen dem Einzelfall entsprechend eingesetzt werden.

Es gilt zu beachten, dass die knöchernen Heilung nicht *conditio sine qua non* ist für das Erlangen von Schmerzfreiheit. Einerseits können akut traumatisch entstandene Lysen und auch Pedikelfrakturen ohne Zutun selbst unter Beibehalten der Sportaktivität abheilen, andererseits werden aber chronische Lysen mit breiteren Defekten auch unter Brace-Ruhigstellung nicht knöchern verheilen [8]. Zudem ist die knöchernen Heilungsrate für unilaterale höher als für bilaterale Lysen und höher für frühe, szintigraphisch aktive Prozesse.

Belastungsreduktion und -anpassung heißt den mechanischen Reiz zu mindern, welcher zu Schmerzen führt.

Entsprechend der Pathogenese sollen lordosierende und rotierende Belastungen vermieden werden. Bei aktiven Sportlern soll anstelle des unattraktiven generellen Sportverbots zusammen mit den Trainern und Physiotherapeuten ein alternatives Trainingsprogramm ausgearbeitet werden, um auch unter Reduktion der sportartspezifischen Übungen die Konditionsfaktoren Koordination, Beweglichkeit, Ausdauer und Kraft aufrecht zu halten. Neben diesen trainingspezifischen Aspekten sind auch die psychologischen Aspekte der optimalen Weiterbetreuung und Rückführung in den normalen Trainings- und Wettkampfbetrieb nicht zu übersehen.

Anstelle von rein passiven Maßnahmen soll ein gezieltes Training zur Co-Aktivierung der rumpfstabilisierenden Abdominal- und autochthonen Rückenmuskulatur durchgeführt werden, welches sich auch einer simplen Anleitung durch den Arzt als signifikant überlegen erwiesen hat. Am wichtigsten erscheint dabei, wie auch bei lumbalen Rückenschmerzen anderer Genese, die konsequente Durchführung von Beginn an ohne Phase der Inaktivität, ergänzt durch ein instruiertes, strukturiertes Heimprogramm.

Ein Korsett kann bei persistierenden stärkeren Schmerzen oder bei frische Lyse (Traumanamnese und/oder positivem Szintigramm) angezeigt sein.

Im Frühstadium der Lyse ist das Brace erfolgreicher als die alleinige Einschränkung der Aktivität wie eine SPECT-kontrollierte Studie mit 198 Patienten gezeigt hat [1]. Ein entlordosierendes Korsett sollte für 23 h pro Tag über etwa 6 Monate getragen werden.

Operative Therapie

Prinzipiell kommen folgende Techniken in Betracht:

- Knöcherne Überbrückung und Stabilisation der Spondylolysezone („direct repair“),
- dorsolaterale Fusion des Bewegungsegmentes,
- ventrale Fusion in situ mit/ohne Instrumentierung,
- ventrodorsale Fusion ohne Reposition des Gleitwirbels,
- ventrodorsale Fusion mit Reposition des Gleitwirbels,
- dorsale Reposition und Fusion.

Die häufigste Indikation zu einer operativen Intervention besteht im Falle von Spondylolyse mit oder ohne Spondylolisthesis Grad 0–II, welche trotz adäquater mehrmonatiger konservativer Therapie eine störende Schmerzpersistenz im Alltag oder beim Sport aufweisen. Eine nachgewiesene Gleitprogredienz, Spondylolisthese dritten oder höheren Grades mit einem hohen Risiko der Progredienz im Wachstumsalter, sowie Veränderungen der Wirbelsäulenstatik bei Kyphosierung von L5 sind seltenere Indikationen.

Die prinzipielle Operationstechnik richtet sich nach dem schon vorhandenen

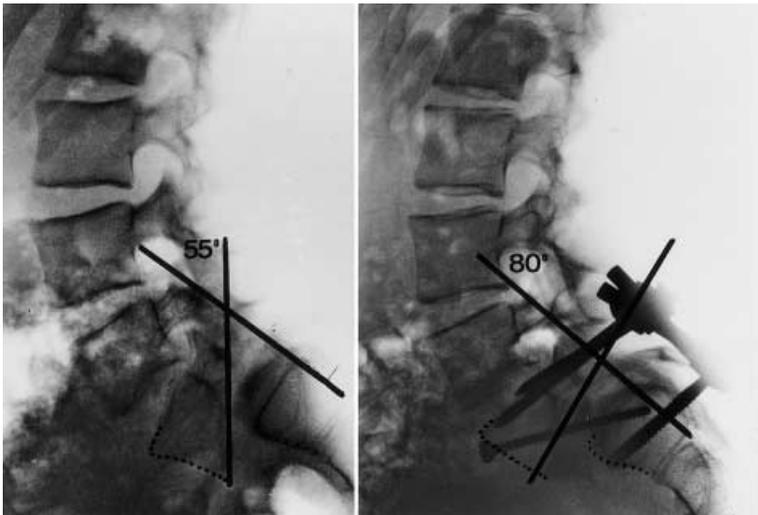


Abb. 7 ▲ 13-jährig, weiblich: Spondylolisthesis L5/S1 Grad 4 mit Kyphosierung: Dorsovenrale zweizeitige Aufrichtung von L5 um 25° zur Normalisierung der Wirbelsäulenstatik

