Journal of Medical Sciences. 29 May, 2025 - Volume 13 | Issue 3. Electronic - ISSN: 2345-0592
Medical Sciences 2025 Vol. 13 (3), p. 49-65, https://doi.org/10.53453/ms.2025.5.5

e-ISSN: 2345-0592
Online issue
Indexed in *Index Copernicus*

Medical Sciences

Official website:
www.medicsciences.com

Anterior cruciate ligament reconstruction in children: the importance of preserving growth plates

Mindaugas Masteika[1], Nojus Mūras[2]

[1]*Lithuanian University of Health Sciences, Kauno klinikos, Orthopaedics department, Kaunas, Lithuania*

[2]*Lithuanian University of Health Sciences, Faculty of Medicine, Lithuania, Kaunas, Lithuania*

Abstract

Introduction. Anterior cruciate ligament (ACL) injuries are increasingly common among children and adolescents due to higher physical activity levels and early engagement in competitive sports. Untreated ACL tears may result in joint instability, meniscal and cartilage damage, and early-onset osteoarthritis.

Objective. To review the prevalence, injury mechanisms, surgical techniques, and outcomes of ACL reconstruction in skeletally immature patients, with emphasis on growth plate preservation.

Methods. A systematic literature review was conducted using PubMed, Cochrane Library, and Google Scholar databases (January 1986–April 2024). Search terms included: anterior cruciate ligament, ACL, pediatric, adolescent, growth plate, physeal-sparing, physeal-respecting, reconstruction, outcomes. Only English-language studies were included; adult-only populations and studies lacking surgical or growth-related data were excluded. A total of 59 relevant articles were analyzed.

Results. Transphyseal techniques are preferred in Tanner stages 3–4, while intraepiphyseal or physeal-sparing approaches are recommended for younger children. Combined ACL and anterolateral ligament reconstruction lowers reinjury risk but may increase angular deformity rates. Growth disturbances (genu valgum, genu varum, limb length discrepancies) occur in up to 5% of cases, primarily due to incorrect tunnel placement or fixation. Delayed surgery beyond 6–12 months increases the risk of secondary joint damage. With appropriate technique selection, most children achieve good-to-excellent function, as measured by the Pedi-IKDC scale..

Conclusions. Age and growth stage-specific surgical planning is essential. Early, well-chosen ACL reconstruction minimizes complications and preserves joint function.

Keywords: anterior cruciate ligament, injury, pediatric orthopedics, knee stability, growth plates, reconstruction.

Priekinio kryžminio raiščio rekonstrukcija vaikams: augimo plokštelių išsaugojimo svarba

Mindaugas Masteika[1], Nojus Mūras[2]

[1]*Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, Kauno klinikos, Ortopedijos-traumatologijos klinika, Kaunas, Lietuva*

[2]*Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, Medicinos fakultetas, Kaunas, Lietuva*

Santrauka

Įvadas. Vaikų ir paauglių priekinio kryžminio raiščio (PKR) traumos vis dažnesnės dėl augančio fizinio aktyvumo ir vis ankstesnio įsitraukimo į intensyvias sporto treniruotes. Negydytas PKR plyšimas gali sukelti kelio sąnario nestabilumą, meniskų bei kremzlės pažeidimus ir ankstyvą osteoartrozę.

Tyrimo tikslas. Įvertinti PKR plyšimo paplitimą, mechanizmą, rekonstrukcijos metodikas vaikams ir paaugliams, jų efektyvumą bei įtaką ilgalaikiams rezultatams, ypač augimo plokštelių išsaugojimui.

Metodai. Mokslinės literatūros paieška atlikta „PubMed“, „Cochrane Library“ ir „Google Scholar“ duomenų bazėse nuo 1986 m. sausio iki 2024 m. Siekta, kad 50 procentų šaltinių būtų nesenesni nei 2020 metai. Buvo naudojami šie raktažodžiai ir jų deriniai: anterior cruciate ligament, ACL, pediatric, adolescent, growth plate, physeal-sparing, physeal-respecting, reconstruction, outcomes. Paieška apribota straipsniais anglų kalba. Neįtraukti atvejai, kai tyrimai atlikti tik su suaugusiais pacientais; trūksta duomenų apie chirurginę techniką ar augimo komplikacijas; Iš viso įtraukti 59 straipsniai.

Rezultatai. Tanner 3–4 stadijoje PKR rekonstrukcijai dažniausiai naudojami transfizinai metodai, o jaunesniems vaikams intraepifiziniai. Kombinuota PKR ir anterolateralinio raiščio rekonstrukcija sumažina pakartotinių plyšimų riziką, tačiau gali padidinti kampinių deformacijų riziką. Genu valgum, genu varum ar galūnių ilgio skirtumai, pasitaiko iki 5 % atvejų – dažniausiai dėl netinkamos tunelių vietos, neadekvačios fiksacijos. Delsiant rekonstrukciją daugiau nei 6–12 mėn., žymiai išauga meniskų ir kremzlės pažeidimų rizika. Tinkamai parinkus chirurginę taktiką, dauguma vaikų pasiekia gerą kelio funkcijos lygį pagal Pedi-IKDC skalę.

Išvados. Optimalus gydymas priklauso nuo paciento amžiaus, augimo stadijos ir fizinio aktyvumo. Ankstyva, tiksliai parinkta PKR rekonstrukcija gali užkirsti kelią antriniams pažeidimams.

Raktažodžiai. priekinis kryžminis raištis, trauma, vaikų ortopedija, kelio stabilumas, augimo plokštelės, rekonstrukcija.

1. Įvadas

Vaikų ir paauglių priekinio kryžminio raiščio (PKR) traumos tampa vis dažniau sutinkama problema tiek vaikų ortopedijoje, tiek sporto medicinoje. [1] Šios traumos kelia rimtų iššūkių vaikų ortopedijoje ir sporto medicinoje, nes ne tik sukelia kelio sąnario nestabilumą, bet ir didina meniskų bei kremzlės pažeidimų, ankstyvos osteoartrozės riziką [1,2]. Vaikų skeletas vis dar vystosi, todėl chirurginis gydy-mas turi būti atliekamas itin atsargiai – pagrindinis tikslas yra užtikrinti sąnario stabilumą nepažeidžiant augimo plokštelių, nes jų pažeidimas gali lemti galūnės deformacijas ar ilgio skirtumus [3]. Anksčiau konservatyvus gydymas buvo laikomas saugiausiu pasirinkimu dėl mažos rizikos pakenkti augimui, tačiau vis daugiau mokslinių įrodymų rodo, kad neoperuotos PKR traumos dažnai lemia prastesnius ilgalaikius rezultatus, ypač aktyviems vaikams [2]. Šiuo metu intensyviai diskutuojama apie skirtingų rekonstrukcijos metodų taikymą, jų biomechaninį poveikį bei galimą riziką augimo zonoms [4].

Šiame straipsnyje siekiama išsamiai išanalizuoti vaikų ir paauglių PKR rekonstrukcijos metodus, įvertinti jų efektyvumą, komplikacijų dažnį bei poveikį augimo plokštelėms. Remiantis naujausiais moksliniais duomenimis, bus aptariamos skirtingos chirurginės technikos, jų indikacijos ir ilgalaikiai rezultatai, taip pat nagrinėjama reabilitacijos svarba, grįžimo į sportą po traumos kriterijai bei PKR rekonstrukcijos įtaka kelio sąnario biomechanikai.

