

# Dauerbrenner Rücken

Hasler CC<sup>1</sup>, Studer D<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitätskinderhospital beider Basel

## Zusammenfassung

Die wachsende Wirbelsäule ist vor allem bei leistungsorientierten jungen Athleten während des pubertären Wachstumschubes besonders exponiert: einerseits sind die deck- und bodenplattennahen 48 knorpeligen Wirbelkörper-Wachstumszonen in jener Zeit unter hormonellen Einflüssen mechanisch so fragil wie nie zuvor, andererseits sind die einwirkenden Kräfte aufgrund der grösseren Rumpflänge, der oft vorhandenen relativen Muskelinsuffizienz, der grösser werdenden Trainingsumfänge, -intensitäten sowie der höheren Leistungsbereitschaft und des grösseren Leistungsdrucks nun höher. Dies führt zu einer biomechanischen Dysbalance. Im einfachsten Fall resultieren funktionelle Beschwerden, nicht selten jedoch auch strukturelle Veränderungen in Form eines (thorako-)lumbalen M. Scheuermann, vor allem in Sportarten mit hohen axialen Belastungen (Bsp. alpiner Skirennsport, Kunstturnen). Früherkennung, Belastungsanpassung und allenfalls eine vorübergehende Korsetttherapie sind neben der Schmerzlinderung essenziell, um pathologische sagittale Profilstörungen zu vermeiden. Repetitiv reclinierend-rotierende Beanspruchungen der LWS hingegen erhöhen die Inzidenz und Symptomatik einer Spondylolyse, welche meist auf konservative, entlordosierende Therapie anspricht. Die Entstehung und Progression eines assoziierten Wirbelgleitens hingegen ist nicht sportabhängig, sondern vor allem prädisponierenden anatomischen Faktoren geschuldet. Höhergradiges Gleiten bedarf einer operativen Stabilisierung. Vor allem bei primär als funktionell eingestuften lumbalen Rückenschmerzen ist eine konventionell radiologische Abklärung sinnvoll, da lumbosakrale Übergangspathologien ursächlich mitbeteiligt sein können. Das Gleiche gilt für infrapelvine Faktoren wie u.a. Hüftpathologien oder Beinlängendifferenzen. Der peripher-orthopädische klinische Status ist daher obligater Bestandteil einer Rückenabklärung. Leistungsorientierte Athleten im Wachstum gehören angesichts der Band- und Tragweite möglicher Pathologien sowie derer Karriere- und Langzeitrelevanz routinemässig mindestens einmal jährlich sportärztlich untersucht und benötigen bei Beschwerden zeitnahen Zugang zu ärztlicher Abklärung mit gesicherter Kenntnis der wachstumsspezifischen Eigenheiten.

Schlüsselwörter:

Wirbelsäule, Wachstum, Scheuermann, Spondylolyse

## Abstract

The growing spine is – particularly in performance oriented young athletes – prone to overload: under pubertal hormonal influence the 48 cartilaginous growth zones beneath the vertebral endplates are mechanical as fragile as never before during growth whereas on the other side the impacting forces are becoming higher due to the longer trunk lever arm, the often apparent relative muscular insufficiency, the increasing training hours and intensity as well as the willingness and pressure to perform. The subsequent biomechanical imbalance usually results in simple functional complaints but may also entail structural changes, for example (thoraco-) lumbar Scheuermann's disease in sports with high axial impact such as alpine skiing or gymnastics. Early detection, modification of training and unloading of the anterior spinal column by brace therapy ease pain and prevent pathologic changes of the sagittal profile. Repetitive lumbar hyperlordosis and rotation increase the incidence and symptoms of spondylolysis which responds to conservative therapy in most cases. In contrast, the occurrence and progression of a vertebral slip is not sport-associated but rather fueled by predisposing pelvic and vertebral lumbosacral anatomic factors and ongoing growth. High-grade slips warrant operative stabilisation. In patients diagnosed with lumbar functional back pain which does not quickly respond to conservative measures, radiographic assessment (standing radiographs) is recommended since lumbosacral pathologies are frequently contributing to or even causing pain. The same holds true for infrapelvic factors like hip pathologies and leg length differences. Consequently, a thorough peripheral orthopaedic examination represents an obligatory part of the assessment mainly in view of the importance of potential pathologies for the career and longterm course. Yearly routine sports-medical exams of young athletes and timely assessment of symptomatic individuals by doctors with profound knowledge of the growth specific aspects is mandatory.