Gleitgrad, einer allfällig vorhandenen Diskopathie und Neurologie, sowie den Stigmata der lumbosakralen Kyphosierung.

Knöcherne Überbrückung und Stabilisation der Spondylolysezone („direct repair“)

Die direkte Stabilisierung der Lysezone mittels Implantat nach Pseudarthrosenausräumung, Knochenanlagerung und Abtragung des untersten Teiles des Processus articularis inferior von L4 bei Olisthesen Grad 0–II hat den knöchernen Durchbau des Wirbelbogens (Restitutio ad integrum) und Schmerzfreiheit unter Erhaltung der Beweglichkeit des Gleitsegmentes zum Ziel. Obwohl auch bei geringen Spondylolisthesen eine gewisse Diskusveränderung auch bei Jugendlichen schon die Regel ist, wird erst eine signifikante Diskopathie, respektive das Alter über 20 Jahre als Indikation für eine intersegmentale Fusion betrachtet, da ein pathologischer Diskus sowohl eine Schmerzquelle als auch einen Instabilitätsfaktor darstellt. Im Zweifelsfall empfiehlt sich eine MRT-Untersuchung als Entscheidungshilfe.

Allen nachfolgenden Techniken ist gemeinsam, dass gute klinische Resultate auch bei radiologischem Fortbestehen einer Lysezone möglich sind [23]. Gute Resultate, gemessen an Schmerzhäufigkeit und -intensität sind in 80–90% zu erwarten, wobei ein Alter von über 20 Jahren der entscheidende negative prognostische Faktor zu sein scheint

[10]. Die radiologische Durchbaurate beträgt im schlechtesten Fall ca. 50%. Oft wird auch eine gewisse Reposition der Olisthesis beobachtet.

Folgende Techniken stehen zu Verfügung:

- Technik nach Scott: Drahtcerclagen um Querfortsatz und Wirbelbogen. Die Technik kann modifiziert werden, indem der Draht statt um den Querfortsatz um den Kopf einer Pedikelschraube gelegt wird, womit das Risiko einer Wurzelläsion gemindert werden soll.
- Direkte Verschraubung durch den Defekt nach Buck 1970 [2]: mit einer AO 2,7 mm Schraube wird der Defekt direkt verschraubt, was bei dysplastischem Bogen schwierig sein kann. Zudem füllt die Schraube den Defekt auf, vermindert dadurch die knöchernen Heilungsfläche, was zu behinderter Konsolidation und Implantatbrüchen führen kann.
- Die Morscher-Hakenschraube (Abb. 3) hat den Vorteil, dass sie nicht durch den Defekt eingesetzt werden muss, sondern dorsal darüber liegt, indem sie in die Basis des oberen Gelenkfortsatzes eingedreht wird [20]. Das Implantat setzt sich zusammen aus einem modifizierter Harrington-Haken, einer Schraube, welche durch den Haken geführt wird und jeweils an den Enden 2 Gewinde aufweist. Mittels einer Spannfeder und 2 Schraubenmutter kann

die Lysezone unter Kompression gesetzt werden.

- Die Kombination Pedikelschraube, Laminahaken und Stab ergibt eine noch stabilere Konstruktion, jedoch mit Einsetzen einer Pedikelschraube auch einen höheren operativen Aufwand [31]. Alternativ können die Pedikelschrauben auch über einen V-förmigen Stab, welcher distal des Processus spinosus über die Lamina führt, miteinander verbunden werden [7].

In den bisherigen retrospektiven Studien hat sich keine der 3 ersten Techniken als eindeutig überlegen erwiesen: sehr gute und gute Resultate sind in 60–86% gefunden worden, wobei ein höherer Anteil von schlechteren Resultaten in Kollektiven mit einem hohen Anteil von Erwachsenen zu erwarten ist. Die bisherigen Resultate der Kombination Pedikelschraube, Laminahaken und Stab sind angesichts der kleinen Patientenzahlen noch nicht schlüssig zu beurteilen [7, 33].