2. Metodai:

Mokslinės literatūros paieška atlikta „PubMed“, „Scopus“, „Cochrane Library“ ir „Google Scholar“ duomenų bazėse nuo 1986 m. sausio iki 2024 m. kovo mėn. Siekta, kad 50 procentų šaltinių būtų nesenesni nei 2020 metai. Buvo naudojami šie pagrindiniai raktažodžiai ir jų deriniai: *anterior cruciate ligament*, *ACL*, *pediatric*, *adolescent*, *growth plate*, *physeal-sparing*, *physeal-respecting*, *reconstruction*, *outcomes*, *complications*. Taip pat naudoti „MeSH“ terminai. Paieška apribota straipsniais anglų kalba. Į apžvalgą įtraukti originalūs tyrimai, sisteminės apžvalgos ir metaanalizės, kuriuose: nagrinėjami vaikų ir paauglių (iki 18 m.) PKR plyšimai; vertinami chirurginiai rekonstrukcijos metodai; analizuojami augimo plokštelių pažeidimų pavojai ir ilgalaikiai funkciniai rezultatai; pateikiami aiškūs metodiniai duomenys ir statistiniai rezultatai. Neįtraukti atvejai, kai: tyrimai atlikti tik su suaugusiais pacientais; trūksta duomenų apie chirurginę techniką ar augimo komplikacijas.

3. Rezultatai

Didėjantis vaikų fizinis aktyvumas bei ankstyvas įsitraukimas į specializuotas sporto programas lemia išaugusį priekinio kryžminio raiščio (PKR) traumų skaičių..[2] Priekinis kryžminis raištis yra viena svarbiausių kelio sąnario struktūrų, užtikrinančių pasyvų kelio stabilumą. Jis neleidžia blauzdikauliui per daug pasislinkti į priekį šlaunikaulio atžvilgiu ir padeda kontroliuoti kelio sukamąjį judėjimą. Ši funkcija atliekama drauge su kitomis stabilumą palaikančiomis struktūromis, tokiomis kaip anterolateralinis raištis (ALR) ir užpakalinis-šoninis kelio kampas (angl. *posterolateral corner*, sutrumpintai PLC).[5]

Vaikų ir paauglių PKR traumos kelia daug diskusijų dėl dviejų pagrindinių priežasčių:

1. PKR plyšimas gali sukelti nestabilumą, dėl kurio atsiranda meniskų, kremzlių pažeidimai, prastesnė ilgalaikė kelio funkcija bei ankstyva artrozė.[6]
2. Chirurginis PKR atkūrimas neturėtų pakenkti aktyviems augimo procesams, vykstantiems epifizėse. Būtent todėl skirtingi PKR rekonstrukcijos metodai buvo adaptuojami taip, kad minimalizuotų fizės pažeidimą.[7]

Istoriškai vyraujantis sprendimas – konservatyvus gydymas, kol vaikas pasieks visišką skeleto brandą, siekiant išvengti jatrogeninių augimo sutrikimų. Tačiau literatūroje aprašyta nemažai atvejų, kai nestabilumas lemia didelės apimties antrinius pažeidimus, ypač meniskų suirimo, kremzlės traumų ar kelio degeneracijos procesus, net vaikams.[8] Šiuolaikinis požiūris – ankstyva, gerai apgalvota PKR rekonstrukcija su specialiai parinktomis metodikomis, pritaikytomis vaiko amžiui.

3.1. PKR anatomija

Priekinis kryžminis raištis (PKR) suaugusiojo kelyje paprastai apibūdinamas kaip 2 stambių pluoštų raištis: priekinis-medialinis (angl. *anteromedial*, AM) ir užpakalinis-šoninis (angl. *posterolateral,* PL).[9] Šie pluoštai koordinuotai veikia skirtingais kelio lenkimo kampais ir yra atsakingi už stabilų blauzdikaulio poslinkį bei sukamąjį stabilumą.[9] Priekinio kryžminio raiščio sudėtyje esantis anteromedialinis (AM) pluoštas labiau įsitempia ir aktyviau veikia, kai kelis yra labiau sulenktas, o posterolateralinis (PL) pluoštas svarbesnis, kai kelis sulenktas nedaug – maždaug nuo 0 iki 30° kampu.[10] Vaikų anatomija iš esmės pasižymi tokia pačia PKR pluoštų sandara, tačiau egzistuoja keli svarbūs skirtumai:

1. Epifizinis (augimo) kremzlinis audinys aplink PKR tvirtinimosi vietas yra gerokai labiau išreikštas nei suaugusiųjų. Tai reiškia, kad tose vietose esantis kaulas dar nėra visiškai subrendęs – jis minkštesnis, silpniau mineralizuotas ir mažiau atsparus mechaniniam poveikiui [10].
2. Kadangi vaikams vis dar vyksta aktyvus augimas, jų PKR gali šiek tiek skirtis nuo suaugusiųjų – būti plonesnis arba trumpesnis. Tai priklauso nuo vaiko amžiaus, ūgio ir lyties. Kai kurie tyrimai nurodo, kad šie skirtumai yra pastebimi, tačiau gali būti labai individualūs [11].
3. Augimo plokštelių (fizių) srityje esantis intensyvus kraujotakos tinklas ir kremzlinis audinys padidina riziką, jog bet kokia chirurginė intervencija šalia šių zonų gali paveikti normalų skeleto augimą. Dėl šios priežasties labai svarbu tiksliai suplanuoti, kur gręžiami kauliniai tuneliai, vengti didelių metalinių sraigtų ties fizėmis [10;12].

Be to, vaikams – ypač jaunesniems, esantiems ankstyvose brendimo stadijose (Tanner 1–2) – PKR anatominę padėtį sunkiau tiksliai atkartoti, nes jų kauliniai orientyrai dar nėra iki galo susiformavę. Pavyzdžiui, tarpkondilinės ertmės forma ar šlaunikaulio vidinio krumplio (*condylus medialis*) anatominė struktūra dar gali būti nepakankamai išreikšta [10]. Todėl labai svarbu gerai išmanyti vaikų anatominius ypatumus, kad būtų galima parinkti tinkamą chirurginę techniką ir išvengti augimo plokštelių (fizių) pažeidimo.

Biomechaniškai vaikų priekinis kryžminis raištis (PKR) veikia taip pat kaip ir suaugusiųjų – jis padeda palaikyti kelio sąnario stabilumą, neleidžia blauzdikauliui per daug pasislinkti į priekį bei apsaugo nuo nepageidaujamų sukamųjų judesių.

• Tyrimai rodo, kad PKR yra atsakingas už maždaug 85 % blauzdos judėsio į priekį stabdymo, kai kelis yra sulenktas tarp 30° ir 90° kampu [13]. Toks kelio kampas dažnai pasitaiko aktyvios veiklos metu, pavyzdžiui, šuolio ar greito krypties pakeitimo metu, todėl PKR ypač svarbus sportuojantiems vaikams.