Keywords:

Spine, Growth, Scheuermann, Spondylolysis

## Einführung

Sport generiert Kräfte, welche spür- und sichtbare Auswirkungen auf eine wachsende Wirbelsäule haben können. Die Wachstumszonen, welche das Längenwachstum sicherstellen (2 pro Wirbel  $\times$  24 Wirbel), sind unter dem Einfluss der Geschlechtshormone im pubertären Wachstumsschub schwächer als vorher und bei hohen Belastungen in hohem Masse exponiert.[1] In jener Phase der Karriereentscheide wird Training und Risikobereitschaft erhöht. Fundamental für das Verständnis von Wachstumsstörungen ist die Tatsache, dass eine Wachstumszone zwar unter Belastung mikromorphologische und biochemische Anpassungen zeigt, ihre mechanische Festigkeit sich jedoch *nicht* verbessert: Wachstumsknorpel lässt sich im Gegensatz zu Bändern, Sehnen, Muskeln und Knochen nicht trainieren![2] Pro Wirbel wird während der Pubertät pro Jahr zwischen 0,6 (thorakal) und 1 mm Höhe gewonnen.[3,4] Häufig zeigen sich während des akzelerierten Rumpfwachstums eine relative Muskelinsuffizienz und koordinative Defizite.[5] Es ist daher nicht verwunderlich, dass zwischen 10 und 16 Jahren am häufigsten Rückenprobleme beobachtet werden. Wichtig ist die Differenzierung zwischen harmlosen funktionellen Problemen, strukturellen Veränderungen mit wachstumsassoziiertem Progressionsrisiko sowie wachstumsunabhängigen erworbenen oder angeborenen Pathologien.

Rückenschmerzen im Wachstum sind mit bis zu 30% Lebenszeitprävalenz häufig.[6,7] Im Alter von 11 Jahren, vor Beginn des pubertären Wachstumsschubes, leiden etwa 10% (Jahresinzidenz) an Schmerzen, in der Altersgruppe der 15-Jährigen bereits etwa 15% und auch die Lebenszeitprävalenz erhöht sich auf über 40%. Kein Sport und kompetitiver Sport mit Trainingszeiten über 6h pro Woche scheinen Risikofaktoren zu sein.[8,9]. Fehlende körperliche Betätigung akzentuiert die pubertäre Muskelinsuffizienz, was bereits beim Sitzen und Stehen zur Dekompensation führt, beim Sportler hingegen ist die sportart- und trainingsspezifische Überforderung ursächlich. Vor allem hohe axiale Kräfteinflüsse oder repetitive Hyperlordosierung-Rotation der LWS gehen mit einem höheren Risiko von Schmerzen und strukturellen Veränderungen einher.[10–12]

## Funktionelle Rückenschmerzen

Bei den meisten Rückenschmerzen handelt es sich um harmlose muskuläre Überlastungen, sogenannte funktionelle Schmerzen. Während des Wirbelsäulen-Wachstumsspurtes – bei Mädchen typischerweise ca. 1 Jahr vor bis 2 Jahre nach der ersten Regelblutung, zwischen 12 und 14 Jahren, beim Knaben zwei Jahre später – ändern sich Rumpflänge und Kraftverhältnisse dauernd. Muskelüberlastungen treten typischerweise zum Ende und nach Belastung auf. Warnzeichen wie Ausstrahlungen in die Beine, Ruhe- und Nachtschmerzen sowie Fieber fehlen. Das Training soll in dieser vulnerablen Phase gezielt rumpfstabilisierend gestaltet werden. Eine gute ermüdungsresistente Rumpfstabilität (Core stability) erlaubt einen präziseren Einsatz der Extremitäten, was in allen Sportarten resultatrelevant ist. Auch die im Wachstumsalter häufig vernachlässigten, regenerativen Massnahmen wie Wärmeanwendungen, Dehnen, Massagen sowie Anwendungen der Faszienrolle sollen eingebaut werden. Falls sich innerhalb von 2–4 Wochen keine Besserung einstellt, klinisch eine Deformität ersichtlich ist oder die ge-

nannten Warnzeichen vorhanden sind, sollte bildgebend abgeklärt werden.[7] Je jünger der Patient, desto eher findet man ein morphologisches Korrelat. Zudem korreliert im Gegensatz zu den Erwachsenen der Schmerz recht gut mit den bildgebenden Befunden. Es lohnt sich, ein spezielles Augenmerk auf den anatomisch variablen lumbosakralen Übergang zu richten. Dortige Auffälligkeiten können funktionelle Schmerzen unterhalten oder per se als Schmerzquelle infra-



**Abbildung 1:** 17-jährige Tennisspielerin mit therapieresistenten chronischen tiefenlumbalen Rückenschmerzen.

**1A:** Im Röntgenbild lässt sich eine Übergangsvariante L5S1 mit beidseitig partiell sakralisiertem Wirbel L5 vermuten: beidseitig verbreiteter Transversus L5 mit Pseudoartikulation (Nearthrose) von L5 mit S1 (Castellvi Typ IIb).