Intersegmentale Fusion in situ

Bei einem Gleitgrad III oder IV nach Meyerding hängt die Wahl des operativen Prozedere vom Vorhandensein einer Kyphosierung des Gleitwirbels ab. Besteht keine Kyphose und damit keine wesentliche Änderung der Wirbelsäulenstatik, so reicht eine Fusion in situ. Das Ziel heißt Verhindern der Progression, was mit einer ventralen Fusion, bei allerdings höherer Zugangsmorbidität, schwierigerer Technik und höherem Operationsrisiko, sicherer gelingt als mit einer einfachen posterolateralen Fusion.

Reposition des Gleitwirbels und intersegmentale Fusion

Die Wiederherstellung der gestörten Wirbelsäulenstatik durch Reposition des Gleitwirbels im Falle einer lumbosakralen Kyphose macht ein aufwendiges zweizeitiges Vorgehen nötig: nach ventraler Bandscheibenresektion wird in einem zweiten Schritt von dorsal eine Dorsaltranslation und Lordosierung des Gleitwirbels durchgeführt. Letzteres ist für die Normalisierung der Biomechanik entscheidend ([3]; Abb. 6 und 7).

Fazit für die Praxis

- Spondylolysen sind mit 6% Inzidenz relativ häufig, führen jedoch selten zu Beschwerden.
- Primäre Diagnostik bei Symptomatik: konventionell radiologische Abklärung des lumbosakralen Überganges, wobei auf die noch populären Schrägaufnahmen wegen der fehlenden Zusatzinformation bei erhöhter Gonadendosis verzichtet werden sollte.
- Erweiterte Diagnostik: je nach Zusatzfragestellung (z. B. aktiver Umbauprozess, Foramina stenose, Diskuspathologie) führen Szintigramm, SPECT, MRT oder CT weiter.
- Therapie: Die typischerweise belastungsabhängigen Schmerzen sprechen in den meisten Fällen gut auf Belastungsreduktion und rumpfstabilisierendes Training an. Bei akuten Schmerzen nach kurzzeitig hoher Belastung des lumbosakralen Überganges und Mehranreicherung im Szintigramm darf von einer Ruhigstellung im Korsett eine knöcherne Ausheilung erwartet werden.
- Therapierefraktäre Schmerzen über mehrere Monate, Gleitgrad I, II: bei Adoleszenten mit noch intaktem Diskus soll eine Stabilisationsoperation des Parsdefektes ohne Versteifung des Gleitsegmentes diskutiert werden.
- Ein Gleitgrad III, IV bei Erstentdeckung vor Wachstumsabschluss rechtfertigt wegen des hohen Progressionsrisikos eine dorsale Spondylodese.
- Spondyloptose oder Spondylolisthesis Grad III, IV mit Kyphosierung des Gleitwirbels ändert im Sinne einer statischen Kompensation nachhaltig das sagittale Wirbelsäulenprofil mit Lordosierung der darüber liegenden LWS und BWS sowie Steilstellung des Beckens und Sakrum. Aufgrund der kosmetischen Auffälligkeit, sowie der funktionellen und manchmal auch neurologischen Beeinträchtigung empfiehlt sich in diesem Fall die ventrale Reposition und damit Lordosierung des Gleitwirbels mit nachfolgend dorsaler Spondylodese.