• Papildomą stabilumą kelio sąnariui suteikia anterolateralinis raištis (ALR), kuris ypač aktyvus esant nedideliam kelio lenkimui – tuo metu, kai PKR užpakalinis-šoninis (PL) pluoštas dar nėra stipriai įtemptas. Vaikų ALR struktūra yra labai panaši į suaugusiųjų, tačiau kai kuriuose tyrimuose nurodoma, kad vaikų ALR gali būti kiek siauresnis

ar turėti mažiau skaidulų [14]. Matavimai rodo, kad ALR tvirtinasi atskirai nuo PKR, o pažeidus PKR, šis raištis dažnai irgi būna sužeistas [15]

Papildomai, svarbu suprasti ir kitus biomechaninius veiksnius, kurie daro įtaką vaikų kelio sąnario stabilumui:

• Vaikų kelio sąnaryje jėgos gali pasiskirstyti kitaip nei suaugusiųjų dėl ne iki galo išsivysčiusio raumenų balanso. Dėl to, tam tikros sukamąją jėgą veikiančios apkrovos gali labiau apkrauti priekinį kryžminį (PKR) ar anterolateralinį (ALR) raiščius. Pavyzdžiui, aukštesni ir sunkesni paaugliai, kurių raumenys dar nėra pakankamai stiprūs, turi didesnę riziką patirti PKR traumą [10].

• Koordinacijos trūkumas taip pat yra svarbus rizikos veiksnys. Vaikams ne visada būna iki galo išsivystę judėjimo įgūdžiai – ypač greitas krypties keitimas ar staigus stabdymas. Dėl šios priežasties jų kelio raiščiai gali patirti didesnę apkrovą [10;11].

• Intensyvi sportinė veikla, kurioje reikia greitų startų, šuolių ar staigių sustojimų (pvz., krepšinis, futbolas), sukuria didelę apkrovą PKR. Jei kelio biomechanika nėra ideali – net ir nedidelis nukrypimas ar silpnas raumenų paruošimas – gali sukelti raiščio plyšimą [10;12]

3.2. Paplitimas

Paskutinių dešimtmečių duomenimis, PKR traumos vaikams (iki ~16-18 m.) sudaro apie 1–3% visų PKR sužalojimų, tačiau kai analizuojami duomenys aukšto lygio jaunimo sportininkų kontekste (pvz., jauniems futbolininkams ar krepšininkams), šis rodiklis gali būti ženkliai didesnis.[16] Keli tyrimai rodo, kad tam tikrose specializuotose akademijose (futbolo, gimnastikos) PKR sužalojimai vaikams gali siekti net 5–8% visų traumų.[17] Taigi "oficialus" 1–3% skaičius gali būti nuvertinantis esamą realybę, nes daug lengvesnių ar subklinikinių PKR traumų galimai nediagnozuojamos.

PKR dažnis taip pat susijęs su tuo, kad vaikai šiais laikais vis anksčiau pradeda specializuotus treniruočių ciklus, rungtyniauja dažniau, ilgiau trunka sporto varžybų sezonai, mažiau pertraukų tarp varžybų[18]. Specialistai pabrėžia, kad 14–16 metų mergaitėms ir 16–17 metų berniukams fiksuojami aukščiausi PKR plyšimų rodikliai [19]. Dažnai tai siejama su intensyviausiu augimo spurtu bei su brendimo laikotarpio hormoniniais pokyčiais, galinčiais paveikti raiščio elastingumą ir raumenų-kineziologinius santykius.

Lyties specifika

Daug studijų suaugusių populiacijoje nurodo, kad moterys turi ~2–8 kartus didesnę PKR plyšimo riziką lyginant su vyrais.[20] Vaikystėje (<12 m.) šis skirtumas dar nebūna itin ryškus, galbūt dėl to, kad raumenų masės, ūgio, jėgų santykiai dar nėra tiek išsiskyrę tarp berniukų ir mergaičių [10]. Tačiau paauglystėje skirtumas išryškėja, ypač tarp aktyviai sportuojančių mergaičių, kurios gali turėti didesnę predispoziciją dėl didesnio Q kampo klube (keturgalvio raumens kampas, kuris apibūdina, kaip šlaunies raumenys traukia girnelę judesio metu), hormonų poveikio, galimai silpnesnio pakinklinio raumens atsako staigių stabdymų metu, prastesnės klubo stabilizacijos.[20] Kai kurie tyrimai teigia, kad tarp 10–14 metų sportuojančių vaikų, PKR plyšimų dažnis tarp lyčių statistiškai reikšmingai nesiskiria.[21]

Sportas ir mechanizmai

Daugiau nei 50% vaikų PKR plyšimų fiksuojama futbolo, krepšinio, rankinio ir slidinėjimo metu [18]. Dažniausias pažeidimo mechanizmas – netiesioginis: fiksuota pėda ant dangos (žolės, parketo), kelis šiek tiek sulenktas, o liemuo staigiai sukamas ar keičiama kryptis, blauzdai slystant ar bandant stabilizuotis.[22] Kitas mechanizmas – tiesioginis kontaktas su varžovu (pvz., futbolo dvikova), kai kelis priverstinai sukamas [6].

Augimo spurtas

Brendimo ir intensyvaus augimo 6rauma (PHV – angl. *Peak height velocity*) raumenų–sausgyslių–griaučių 6rauma6 patiria tam tikrą disproporciją: kaulai greitai ilgėja, raumenys gali nespėti adaptuotis ilgiui ir jėgai, todėl sausgyslės ir raiščiai patiria didesnes apkrovas.[6] Kartu keičiasi ir kūno biomechanika, svorio centro padėtis [6].

- *Kūno disproporcija*: galūnės pailgėja labiau nei liemuo, todėl laikinas nekoordinuotumas, didesnė judesių 6rauma6de, prastesnė propriorecepcija – viskas predisponuoja PKR 6rauma.
- *Hormoniniai pokyčiai*: estrogeno lygio augimas merginoms gali mažinti kolageno standumą, didinti PKR laisvumą. Berniukams staigus kūno masės šuolis, jei neatitinka raumenų jėgos didėjimo, taip pat kenkia stabilumui.[23]

Statistiškai pikas PKR traumų atvejų sutampa su PHV. Patariama būtent 12-15 metų taikyti specialias pratimų programas (pavyzdžiui, neuromuskulinės treniruotės programa, angl. *"neuromuscular training program"*), siekiant minimalizuoti traumų tikimybę profesionaliai užsiimant sportine veikla[24] Pripažįstama, kad PKR sužalojimo rizika ir pasekmės vaikams/paaugliams ženkliai priklauso nuo sporto, lyties, brendimo stadijos, augimo spurtų bei biomechanikos adaptacijos.

3.3. Vaikų/pauglių pkr sužalojimo pasekmės

Nestabilumas ir meniskų pažeidimai

Kelio nestabilumas po PKR plyšimo vaikams gali sukelti rimtų antrinių padarinių, iš kurių dažniausias – meniskų pažeidimai.[25] Meniskai atlieka itin reikšmingą biomechaninį vaidmenį paskirstant sąnarinį spaudimą ir padedant stabilizuoti kelio sąnarį [26]. Vaikams, kurių kelis tampa nestabilus po PKR traumų, meniskai yra nuolat veikiami padidintų netolygių jėgų, galinčių lemti meniskų nusidėvėjimą, plyšimą ar degeneraciją [25]. Medialiniai meniskai statistiškai dažniau pažeidžiami dėl artimesnio prisitvirtinimo prie kapsulės ir mažesnio paslankumo.[27] Visų pirma, meniskokapsulinės zonos (*pars meniscocapsularis*) yra jautrūs regionai, kuriuose pasitaiko „ramp" tipo plyšimų. Nesavalaikis nestabilaus kelio gydymas dažnai lemia šių pažeidimų progresavimą, galiausiai pereinantį į didelius menisko kūno plyšimus.[25] Tuo tarpu lateraliniai meniskai gali patirti traumą dėl intensyvių rotacinių jėgų, ypač kartu su nestabilumo komponentu.[25] Neretas atvejis, kai vaikams tenka atlikti menisko dalinę rezekciją, o kartais ir kyla menisko transplantacijos poreikis, siekiant palaikyti sveiką kelio sąnario biomechaniką. Specialistai nurodo, jog maždaug iki 80% menisko traumų susiję su PKR nestabilumu vaikų amžiuje, jei nėra laiku atkuriamas raiščio stabilumas [28]. Šios problemos komplikuojasi, jei pažeidžiami meniskai nėra laiku sutvarkomi artroskopiškai arba jei vaikas lieka su nuolatine nestabilia kelio padėtimi.