**1B:** In der MRT findet sich angrenzend an die Pseudoartikulation ein Knochenmarködem im Transversus L5, der Massa lateralis des Os sacrum sowie im Os ilium beidseitig.

ge kommen. Neben den weiter unten abgehandelten Spondylolysen und den klinisch unbedeutenden Bogenschlussanomalien (Spina bifida occulta) sind es die kongenitalen Nearthrosen (partielle Fusion und Falschgelenk zwischen Processus transversus L5 und Sakrumplateau) sowie die kongenitalen Schrägstellungen des Sakrumplateaus mit schrägem Abgang von L5, welche funktionell von Bedeutung sind und als Schmerzauslöser häufig übersehen werden. [13,14]

Bei Unsicherheit bezüglich der Pathogenese bietet sich bei Nearthrose eine CT-gesteuerte diagnostische Infiltration mit Lokalanästhetikum und eine probatorische unilaterale Schuheinlage bei einer Sakrumasymmetrie an, um versuchsweise die Konkavität der konsekutiven lumbalen Skoliose zu entlasten.

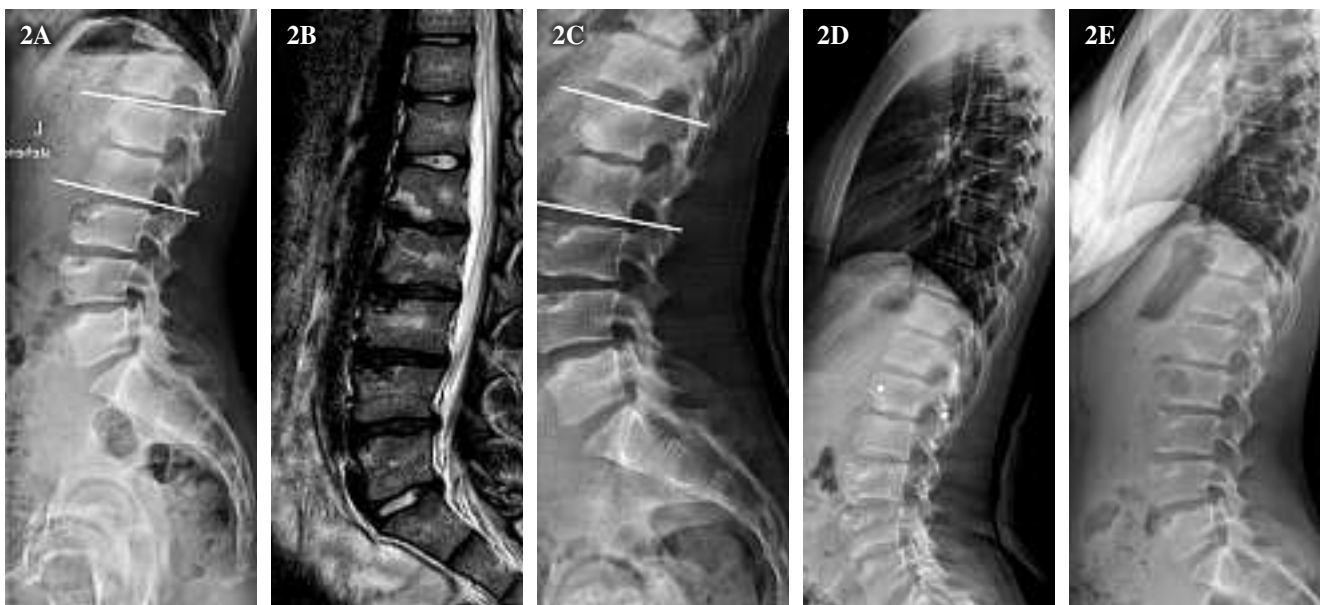
## Wachstumsstörungen und Deformitäten

Sport kann Wirbelsäulenwachstum über Kompression oder Distraction der Wachstumszonen modulieren: Sportinduzierte Wachstumsstörungen sind mit zunehmenden Trainingsstunden häufiger zu beobachten.[15] Sie betreffen fast ausschliesslich wachstumshemmend das sagittale Profil im Rahmen eines Morbus Scheuermann. Wachstumsstimulation durch ventrale Distraction bei forcierter, repetitiver Hyperlor-

dosierung scheint zum Beispiel bei rhythmischer Sportgymnastik eine höhere Skolioseinzidenz zu bewirken.[16,17] Beim Morbus Scheuermann kommt es infolge mechanischer Überbelastung der endplattennahen Wachstumszonen zu einem Einbruch von Diskusteilen in den Wirbelkörper, zu einer verminderten Funktion der Wachstumszone mit Keilwirbelbildung und zu einer Verschmälerung des Bandscheibenfachs. An der BWS bewirkt dies einen fixierten Rundrücken mit Akzentuierung des sagittalen Profils, an der LWS eine Verminderung der natürlichen Lordose. In extremis resultiert gar eine Lendenkyphose, welche mit einer prognostisch ungünstigen Abflachung der BWS (Flachrücken) kompensiert wird. Sportarten mit hohen axialen Kompressionskräften, vor allem wenn sie wie beim alpinen Skirennsport auf eine bereits kyphosierte Wirbelsäule treffen, bergen ein höheres Risiko.