Literatur

1. Anderson K, Sarwark JF, Conway JJ, Logue ES, Schafer MF (2000) Quantitative assessment with SPECT imaging of stress injuries of the Pars interarticularis and response to bracing. *J Pediatr Orthop* 20: 28–33
2. Buck JE (1970) Direct repair of the defect in spondylolisthesis. Preliminary report. *J Bone Joint Surg Br* 52: 432–437
3. Dick W, Schnebel B (1988) Severe spondylolisthesis: reduction and internal fixation. *Clin Orthop* 232: 70–79
4. Dreyzin V, Esses SJ (1994) A comparative analysis of spondylolysis repair. *Spine* 19: 1909–1914
5. Eisenstein SM, Ashton IK, Roberts S, Darby AJ, Kanse P, Menage J, Evans H (1994) Innervation of the spondylolysis, „ligament“. *Spine* 19: 912–916
6. Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, Yuan HA, Lubicky JP (1984) The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 66: 699–707
7. Gillet P, Petit M (1999) Direct repair of spondylolysis without spondylolisthesis, using a rod-screw construct and bone grafting of the pars defect. *Spine* 24: 1252–1256
8. Guillodo Y, Botton E, Saraux A, LeGoff P (2000) Contralateral spondylolysis and fracture of the lumbar pedicle in an elite gymnast. *Spine* 25: 2541–2543
9. Harada T, Ebara S, Anwar MM, Kajiura I, Oshita S, Hiroshima K, Ono K (1993) The lumbar spine in spastic diplegia. A radiographic study. *J Bone Joint Surg Br* 75: 534–537
10. Hefti F, Seelig W, Morscher E (1992) Repair of lumbar spondylolysis with a hook screw. *Int Orthop* 16: 81–85
11. Hefti F, Brunazzi M, Morscher E (1994) Spontanverlauf bei Spondylolyse und Spondylolisthesis. *Orthopäde* 23: 220–227
12. Hillbrand AS, Urquhart AG, Graziano GP, Hensinger RN (1995) Acute spondylolytic spondylolisthesis. Risk of progression and neurological complications. *J Bone Joint Surg Am* 77: 190–196
13. Hutton WC, Stott JRR, Cyron BM (1977) Is spondylolysis a fatigue fracture? *Spine* 2: 202–209
14. Jinkins JR, Matthes JC, Sener RN, Venkatappan S, Rauch R (1992) Spondylolysis, Spondylolisthesis, and associated nerve root entrapment in the lumbosacral spine: MR evaluation. *AJR Am J Roentgenol* 159: 799–803
15. Langston JW, Gavant ML (1985) „Incomplete ring“ sign: a simple method for CT detection of spondylolysis. *J Comput Tomogr* 9: 728–729
16. Lowe J, Schachner E, Hirschberg E, Shapiro Y, Libson E (1984) Significance of bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *Spine* 9: 653–655
17. Lusins JO, Elting JJ, Cicoria AD, Goldsmith SJ (1994) SPECT evaluation of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. *Spine* 19: 608–612
18. Meyerding HW (1932) Spondylolisthesis: surgical treatment and results. *Surg Gynecol Obstet* 54: 371–377
19. Micheli LJ, Wood R (1995) Back pain in young athletes. Significant differences from adults in causes and patterns. *Arch Pediatr Adolesc Med* 149: 15–18
20. Morscher E, Gerber B, Fasel J (1984) Surgical treatment of spondylolisthesis by bone grafting and direct stabilization of spondylolysis by means of a hook screw. *Arch Orthop Trauma* 103: 175–178
21. Muschik M, Hähnel H, Robinson PN, Perka C, Muschik C (1996) Competitive sports and the progression of spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 16: 364–369
22. Ohmori K, Ishida Y, Takatsu T, Inoue H, Suzuki K (1995) Vertebral slip in lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. Long-term follow-up of 22 adult patients. *J Bone Joint Surg Br* 77: 771–773
23. Pellise F, Toribio J, Rivas A, Garcia-Gontecha C, Bago J, Villanueva C (1999) Clinical and CT scan evaluation after direct repair in spondylolysis using segmental pedicular screw fixation. *J Spinal Disord* 12: 363–367
24. Raby N, Mathews S (1993) Symptomatic spondylolysis: correlation of CT and SPECT with clinical outcome. *Clin Radiol* 48: 97–99
25. Saifuddin A, White J, Tucker S, Taylor BA (1998) Orientation of lumbar pars defects: implications for the radiological detection and surgical management. *J Bone Joint Surg Br* 80: 208–211
26. Saraste H (1987) Long-term clinical and radiological follow-up of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 7: 631–638
27. Schlenzka D, Seitsalo S, Poussa M, Österman K (1993) Premature disc degeneration: source of pain in isthmic spondylolisthesis in adolescents? *J Pediatr Orthop B* 1: 153
28. Schneiderman GA, McLain RF, Hambly MF, Nielsen SL (1995) The pars defect as a pain source. A histologic study. *Spine* 20:1761–1764
29. Shipley JA, Beukes CA (1998) The nature of the spondylolytic defect. Demonstration of a communicating synovial pseudarthrosis in the pars interarticularis. *J Bone Joint Surg Br* 80: 662–664
30. Simper LB (1986) Spondylolysis in Eskimo skeletons. *Acta Orthop Scand* 57: 78–80
31. Steinbrück K, Krahl H, Rompe G (1980) Bedeutung mechanischer Faktoren bei der Entstehung der Spondylolyse. *Z Orthop* 118: 456–457
32. Tallroth K, Ylikoski M, Taavitsainen M (1987) Sonographic measurement of vertebral dislocation in spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 7: 538–540
33. Tokuhashi Y, Matsuzaki H (1996) Repair of defects in spondylolysis by segmental pedicular screw hook fixation. A preliminary report. *Spine* 21: 2041–2045
34. Van den Oever M, Merrick MV, Scott JH (1987) Bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *J Bone Joint Surg* 69: 453–456
35. Wynne-Davies R, Scott JHS (1979) Inheritance and spondylolisthesis. A radiographic family survey. *J Bone Joint Surg Br* 61: 301–305