Kremzlės pakitimai

Dėl pasikartojančios subluksacijos ar mikrotraumos (ypač kai kelis nestabilus), vaikams gali atsirasti kremzlės pakitimai, apimantys [9]:

1. **Chondromaliaciją** – išopėjimą, suminkštėjimą,
2. **Degeneracines zonas** – kremzlės plonėjimą,
3. **Ankstyvos artrozės pradmenis** – ypač jei nestabilumas tęsiasi ilgą laiką.

Vaikų sąnarių kremzlė paprastai turi geresnes regeneracines savybes nei suaugusiųjų, tačiau nuolatinis nestabilumas gali greitai sukelti didelius pažeidimus [29]. Ši priežastis lemia tai, kad net menkiausias PKR deficitas vaikams privalo būti vertinamas rimtai, norint išvengti ilgalaikio degeneracinio proceso. Kai kuriuose tyrimuose nurodoma, jog ≥50% paauglių su lėtine PKR trauma vėlesniame amžiuje turi pastebimus artrozės požymius rentgeno nuotraukose, palyginti su tik 5–10% tų, kuriems PKR stabilumas buvo greitai atkurtas.[30]

Psichologiniai veiksniai

Staigus mėgstamo sporto veiklos nutraukimas dėl PKR traumos turi ne tik fizinių, bet ir psichologinių pasekmių [31]. Paaugliams, ypač intensyviai dalyvaujantiems sportinėje veikloje kelio sąnario nestabilumas ar reabilitacijos procesas gali sukelti[31]:

- **Stresą**: baimė, kad trauma pasikartos, psichologinis spaudimas sugrįžti į tą patį sporto lygį.
- **Savivertės problemas**: praradus galimybę treniruotis, pablogėja socialinis, emocinis stabilumas, didėja izoliacijos pojūtis.
- **Motyvacijos praradimas**: pastebėta, kad po traumos atletai neretai jaučia esą praradę perspektyvas sporte.

Kai kurie tyrimai parodė, kad paaugliai, patyrę PKR traumą, reabilitacijos eigoje dažnai išgyvena "kineziofobiją" – judesių ar grįžimo į veiklą baimę. Tai gali paveikti bendrus atsigavimo rodiklius, lėtinti reabilitaciją, ilginti laiką, kol pasiekiamas pasitikėjimas savo kelio būkle.[32]

3.4. Augimo plokštelės ir augimo sutrikimų rizika

Vaikams atliekant PKR rekonstrukciją, būtina atsižvelgti į augimo plokštelių (fizių) jautrumą chirurginiam poveikiui. Netiksliai suformuoti kauliniai tuneliai ar didelės fiksavimo sistemos gali pažeisti fizes, sukelti dalinę epifiziodezę arba lemti netolygų augimą – tai gali išsivystyti į genu valgum, genu varum ar galūnių ilgio skirtumus [33–36].Dažniausi mechanizmai, lemiantys augimo sutrikimus, yra:

1. per dideli arba netiksliai orientuoti kauliniai tuneliai,
2. fiksacijos medžiagų invazija į fizių zoną,
3. transplantų sukeltas nuolatinis traukimas (tenodezės efektas),
4. padidėjusi kraujotaka po traumos (hipervaskuliarizacija), galinti lemti „peraugimą“ – kai operuota koja tampa ilgesnė [35,36].

Literatūroje išskiriami pagrindiniai augimo sutrikimų tipai: ašies deformacijos dėl epifiziodezės, kojų ilgio skirtumai dėl peraugimo, bei augimo asimetrijos dėl nuolatinės įtampos [36–38]. Nors šios komplikacijos pasitaiko retai (iki 5 % atvejų), jos gali turėti ilgalaikių pasekmių, todėl chirurginė taktika turi būti individualizuota ir itin preciziška.

3.5. Gydymo taktika

Nepaisant pokyčių ir naujų metodikų, priekinio kryžminio raiščio (PKR) sužalojimai vaikystėje / paauglystėje išlieka sudėtingas iššūkis specialistams. Pagrindinis gydymo tikslas – suvaldyti kelio sąnario nestabilumą, užkirsti kelią antriniams meniskų bei kremzlės pažeidimams ir, jei įmanoma, išvengti augimo sutrikimų. Pasirenkant gydymą, reikia kruopščiai įvertinti sužalojimo laipsnį, paciento brendimo stadiją, fizinio aktyvumo lygį, šeimos ir vaiko lūkesčius.

Konservatyvus gydymas

Tradiciškai buvo manoma, kad, esant daliniam PKR plyšimui ar labai jauniems vaikams (iki ~8–9 metų), kuriems neplanuojamas intensyvus sportinis krūvis, verta bandyti konservatyvų gydymą [39]. Jį paprastai sudaro:

- **Ortopedinis režimas** (pvz. kelio įtvaras),
- **Kineziterapija** (koordinacijos, pusiausvyros, pakinklinio raumens, keturgalvio raumens stiprinimas),
- **Žaidimų ir varžybų modifikavimas** (vengiama sukamojo tipo judesių, šuolių, didelių greičių).

Nepaisant to, nemažai mokslinių darbų rodo, kad tokio konservatyvaus gydymo rezultatai – prieštaringi. Didelė dalis vaikų, kuriems nepavyksta atkurti kelio stabilumo, ilgainiui patiria pakartotinius meniskų plyšimus, kremzlinius

pažeidimus, kuriuos atitaisyti vėliau tampa sudėtinga. Pavyzdžiui, viename prospektyviniame tyrime su 45 vaikais, kuriems taikytas tik konservatyvus gydymo režimas, net 63% vaikų per 2 metus išsivystė naujų menisko sužalojimų ar netgi degeneracinių pokyčių.[40] Ypač meniskų sužalojimas daro didelę įtaką ilgalaikei sąnario sveikatai, kadangi gali sukelti progresuojančią kremzlės degeneraciją.

Visgi, konservatyvus gydymas išlieka variantas labai jauniems vaikams (iki ~8 metų), kurie neturi ryškių nestabilumo simptomų, intensyvių fizinių veiklų ir kurių kelio funkcija tinkama kasdieninei veiklai, gydyti.[39] Visgi, net ir tokiu atveju rekomenduojama atidžiai stebėti (kelių mėnesių intervalais) kelio būklę bei meniskus. Jei tik pastebimi progresuojantys menisko pažeidimai ar nestabilumas, paprastai pereinama prie chirurginio gydymo.

Indikacijos chirurgijai

Chirurginis gydymas laikomas būtinu, kai tenkinamos šios sąlygos [20]:

1. **Pilnas PKR plyšimas** – rodo didelę nestabilumo tikimybę, ypač sportojant.
2. **Aktyvus vaikas/paauglys** – norintis grįžti į sukamojo judesio sporto šakas (futbolą, krepšinį, rankinį, tenisą).
3. **Ryškus nestabilumas** – kliniškai ar instrumentiškai fiksuojamas >5 mm priekinis atlaisvėjimas (KT-1000/2000 matavimuose), funkciniai pakitimai (kelio "paslydimo" epizodai) ar antriniai menisko pažeidimai.