Im Kunstturnen können bei Landungen Kräfte bis zum 10-fachen Körpergewicht einwirken.[18] Bei Abfahrtsläufern und Skispringern resultieren radiologisch in bis zu 50% solche Veränderungen (Unsportliche Kontrollgruppe 20%), bei jungen, leistungsorientierten Wasserskispringern gar in nahezu 100%. [10,12,19]

Der (thorako-) lumbale Morbus Scheuermann ist meist symptomatisch. Laut Zwillingstudien ist neben der genetischen Prädisposition der Sport oft kausal beteiligt.[20,21] Wir konnten die Auswirkungen der sportartspezifischen Bio-



**Abbildung 2:** Diese leistungsorientierte 14-jährige alpine Skirennfahrerin beklagt seit 3 Monaten ohne erinnerliches Trauma trotz Physiotherapie und Trainingsreduktion lumbale, belastungsabhängige Rückenschmerzen.

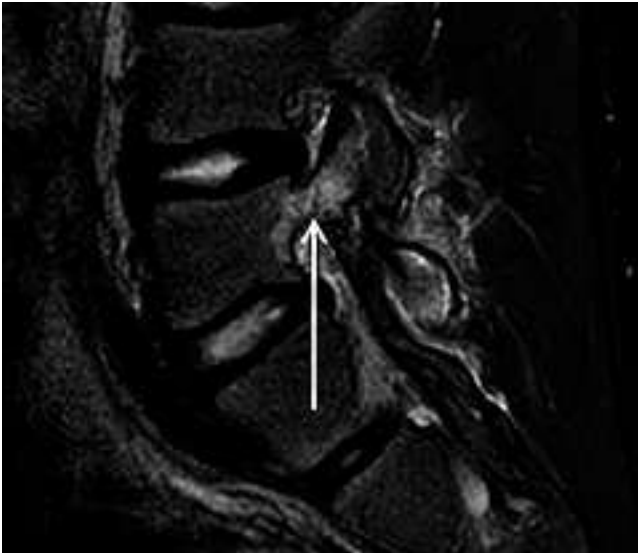
**2A:** Radiologisch stehend manifestiert sich ein lumbaler Morbus Scheuermann mit ventralen Deck- und Bodenplatteneinbrüchen auf den Niveaus L1-L5 mit Kyphose im Segment L1L2 und Verminderung der Lordose L2-L5. Das Bandscheibenfach L1L2 ist vor allem ventral verschmälert.

**2B:** In der MRT zeigt sich eine Dehydrierung der Bandscheiben L1-L5, die beschriebenen Einbrüche der ventralen Bandscheibenanteile in die Wirbelkörper sowie ausgedehnte Ödeme. Angesichts der Aufnahme im Liegen ist das Bandscheibenfach L1L2 ventral weniger kollabiert und demonstriert die pathologische Wirkung der Schwerkraft respektive der axialen Krafteinwirkung beim Sport.

**2C:** Auf dem Röntgenbild im Gipskorsett, welches im ventralen Durchhang appliziert wurde, lässt sich deutlich dessen lordosierende Wirkung erkennen mit ventraler Distraction der Wirbelsäule und damit auch mit induzierter wachstumsmodulierender Wirkung.

**2D:** Erhaltene Korrekturstellung im abnehmbaren, lordosierenden Hartschalengerüst nach vorausgegangener 2×6-wöchiger Gipsruhigstellung.

**2E:** Nach 4-monatiger Behandlung findet sich in der korsettfreien Aufnahme eine Konsolidierung der Situation: die Progression der Deformität konnte verhindert werden. Die Scheuermann'schen Defektzonen sind im Begriff, sich knöchern zu festigen, und die Patientin ist schmerzfrei. Die Korsettbehandlung wird über mindestens 1 Jahr fortgesetzt.



**Abbildung 3:** Pedikelödem als Zeichen einer beginnenden Spondylolyse L5 bei einem 13-jährigen Fussballer mit belastungsabhängigen lumbalen Rückenschmerzen, welche sich typischerweise mit forcierter Reklination auslösen lassen.

mechanik sehr eindrücklich bei einem Downhill Mountainbiker (Lumbosakrale Kyphose auf dem Fahrradsattel) und bei Kunstturnerinnen nachvollziehen, bei denen es im Sinne eines lumbosakralen Morbus Scheuermann zu einem Einbruch des Sakrumplateaus gekommen ist.[22] Bei Patienten mit belastungsabhängigen Schmerzen und/oder Keilwirbeln empfehlen wir bei genügendem Wirbelsäulen-Restwachstum ein maximal lordosierendes Korsett, bevorzugt nach einer initialen 3-monatigen Phase im nicht abnehmbaren (100% Compliance!) Gipskorsett. In der Regel lässt sich innert Kürze eine Schmerzbesserung erreichen. Zwecks Induktion eines Remodellings der Keilwirbel über Distraction der ventralen Säule und damit Verhinderung eines Flachrückens ist das Korsett 16–20 Stunden/Tag über mindestens 1 Jahr zu tragen. Das Training soll bis zum Nachweis eines radiologisch günstigen Verlaufs unter Vermeidung hoher axialer Belastungen modifiziert werden. Dem Patient und dem Umfeld (Familie, Trainer, Lehrer) muss klargemacht werden, dass ein ossäres Remodelling mit Wiederherstellen eines annähernd physiologischen Profils nur während der wachstumsaktiven Phase gelingen kann, andernfalls droht eine fixierte Deformität. Im Gegensatz zum lumbalen Morbus Scheuermann stellt die häufigere, jedoch selten symptomatische thorakale Form ein haltungskosmetisches Problem dar, da die physiologische S-Form prominenter imponiert. Gelegentlich treten im Langzeitverlauf zervikale oder lumbale funktionelle Beschwerden auf, jedoch ohne wesentliche Beeinträchtigung der Lebensqualität sowie der Sport- und Berufsfähigkeit.[23]

### Ermüdungsbrüche und Wirbelgleiten

Der dorsale Anteil der unteren LWS und des lumbosakralen Überganges ist bei den reclinierenden Sportarten besonderen Belastungen ausgesetzt, was durch eine grosse Bandbreite von Pathologien bezeugt wird.[24] Bei der Deutung der Bildgebung sowie der Zuordnung von Symptomen sind lumbosakrale Übergangstörungen zu beachten: Lumbalisierung von S1, Sakralisierung von L5, anatomischen Varianten der Fa-

zettengelenke, Rundungen des Sakrumplateaus, strukturelle Asymmetrien (Tropismus) sowie eine Spina bifida occulta. Eine Spondylolyse ist als Tribut an den aufrechten Gang und an die einzigartige menschliche Lendenlordose bei der nicht sporttreibenden Bevölkerung in ca. 5–10% zu beobachten. Klassischerweise finden sich Spondylolysen auf Niveau L5 bei Sportarten, welche eine repetitive forcierte Hyperlordose und/oder Rotation der LWS voraussetzen und so einen biomechanischen Konflikt zwischen dem unteren Gelenksfortsatz und der Pars interarticularis generieren. Im Anfangsstadium dieser Ermüdungsbrüche finden sich im MRT ein Pedikelödem, später eine Fissur und schliesslich eine echte pseudarthrotische Lücke mit sklerotischen Rändern.

Selten handelt es sich um ein akutes Geschehen.[25] Eine einseitige Lyse prädisponiert für das spätere bilaterale Auftreten.[26] Die Inzidenz ist je nach Sportart unterschiedlich, insgesamt aber höher als bei nicht Aktiven und betrifft auch Niveaus kranial von L5.[27] Ohne Schmerzen hat die Lyse keinen Krankheitswert.[28] Als Faustregel gilt, dass 90% asymptomatisch bleiben und dass unter den Symptomatischen über 90% auf konservative Massnahmen ansprechen. Bei Sportlern mit symptomatischen Lysen in Frühstadien propagieren wir eine konsequente 2 × 6-wöchige Ruhigstellung im entlordosierenden Gipskorsett.

Eine symptomatische Spondylolyse per se – auch wenn sie wie oft der Fall mit niedriggradigem (I, II) Gleiten kombiniert ist – sehen wir angesichts der guten Prognose nicht a priori als Grund an, den leistungsorientierten Sport zu sistieren. Volle Rückkehr in den Sport nach einer schmerzhaften Episode ist die Regel und korreliert nicht mit der Ausheilung des Parsdefektes.[29] Bei den wenigen Fällen mit mehrmonatiger Therapieresistenz ist eine operative Sanierung und/oder Aufgabe der schmerzprovozierenden Aktivität zu dis-



**Abbildung 4:** 18-jähriger Kraftsportler mit therapieresistenten Rückenschmerzen, welche auch im Alltag bei längerem Stehen und Gehen auftreten.

**4A:** Ausgangsbefund mit Spondylolyse L3, das heisst auf atypischem Niveau. Trotz der schon vorhandenen Sklerosesäumen wird auf Wunsch des Patienten eine 3 Monate dauernde Gipsruhigstellung versucht.

**4B:** 2 Monate nach Gipsabnahme präsentiert sich der Athlet beschwerdefrei und die Lysezone radiologisch konsolidiert.

kutieren. Wir bevorzugen bei gut hydriertem Diskus eine direkte Lyseverschraubung oder sonst eine instrumentierte, monosegmentale Spondylodese.[30]

Das Risiko eines progressiven hochgradigen Gleitens (Grad III und IV) wird durch Sport nicht erhöht. Hauptrisikofaktoren sind die anatomischen Gegebenheiten (Dysplasien, hohe pelvic incidence), der vorhandene Gleitgrad und vor allem das Wachstum. Patienten mit niedergradigem Gleiten sollen daher, selbst wenn es sich um asymptomatische Zufallsbefunde handelt, bis Wachstumsende jährlich radiologisch nachverfolgt werden (lumbosakraler Übergang lateral stehend).[31–34]. Bevorzugt werden strahlungsarme Techniken wie zum Beispiel mit einer EOS-Station.[35] Ein MRT im Liegen unterschätzt aufgrund der fehlenden Schwerkrafteinwirkung den Gleitbefund. Der Gleitgrad korreliert nicht mit den Beschwerden, sodass bei Haltungsauffälligkeiten und bei ausgeprägter Verkürzung der ischiokruralen Muskulatur eine Spondylolisthese ausgeschlossen werden muss. Ein hochgradiges Gleiten mit Kyphosierung von L5 provoziert nämlich eine Kaskade von Kompensationsmechanismen der Wirbelsäule (Hyperlordose der LWS, Lordosierung der BWS, Erhöhung des pelvic tilts mit Hilfe erhöhter Aktivität der Ischiokruralmuskulatur) und der Beine (Knieflexion), selten eine Radikulopathie L5 und ist folglich eine Indikation zur operativen Stabilisierung.