Kai kurie chirurgai vis dar siūlo palaukti, jei vaikas jaunesnis nei 12 metų ir neturi intensyvių sportinių užsiėmimų, motyvuodami tuo, kad ankstyva intervencija gali pakenkti augimo plokštelėms.[25] Tačiau daugėja literatūros, kur nurodoma, kad vėlavimas didina meniskų sužalojimų riziką, menkina reabilitacijos kokybę ir taip sukeliama didesnė ilgalaikė žala.[40]

Laiko veiksnys

Daug mokslininkų pabrėžia, kad 6–12 mėnesių delsimas gydyti PKR plyšimą gali 2–3 kartus padidinti menisko pažeidimo tikimybę.[41] Nestabilus kelis šiuo periodu yra pažeidžiamas mikrotraumų, kai vaikas dalyvauja bet kokioje aktyvesnėje veikloje. Didėja potrauminės chondromaliacijos, subchondrinių cistų, menisko mechaninių pažeidimų tikimybė.[41] Todėl esant aiškioms indikacijoms (stipriam nestabilumui, pilnam PKR plyšimui, menisko plyšimui) laukiama tik tiek, kiek būtina planuojant saugią operaciją – t. y. iki kol atslūgsta ūminė tinimo fazė, pagerėja lankstumas, sumažėja skausmas. Dažniausiai tai 3–6 savaitės, ne daugiau.[41] Didesnis nei 12 mėn. laukimas – reikšmingas menisko sužalojimo progresavimo rizikos faktorius, rodo keli retrospektyvūs tyrimai.[42]

3.6. Chirurginės rekonstrukcijos technikos

Metodas per augimo (epifizinę) plokštelę

Šio metodo esmė – tiek šlaunikaulio, tiek blauzdikaulio tuneliai praeina per augimo plokšteles (fizes), siekiant sukurti panašias, kaip ir suaugusiųjų anatomines PKR tvirtinimosi vietas.[43] Svarbiausia sąlyga – tunelius daryti santykinai nedidelius (įprastai <8–9 mm), kad nebūtų pakenkta per didelei fizės sričiai. Taip pat rekomenduojama laikytis šių principų[43]:

- **Tunelio vieta**: stengtis gręžti tunelį per centrinę fizės dalį, vengiant periferijos, kurioje vyksta intensyviausias korekcinis ašies augimas.
- **Fiksacijos tipas**: vengti kietų sraigtų, kertančių fizę (ypač priekinėje ar periferinėje dalyje). Naudojamos nedidelės plokštelės (dažniausiai iš titano arba kito tvirto, bet lengvo metalo), kurios naudojamos transplantui pritvirtinti ne įsukant į kaulą, o perveriant transplantą per kaulą ir pritvirtinant jį iš išorės. Tai vadinama suspensorine (pakabinamąja) fiksacija, nes

transplantas „kabo“ ant plokštelės, o fizė lieka nepažeista.

Privalumai:

- Atkuriama anatomiškai artima PKR padėtis.
- Šiuolaikiniame sporto medicinos kontekste įrodyta, kad transphyseal metodas suteikiadidelį kelio sąnario stabilumą suaugusiesiems, todėl šiuos privalumus norima pritaikyti ir vaikų populiacijai [43;44].

Trūkumai:

- Fizės pažeidimo rizika, ypač jeigu tunelis didelis, grąžtai per daug lateralizuoti, per daug įstrižas kampas [43;44]..
- Kai kuriems vaikams, ypač <12–13 metų amžiaus, baiminamasi epifiziodezės ar *genu valgum/varum* atsiradimo po procedūros, jei netyčia pažeidžiama fizė [51].

Ekstrafizinė (extraphyseal) – “over-the-top” metodika

Ši metodika siekia apskritai neperžengti augimo plokštelių. Plačiai paplitęs istorinis “over-the-top” metodas, kai rekonstrukcija apvedama užpakalinėje šlaunikaulio dalyje, negręžiant šlaunikaulio tunelio.[45;46] Tibialinėje dalyje kartais iš dalies pereinama per epifizę, o kartais tvirtinama ekstrakortikaliai, priklausomai nuo operacinės strategijos [45].

Trūkumai:

- Metodas mažiau anatomiškas; paprastai PKR išsidėsto vertikaliau, prastesnė rotacinė kontrolė.
- Kadangi šio metodo metu negręžiamas tunelis į šlaunikaulį, o transplantas apvedamas aplink šlaunikaulio užpakalinę dalį, atsiranda rizika, kad transplantas bus per daug įtemptas, ypač toje vietoje, kuri atitinka anteromedialinius pluoštus (PKR dalį, aktyvią didesnio lenkimo metu). Jei transplantas pertempiamas, jis nuolat traukia vieną kelio pusę – tai sukuria vadinamąjį tenodezės efektą, kuris, ypač vaikams, gali sulėtinti ar sustabdyti augimą vienoje augimo plokštelės pusėje ir sukelti kaulo kreivumą [45;46].

Privalumai[45;46]**:**

- Beveik eliminuojama rizika pažeisti augimo plokštelę.
- Metodas gana paprastas technologiškai.

Intraepifizinė (angl. all-epiphyseal, physeal-sparing)

Šiuo atveju tunelis gręžiamas tik epifizėje, t. y. virš arba žemiau augimo plokštelės, jos nepažeidžiant. Taip siekiama visiškai apsaugoti fizę, todėl būtina itin tiksli tunelio vietos kontrolė – dažniausiai naudojami magnetinio rezonanso tyrimai (MRT), 3D kompiuterinė navigacija arba bent jau tikslios rentgeno projekcijos, kad būtų galima tiksliai atkartoti natūralią PKR padėtį [47].

Privalumai:

- Minimalus fizės pažeidimas – kadangi tuneliai nė kiek nekerta augimo plokštelės, šis metodas teoriškai leidžia visiškai išvengti epifiziodezės, t. y. augimo sustojimo rizikos. Todėl tai vienas saugiausių variantų augimo zonos požiūriu.
- Idealiai tinka jauniausiems pacientams – šis metodas ypač rekomenduojamas vaikams Tanner 1–2 stadijoje, t. y. prieš prasidedant intensyviam augimo šuoliui, kai dar likęs didelis augimo potencialas. Tokiu atveju fizės apsauga yra kritiškai svarbi [47].

Trūkumai:

- Metodika techniškai sudėtinga, reikalauja patirties, įrangos;
- Rotacinio stabilumo rizika – jei tunelis per mažai atitinka natūralią PKR trajektoriją, gali būti nepakankamas rotacinis kelio sąnario stabilumas [47].

Kombinuoti metodai

Kartais chirurgas taiko kombinuotą metodą, kai šlaunikaulyje naudoja fizę tausojančią techniką (pvz., over-the-top arba all-epiphyseal), nes ten esanti augimo plokštelė yra labai svarbi, o

blauzdikaulyje gręžia per fizę (transphyseal), nes ši augimo zona turi mažesnę reikšmę ir ją lengviau apsaugoti [48]. Šis derinys gali supaprastinti operaciją, bet vis tiek būtina tiksliai suplanuoti tunelio vietas, kad būtų išvengta netolygaus blauzdikaulio augimo ar deformacijų.