## Diskopathien

Im Wachstumsalter sind sie insgesamt deutlich seltener als bei Erwachsenen, stellen jedoch bei leistungsorientierten jugendlichen Sportlern eine wichtige Differentialdiagnose bei chronischen lumbalen Rückenschmerzen und unauffälligem konventionell-radiologischem Befund dar.[36] Verläufe mit sensomotorischen Ausfälle sind rar und meist Folge eines Hyperextensions-Kompressionstraumas mit einem hinteren Kantenfragment und Diskusprotrusion (meist L4/5, manchmal auch mehreren Niveaus).[37]

Bei Diskopathien entwickeln sich die Schmerzen oft über Wochen progredient. Radikulopathien sind rar, da es sich meist um mediane, relativ breitbasige Vorwölbungen handelt, welche den Rezessus freilassen. Adoleszente präsentieren sich häufig mit auffälligem Gang oder kompensatorischer Haltung, zum Beispiel in Form einer LWS-Kyphose, um die dorsalen Diskusanteile zu entlasten.[38] Rumpffördernde Sportarten in Kombination mit exzessiver Hüftflexion, wie zum Beispiel beim Rudern, scheinen ein höheres Risiko zu bergen.[39] Das Augenmerk soll auch auf die Hüfte gerichtet werden: endgradig schmerzhafte Hüftflexion, zum Beispiel im Rahmen eines femoroazetabulären Impingements, hat eine weiterlaufende Bewegung in die LWS zur Folge, was vor allem bei repetitiven Bewegungen die LWS segmental überlastet. Bei einer jungen Leistungsruderin und einem Triathleten konnten wir diese Zusammenhänge beobachten. Der primäre Therapieansatz ist bei fehlender Neurologie konservativ. Die Prognose von Operationen in Falle von therapieresistenten Schmerzen bei Adoleszenten ist gut.[40]

## Das Wichtigste für die Praxis

Wachstumszonen werden durch Training im Gegensatz zu den meisten anderen Geweben des Bewegungsapparates mechanisch nicht fester. Im Gegenteil, sie werden in der Puber-

tät empfindlicher und können der progressiven Krafteinwirkung bei leistungsorientierten jungen Sportlern nicht immer widerstehen.

Schmerzzustände bei jungen Sportlern sind in der Regel muskulärer Natur und durch konservative Massnahmen meist gut in den Griff zu kriegen. Bei ausbleibender Besserung, einer Deformität oder wenn seltenerweise neurologische Ausfälle, Ruhe- oder Nachtschmerzen vorhanden sind, ist eine fachärztliche Abklärung angezeigt.

Kinderorthopädisches Grundwissen bei den betreuenden Trainern und Sportärzten ist Voraussetzung für eine Früherkennung sowie die zeitnahe Abklärung und Therapie.

Die jugendlichen Athleten bedürfen während der vulnerablen Phase akzelerierten Wachstums einer regelmässigen, standardisierten sportärztlichen Beurteilung, um Wachstumsstörungen und -schäden frühzeitig zu entdecken, das Training anpassen zu können und fixierte Deformitäten mit Langzeitfolgen zu verhindern.

## Autorenanschrift

Prof. Carol C. Hasler  
Chefarzt Orthopädie  
Universitätskinderhospital beider Basel  
Spitalstrasse 33, 4056 Basel  
carolclaudius.hasler@ukbb.ch  
Tel. 061 704 28 03



Dr. Daniel Studer  
Spezialarzt Orthopädie  
Universitätskinderhospital beider Basel  
Spitalstrasse 33, 4056 Basel  
daniel.studer@ukbb.ch  
Tel. 061 704 28 04