3.7. Priekinio kryžminio raiščio (pkr) + anterolateralinė procedūra

Anterolateralinis raištis (ALR)

Anterolateralinis raištis (ALR) yra struktūra, priklausanti kelio sąnario raiščių ir kapsulės kompleksui. Jis prisideda prie rotacinio kelio stabilumo – ypač svarbus esant nedideliam kelio lenkimo kampui (0–30°), kai pagrindinės PKR skaidulos dar nėra maksimaliai įtemptos. ALL padeda kontroliuoti vidinę blauzdos rotaciją šlaunikaulio atžvilgiu, o jo funkcija tampa ypač reikšminga esant PKR pažeidimui. Nuo 2013 m., kai ALL anatomija buvo išsamiau aprašyta [14], atlikta daug tyrimų, patvirtinančių, kad kartu su PKR plyšimu dažnai įvyksta ir ALL pažeidimas. Tai gali dar labiau padidinti rotacinį nestabilumą, ypač sportininkams [49]. Dėl šios priežasties suaugusiųjų populiacijoje pastaraisiais metais vis labiau taikoma kombinuota PKR + ALL rekonstrukcija, kuri, kaip rodo kai kurie klinikiniai duomenys, ženkliai sumažina pakartotinio PKR plyšimo riziką – kai kuriuose šaltiniuose nurodoma net 50–70 % mažesnė pakartotinio plyšimo tikimybė palyginti su vien PKR rekonstrukcija [12].

Modifikuota Lemaire procedūra

Ši procedūra remiasi klasikine M. Lemaire 1970-aisiais aprašyta technika, kurioje naudojama dalis iliotibialinio trakto (*tractus iliotibialis*) – plačios fascijos, einančios šlaunies šonine dalimi.[50] Vaikams pritaikyta šios procedūros versija taikoma ypač atsargiai, kad būtų išvengta augimo plokštelės (fizės) pažeidimo, kuris gali lemti augimo sutrikimus.[50] Procedūros metu atskiriama siaura iliotibialinio trakto juosta, paliekant jos apatinį (distalinį) prisitvirtinimą prie blauzdikaulio šoninio paviršiaus. Juosta vedama pro šlaunies fasciją arba pro tunelį šlaunikaulyje, virš šoninio kondilo (kulkšnio srities), tačiau stengiamasi nekirsti fizės. Galiausiai, juosta fiksuojama reikiamo įtempimo padėtyje, siekiant stabilizuoti kelio anterolateralinį regioną, kuris svarbus kontroliuojant blauzdos vidinę rotaciją.

Šių metodų taikymas vaikams

Literatūros duomenimis, retrospektyviuose tyrimuose su 30–60 pacientų, PKR+ALL derinys pasižymi vidutiniškai 2–14% pakartotinio plyšimo tikimybe, PKR+modifikuota Lemaire – 4–14%, o vien PKR plyšimo rekonstrukcija vaikų populiacijoje nurodoma 9–24% intervale.[1;51] Vertinant šiuos duomenis, panašu, kad pridėtinė šoninė tenodezėgali gerokai sumažinti pakartotinio plyšimo riziką sportiškiems paaugliams.

3.8. Grafto pasirinkimas

Minkštųjų audinių (hamstring) autograftas

Dažniausiai vaikų PKR rekonstrukcijai naudojamas *semitendinosus* ir/ar *gracilis* sausgyslių autotransplantatas, kuris gali būti dvigubas arba trigubas [57]. Tai laikomas „minkštu“ transplantatu, nes neturi kaulinių blokų, todėl sumažėja rizika pažeisti augimo plokštelę (epifiziodezę). Tačiau klinikiniai duomenys rodo, kad šio tipo autograftas gali būti mažiau atsparus didelėms apkrovoms, ypač ankstyvosios reabilitacijos metu:tarp aktyviai sportuojančių vaikų fiksuojamas pakartotinių plyšimų dažnis siekia 9–13 % [49]. Šis padidėjęs pakartotinio plyšimo pavojus gali būti susijęs su nepakankamu transplanto standumu ir dideliais fiziniais krūviais, kuriuos patiria paaugliai sportininkai.

BPTB (kaulas–girnelės sausgyslė–kaulas)

BPTB autotransplantatas, sudarytas iš girnelės sausgyslės su abipusiais kauliniais blokais, ilgą laiką

laikomas efektyviausiu („aukso standartu“) PKR rekonstrukcijos metodu dėl geriausio kelio sąnario stabilumo suaugusiems, nes pasižymi mažu pakartotinio plyšio dažniu [25]. Vaikams, ypač iki 13 metų, šis metodas tradiciškai buvo vertinamas atsargiai dėl rizikos pažeisti augimo plokšteles, kai kauliniai blokai ar sraigtai kerta epifizines zonas. Tačiau naujausi duomenys rodo, kad Tanner 3–4 stadijos paaugliams BPTB metodas gali būti saugus, jei laikomasi techninių rekomendacijų – naudojamos plokštelės arba fiksacija, kuri minimaliai liečia fizę, ir tunelių skersmuo neviršija 8–9 mm [43]. Tokiu atveju pakartotinio plyšimo dažnis sumažėja iki 2–5 %, o augimo sutrikimų beveik nefiksuojama.

Keturgalvio sausgyslė

Vis labiau populiarėjanti metodika suaugusiems dėl mažesnio priekinio kelio skausmo lyginant su BPTB, tačiau vaikams dar nėra pakankamai duomenų [52]. Manoma, jog metodas turi mažesnę pateliarinės tendinopatijos riziką, bet kol kas neaišku, ar jos fiksacija per fizes yra saugi.

Alograftai, sintetiniai graftai

Alograftai (pvz., Achilo sausgyslės, blauzdos raumenų sausgyslės) nėra labai populiarūs vaikų PKR rekonstrukcijoje dėl galimai lėtesnės biologinės integracijos, didesnio pakartotinio plyšio pavojaus bei galimų imunologinių atsakų [53]. Vaikams, kurių regeneraciniai sugebėjimai geri, autologinės sausgyslės paprastai laikomos pranašesnėmis.

3.9. Pakartotinio pkr plyšimo rizika

Remiantis įvairiais tyrimais, reikšmingiausi veiksniai, lemantys pakartotinius PKR plyšimus jauname amžiuje, yra [54;55]:

- **Amžius <20 m.** – paaugliai ir jaunimas turi didesnį bendrą pakartotinių plyšimų skaičių, ypatingai užsiimant intensyviu sportu, nebaigus reabilitacijos..
- **Sporto intensyvumas** – ypač sukamojo judėsio tipo sportas (futbolas, rankinis, krepšinis).
- **Per ankstyvas grįžimas** į sportą– tyrimai rodo, kad jei vaikui leidžiama grįžti sportuoti nepraėjus 9 mėn. po operacijos, pakartotinio plyšimo rizika išauga dvigubai, lyginant su grįžus po ~12 mėn. [11,22,23].
- **Transplanto tipas** ir **chirurginė technika** – pvz., netikslus tunelis, siauras grafto skersmuo.

Suaugusiems PKR + ALL metodas asocijuojamas su 4–6% pakartotiniu plyšimu, o be ALR – ~10–16%.[16] Vaikams analogiškai pastebima, kad PKR + lateralinė tenodezė ar ALR rekonstrukcija sumažina pakartotinio plyšimo tikimybę iki ~2–14%, priešingai nei vien PKR, kur pakartotinio plyšimo tikimybė siekia 9–24%.[28] Aišku, šiuos rodiklius reikia vertinti atsargiai dėl skirtingų tyrimų metodikų.