## Referenzen

1. Bonnel F, Peruchon E, Baldet P, Dimeglio A, Rabischong P. Effects of compression on growth plates in the rabbit. *Acta orthopaedica Scandinavica*. 1983 Oct;54(5):730-3. PubMed PMID: 6670489.
2. Niehoff A, Kersting UG, Zaucke F, Morlock MM, Bruggemann GP. Adaptation of mechanical, morphological, and biochemical properties of the rat growth plate to dose-dependent voluntary exercise. *Bone*. 2004 Oct;35(4):899-908. PubMed PMID: 15454097.
3. Dimeglio A. Growth in pediatric orthopaedics. *Journal of pediatric orthopedics*. 2001 Jul-Aug;21(4):549-55. PubMed PMID: 11433174.
4. DiMeglio A, Canavese F, Charles YP. Growth and adolescent idiopathic scoliosis: when and how much? *Journal of pediatric orthopedics*. 2011 Jan-Feb;31(1 Suppl):S28-36. PubMed PMID: 21173616.
5. Nissinen M, Heliovaara M, Seitsamo J, Alaranta H, Poussa M. Anthropometric measurements and the incidence of low back pain in a cohort of pubertal children. *Spine*. 1994 Jun;15;19(12):1367-70. PubMed PMID: 8066517.
6. Brattberg G. The incidence of back pain and headache among Swedish school children. *Quality of life research: an international journal of quality of life aspects of treatment, care and rehabilitation*. 1994 Dec;3 Suppl 1:S27-31. PubMed PMID: 7866367.
7. Sato T, Ito T, Hirano T, Morita O, Kikuchi R, Endo N, et al. Low back pain in childhood and adolescence: a cross-sectional study in Niigata City. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 2008 Nov;17(11):1441-7. PubMed PMID: 18830637. Pubmed Central PMCID: 2583196.
8. Sato T, Ito T, Hirano T, Morita O, Kikuchi R, Endo N, et al. Low back pain in childhood and adolescence: assessment of sports activities.

- European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society. 2011 Jan;20(1):94-9. PubMed PMID: 20582557. Pubmed Central PMCID: 3036027.
9. Hangai M, Kaneoka K, Okubo Y, Miyakawa S, Hinotsu S, Mukai N, et al. Relationship between low back pain and competitive sports activities during youth. *The American journal of sports medicine*. 2010 Apr;38(4):791-6. PubMed PMID: 20051500.
  10. Horne J, Cockshott WP, Shannon HS. Spinal column damage from water ski jumping. *Skeletal radiology*. 1987;16(8):612-6. PubMed PMID: 3423830.
  11. Hutchinson MR. Low back pain in elite rhythmic gymnasts. *Medicine and science in sports and exercise*. 1999 Nov;31(11):1686-8. PubMed PMID: 10589874.
  12. Rachbauer F, Sterzinger W, Eibl G. Radiographic abnormalities in the thoracolumbar spine of young elite skiers. *The American journal of sports medicine*. 2001 Jul-Aug;29(4):446-9. PubMed PMID: 11476384.
  13. Bron JL, van Royen BJ, Wuisman PI. The clinical significance of lumbosacral transitional anomalies. *Acta orthopaedica Belgica*. 2007 Dec;73(6):687-95. PubMed PMID: 18260478.
  14. Naffaa L, Irani N, Saade C, Sreedher G. Congenital anomalies of lumbosacral spine: A pictorial review. *Journal of medical imaging and radiation oncology*. 2017 Apr;61(2):216-24. PubMed PMID: 27469617.
  15. Wojtys EM, Ashton-Miller JA, Huston LJ, Moga PJ. The association between athletic training time and the sagittal curvature of the immature spine. *The American journal of sports medicine*. 2000 Jul-Aug;28(4):490-8. PubMed PMID: 10921639.
  16. Burwell RG, Dangerfield PH. The NOTOM hypothesis for idiopathic scoliosis: is it nullified by the delayed puberty of female rhythmic gymnasts and ballet dancers with scoliosis? *Studies in health technology and informatics*. 2002;91:12-4. PubMed PMID: 15457686.
  17. Tanchev PI, Dzherov AD, Parushev AD, Dikov DM, Todorov MB. Scoliosis in rhythmic gymnasts. *Spine*. 2000 Jun;01;25(11):1367-72. PubMed PMID: 10828918.
  18. Wade M, Campbell A, Smith A, Norcott J, O'Sullivan P. Investigation of spinal posture signatures and ground reaction forces during landing in elite female gymnasts. *Journal of applied biomechanics*. 2012 Dec;28(6):677-86. PubMed PMID: 22661081.
  19. Ogon M, Riedl-Huter C, Sterzinger W, Krismer M, Spratt KF, Wimmer C. Radiologic abnormalities and low back pain in elite skiers. *Clinical orthopaedics and related research*. 2001 Sep(390):151-62. PubMed PMID: 11550861.
  20. Graat HC, van Rhijn LW, Schrandner-Stumpel CT, van Ooij A. Classical Scheuermann disease in male monozygotic twins: further support for the genetic etiology hypothesis. *Spine*. 2002 Nov 15;27(22):E485-7. PubMed PMID: 12436008.
  21. van Linthoudt D, Revel M. Similar radiologic lesions of localized Scheuermann's disease of the lumbar spine in twin sisters. *Spine*. 1994 Apr;15(8):987-9. PubMed PMID: 8009360.
  22. Biedert RM, Friederich NF, Gruhl C. Sacral osseous destruction in a female gymnast: unusual manifestation of Scheuermann's disease? *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*. 1993;1(2):110-2. PubMed PMID: 8536005.
  23. Ristolainen L, Kettunen JA, Heliövaara M, Kujala UM, Heinonen A, Schlenzka D. Untreated Scheuermann's disease: a 37-year follow-up study. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 2012 May;21(5):819-24. PubMed PMID: 22101868. Pubmed Central PMCID: 3337904.
  24. Skaggs DL, Avramis I, Myung K, Weiss J. Sacral facet fractures in elite athletes. *Spine*. 2012 Apr;15;37(8):E514-7. PubMed PMID: 21971126.
  25. Glazer M, Sagar VV, Welch K. Radiograph of the month. Acute stress fracture of the pars interarticularis of the right half of L2 vertebral body. *Delaware medical journal*. 1994 Feb;66(2):91-2. PubMed PMID: 8181639.
  26. Sairyo K, Katoh S, Sasa T, Yasui N, Goel VK, Vadapalli S, et al. Athletes with unilateral spondylolysis are at risk of stress fracture at the contralateral pedicle and pars interarticularis: a clinical and biomechanical study. *The American journal of sports medicine*. 2005 Apr;33(4):583-90. PubMed PMID: 15722292.
  27. Schroeder GD, LaBella CR, Mendoza M, Daley EL, Savage JW, Patel AA, et al. The role of intense athletic activity on structural lumbar abnormalities in adolescent patients with symptomatic low back pain. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 2016 Sep;25(9):2842-8. PubMed PMID: 27294387.
  28. Sakai T, Sairyo K, Suzue N, Kosaka H, Yasui N. Incidence and etiology of lumbar spondylolysis: review of the literature. *Journal of orthopaedic science: official journal of the Japanese Orthopaedic Association*. 2010 May;15(3):281-8. PubMed PMID: 20559793.
  29. Sousa T, Skaggs DL, Chan P, Yamaguchi KT, Jr., Borgella J, Lee C, et al. Benign Natural History of Spondylolysis in Adolescence With Midterm Follow-Up. *Spine deformity*. 2017 Mar;5(2):134-8. PubMed PMID: 28259265.
  30. Snyder LA, Shufflebarger H, O'Brien MF, Thind H, Theodore N, Kakarla UK. Spondylolysis outcomes in adolescents after direct screw repair of the pars interarticularis. *Journal of neurosurgery Spine*. 2014 Sep;21(3):329-33. PubMed PMID: 24949906.
  31. Seitsalo S, Osterman K, Hyvarinen H, Tallroth K, Schlenzka D, Pousa M. Progression of spondylolisthesis in children and adolescents. A long-term follow-up of 272 patients. *Spine*. 1991 Apr;16(4):417-21. PubMed PMID: 2047915.
  32. Seitsalo S, Osterman K, Pousa M, Laurent LE. Spondylolisthesis in children under 12 years of age: long-term results of 56 patients treated conservatively or operatively. *Journal of pediatric orthopedics*. 1988 Sep-Oct;8(5):516-21. PubMed PMID: 3170727.
  33. Pawar A, Labelle H, Mac-Thiong JM. The evaluation of lumbosacral dysplasia in young patients with lumbosacral spondylolisthesis: comparison with controls and relationship with the severity of slip. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 2012 Nov;21(11):2122-7. PubMed PMID: 22327186. Pubmed Central PMCID: 3481098.
  34. Toueg CW, Mac-Thiong JM, Grimard G, Poitras B, Parent S, Labelle H. Spondylolisthesis, Sacro-Pelvic Morphology, and Orientation in Young Gymnasts. *Journal of spinal disorders & techniques*. 2015 Jul;28(6):E358-64. PubMed PMID: 24201157.
  35. Luo TD, Stans AA, Schueler BA, Larson AN. Cumulative Radiation Exposure With EOS Imaging Compared With Standard Spine Radiographs. *Spine deformity*. 2015 Mar;3(2):144-50. PubMed PMID: 27927305.
  36. Ozgen S, Konya D, Toktas OZ, Dagainar A, Ozek MM. Lumbar disc herniation in adolescence. *Pediatric neurosurgery*. 2007;43(2):77-81. PubMed PMID: 17337916.
  37. Ehni G, Schneider SJ. Posterior lumbar vertebral rim fracture and associated disc protrusion in adolescence. *Journal of neurosurgery*. 1988 Jun;68(6):912-6. PubMed PMID: 3373287.
  38. Atalay A, Akbay A, Atalay B, Akalan N. Lumbar disc herniation and tight hamstrings syndrome in adolescence. *Child's nervous system: ChNS: official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2003 Feb;19(2):82-5. PubMed PMID: 12607024.
  39. Maurer M, Soder RB, Baldisserotto M. Spine abnormalities depicted by magnetic resonance imaging in adolescent rowers. *The American journal of sports medicine*. 2011 Feb;39(2):392-7. PubMed PMID: 20889986.
  40. Pousa M, Schlenzka D, Maenpaa S, Merikanto J, Kinnunen P. Disc herniation in the lumbar spine during growth: long-term results of operative treatment in 18 patients. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 1997;6(6):390-2. PubMed PMID: 9455666. Pubmed Central PMCID: 3467727.