3.10. Grįžimo į sportą rodikliai ir funkciniai testai

Vien to, kad kelis „kliniškai stabilus“, neužtenka. Vaikai turi atitikti raumenų jėgos, propriorecepcijos, psichologinės parengties kriterijus[56]:

- **Raumenų jėgos testai** – dažnai remiamasi 90% simetrijos principu tarp operuotos ir neoperuotos kojos (keturgalvio, lenkiamųjų raumenų).
- **Propriorecepcijos testai** – balanso platformos, vienos kojos šuoliukų testai.
- **Psichologinė parengtis** – *kineziofobija*, pasitikėjimo savo kelio „stiprumu“ vertinimas.

Tegner skalė

Tegner skalė yra standartizuotas instrumentas, naudojamas fizinio aktyvumo lygiui įvertinti, ypač svarbus grįžimo į sportą po PKR rekonstrukcijos kontekste. Ši skalė leidžia kiekybiškai įvertinti, ar pacientas grįžta į ankstesnį ar net aukštesnį sportinį lygį. Tyrimų duomenimis, apie 60–80 % vaikų po PKR traumos pasiekia tokį pat ar net aukštesnį aktyvumo lygį nei prieš traumą [57]. Tačiau, kaip

pažymi Kocher ir kt. [2], vidutinė reikšmė dažnai siekia 7,8 balo, kai prieš traumą aktyvumo lygis buvo apie 8, todėl dalis pacientų vis dėlto negrįžta į visiškai buvusį sportinį lygį, nepaisant klinikinės sėkmės.

Pedi-IKDC

Kadangi IKDC (International Knee Documentation Committee) klausimynas yra sukurtas suaugusiems pacientams ir gali būti ne visiškai tinkamas vaikų vertinimui, buvo sukurta speciali versija – Pedi-IKDC. Šis instrumentas yra psichometriškai validuotas ir leidžia įvertinti vaikų bei paauglių subjektyvią kelio sąnario funkciją po PKR rekonstrukcijos [58]. Tyrimai rodo, kad maždaug 85–95 % vaikų po sėkmingos operacijos pasiekia „gerą“ arba „puikų“ Pedi-IKDC balą, o tai atspindi aukštą pacientų pasitenkinimą ir funkcijos atkūrimą.

KT-1000, Rolimeter

Norint objektyviai įvertinti kelio sąnario stabilumą po PKR rekonstrukcijos, taikomi KT-1000 ir Rolimeter prietaisai, kurie matuoja kiek operuota koja laisviau juda į priekį, palyginti su sveikąja. Jei skirtumas tarp operuotos ir sveikos pusės yra mažesnis nei 3 mm, laikoma, kad kelio sąnarys biomechaniškai stabilus [59]. Tyrimų duomenimis, apie 90–95 % pacientų po operacijos pasiekia šį rodiklį [59]. Vis dėlto pediatrinėje populiacijoje svarbu įvertinti, kad sąnario paslankumo normos gali kisti dėl vaikų augimo, raumenų masės pokyčių ar hormoninių veiksnių, todėl rezultatai turi būti interpretuojami atsižvelgiant į amžių ir augimo stadiją.

4. Išvados:

Apibendrinant, vaikų priekinio kryžminio raiščio (PKR) rekonstrukcija yra svarbi ortopedinė intervencija, galinti apsaugoti meniską ir sąnario kremzlę nuo antrinių pažeidimų, ypač aktyviai sportuojantiems pacientams. Pastaruoju metu daugėja įrodymų, kad ankstyva, individualiai parinkta rekonstrukcija yra veiksmingesnė nei konservatyvus gydymas, ypač ilgalaikėje perspektyvoje. Chirurginės metodikos pasirinkimas turi būti pagrįstas ne tik chronologiniu paciento amžiumi, bet ir skeleto brendimo – Tanner stadija: jaunesniems vaikams dažniausiai taikomas fizes tausojantis physeal-sparing ar intraepifizinis metodas, o vyresniems paaugliams (T3–T4) galima saugiai taikyti transphyseal metodiką ar net BPTB autograftą. Kombinuotos procedūros, tokios kaip ALR ar modifikuota Lemaire tenodezė, gali reikšmingai sumažinti pakartotinių plyšimų riziką, išlaikant žemą augimo sutrikimų dažnį (~2–5 %). Vis dėlto, net ir naudojant fizę tausojančius metodus, augimo sutrikimai neįmanoma visiškai išvengti, todėl būtina ilgalaikė pacientų stebėsena iki skeletinio subrendimo. Siekiant dar patikimesnių statistinių rezultatų, būtini didesnės apimties prospektyvūs tyrimai, ypač vertinant BPTB metodo saugumą paauglių populiacijoje.

Literatūros šaltiniai

[1] Migliorini, F., Pilone, M., Memminger, M. K., Eschweiler, J., Giorgino, R., & Maffulli, N. (2024). All epiphyseal anterior cruciate ligament reconstruction yields superior sports performances than the trans-epiphyseal technique in skeletally immature patients: a systematic review. Journal of Orthopaedics and Traumatology: Official Journal of the Italian Society of Orthopaedics and Traumatology, 25(1), 7. https://doi.org/10.1186/s10195-024-00751-9 .

[2] Kocher MS, Heyworth BE, Fabricant PD, Tepolt FA, Micheli LJ. Outcomes of physeal-sparing ACL reconstruction with iliotibial band autograft in skeletally immature prepubescent children. J Bone Joint Surg Am 2018;100:1087–94. https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01327.

[3] Pagliazzi G, Cuzzolin M, Pacchiarini L, Delcogliano M, Filardo G, Candrian C. Physeal-

sparing ACL reconstruction provides better knee laxity restoration but similar clinical outcomes to partial transphyseal and complete transphyseal approaches in the pediatric population: a systematic review and meta-analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2023;31:206–18. https://doi.org/10.1007/s00167-022-07032-0.

[4] Malatray M, Raux S, Peltier A, Pfirrmann C, Seil R, Chotel F. Ramp lesions in ACL deficient knees in children and adolescent population: a high prevalence confirmed in intercondylar and posteromedial exploration. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2018;26:1074–9. https://doi.org/10.1007/s00167-017-4471-4.

[5] Lipscomb AB, Anderson AF. Tears of the anterior cruciate ligament in adolescents. J Bone Joint Surg Am 1986;68:19–28. https://doi.org/10.2106/00004623-198668010-00004.

[6] Shea KG, Pfeiffer R, Wang JH, Curtin M, Apel PJ. Anterior cruciate ligament injury in pediatric and adolescent soccer players: an analysis of insurance data. J Pediatr Orthop 2004;24:623–8. https://doi.org/10.1097/00004694-200411000-00005.

[7] Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Management of anterior cruciate ligament injuries in skeletally immature individuals. J Orthop Sports Phys Ther 2012;42:172–83. https://doi.org/10.2519/jospt.2012.3608.

[8] Bayer, S., Meredith, S. J., Wilson, K. W., de Sa, D., Pauyo, T., Byrne, K., McDonough, C. M., & Mu-sahl, V. (2020). Knee morphological risk factors for anterior cruciate ligament injury: A systematic re-view: A systematic review. The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume, 102(8), 703–718. https://doi.org/10.2106/JBJS.19.00535

[9] Stinson Z, Fink J. Pediatric anterior cruciate ligament tears. Sports Med Arthrosc 2024;32:176–81. https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000414.

[10] Poutre AJ, Meyers AB. Imaging the pediatric anterior cruciate ligament: not little adults. Pediatr Radiol 2023;53:1587–99. https://doi.org/10.1007/s00247-023-05608-7.

[11] Kaeding CC, Flanigan D, Donaldson C. Surgical techniques and outcomes after anterior cruciate ligament reconstruction in preadolescent patients. Arthroscopy 2010;26:1530–8. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2010.04.065.

[12] Sonnery-Cottet B, Saithna A, Cavalier M, Kajetanek C, Temponi EF, Daggett M, et al. Anterolateral ligament reconstruction is associated with significantly reduced ACL graft rupture rates at a minimum follow-up of 2 years: A prospective comparative study of 502 patients from the SANTI Study Group. Am J Sports Med 2017;45:1547–57. https://doi.org/10.1177/0363546516686057.

[13] Park, J.-G., Han, S.-B., Rhim, H. C., Jeon, O. H., & Jang, K.-M. (2022). Anatomy of the anterolateral ligament of the knee joint. World Journal of Clinical Cases, 10(21), 7215–7223. https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i21.7215

[14] Littlefield CP, Belk JW, Houck DA, Kraeutler MJ, LaPrade RF, Chahla J, et al. The anterolateral ligament of the knee: An updated systematic review of anatomy, biomechanics, and clinical outcomes. Arthroscopy 2021;37:1654–66. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2020.12.190.

[15] Bales CP, Guettler JH, Moorman CT 3rd. Anterior cruciate ligament injuries in children with open physes: evolving strategies of treatment: Evolving strategies of treatment. Am J Sports Med 2004;32:1978–85. https://doi.org/10.1177/0363546504271209.

[16] Nagai K, Rothrauff BB, Li RT, Fu FH. Over-the-top ACL reconstruction restores anterior and rotatory knee laxity in skeletally immature individuals and revision settings. Knee Surg Sports

Traumatol Arthrosc 2020;28:538–43. https://doi.org/10.1007/s00167-019-05719-5.

[17] Shea KG, Apel PJ, Pfeiffer RP. Anterior cruciate ligament injury in paediatric and adolescent patients: a review of basic science and clinical research. Sports Med 2003;33:455–71.

[18] Myer GD, Sugimoto D, Thomas S, Hewett TE. The influence of age on the effectiveness of neuromuscular training to reduce anterior cruciate ligament injury in female athletes: a meta-analysis: A meta-analysis. Am J Sports Med 2013;41:203–15. https://doi.org/10.1177/0363546512460637.

[19] McIntosh AL, Dahm DL, Stuart MJ. Anterior cruciate ligament reconstruction in the skeletally immature patient. Arthroscopy 2006;22:1325–30. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2006.07.014.

[20] Ramski DE, Kanj WW, Franklin CC, Baldwin KD, Ganley TJ. Anterior cruciate ligament tears in children and adolescents: a meta-analysis of nonoperative versus operative treatment: A meta-analysis of nonoperative versus operative treatment. Am J Sports Med 2014;42:2769–76. https://doi.org/10.1177/0363546513510889.

[21] Duart J, Rigamonti L, Bigoni M, Kocher MS. Pediatric anterior cruciate ligament tears and associated lesions: Epidemiology, diagnostic process, and imaging. J Child Orthop 2023;17:4–11. https://doi.org/10.1177/18632521231153277.

[22] Verhagen S, Dietvorst M, Delvaux E, van der Steen MC, Janssen R. Clinical outcomes of different autografts used for all-epiphyseal, partial epiphyseal or transphyseal anterior cruciate ligament reconstruction in skeletally immature patients - a systematic review. BMC Musculoskelet Disord 2023;24:630. https://doi.org/10.1186/s12891-023-06749-4.

[23] Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 2, a meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention: Part 2, A meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention. Am J Sports Med 2006;34:490–8. https://doi.org/10.1177/0363546505282619.

[24] Sugimoto D, Mattacola CG, Bush HM, Thomas SM, Foss KDB, Myer GD, et al. Preventive neuromuscular training for young female athletes: Comparison of coach and athlete compliance rates. J Athl Train 2017;52:58–64. https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.12.20.

[25] Turati M, Caliandro M, Gaddi D, Piatti M, Rigamonti L, Zanchi N, et al. Clinical outcomes and complications after anterior cruciate ligament reconstruction with bone-patellar tendon-bone in patient Tanner 3 and 4: a systematic review. Eur J Orthop Surg Traumatol 2023;33:2191–9. https://doi.org/10.1007/s00590-022-03402-z.

[26] Raj MA, Bubnis MA. Knee meniscal tears. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025.

[27] Kocher MS, Saxon HS, Hovis WD, Hawkins RJ. Management and complications of anterior cruciate ligament injuries in skeletally immature patients: survey of the Herodicus Society and The ACL Study Group. J Pediatr Orthop 2002;22:452–7. https://doi.org/10.1097/01241398-200207000-00008.

[28] Wilson PL, Wyatt CW, Wagner KJ 3rd, Boes N, Sabatino MJ, Ellis HB Jr. Combined transphyseal and lateral extra-articular pediatric anterior cruciate ligament reconstruction: A novel technique to reduce ACL reinjury while allowing for growth. Am J Sports Med 2019;47:3356–64. https://doi.org/10.1177/0363546519881445.

[29] Willimon SC, Jones CR, Herzog MM, May KH, Leake MJ, Busch MT. Micheli anterior cruciate ligament reconstruction in skeletally immature youths: A retrospective case series with a mean 3-year follow-up: A retrospective case series with a mean 3-year follow-up. Am J Sports Med

2015;43:2974–81. https://doi.org/10.1177/0363546515608477.

[30] Mall NA, Paletta GA. Pediatric ACL injuries: evaluation and management. Curr Rev Musculoskelet Med 2013;6:132–40. https://doi.org/10.1007/s12178-013-9169-8.

[31] Nedder VJ, Raju AG, Moyal AJ, Calcei JG, Voos JE. Impact of psychological factors on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. Sports Health 2025;17:291–8. https://doi.org/10.1177/19417381241256930.

[32] Vutescu ES, Orman S, Garcia-Lopez E, Lau J, Gage A, Cruz AI Jr. Psychological and social components of recovery following anterior cruciate ligament reconstruction in young athletes: A narrative review. Int J Environ Res Public Health 2021;18:9267. https://doi.org/10.3390/ijerph18179267.

[33] Dingel A, Aoyama J, Ganley T, Shea K. Pediatric ACL tears: Natural history: Natural history. J Pediatr Orthop 2019;39:S47–9. https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000001367.

[34] Shea KG, Apel PJ, Pfeiffer RP, Traughber PD. The anatomy of the proximal tibia in pediatric and adolescent patients: implications for ACL reconstruction and prevention of physeal arrest. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2007;15:320–7. https://doi.org/10.1007/s00167-006-0171-1.

[35] Boden BP, Dean GS, Feagin JA Jr, Garrett WE Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. Orthopedics 2000;23:573–8. https://doi.org/10.3928/0147-7447-20000601-15.

[36] Kobayashi H, Kanamura T, Koshida S, Miyashita K, Okado T, Shimizu T, et al. Mechanisms of the anterior cruciate ligament injury in sports activities: a twenty-year clinical research of 1,700 athletes. J Sports Sci Med 2010;9:669–75.

[37] Sirin E, Aydin N, Mert Topkar O. Acromioclavicular joint injuries: diagnosis, classification and ligamentoplasty procedures. EFORT Open Rev 2018;3:426–33. https://doi.org/10.1302/2058-5241.3.170027.

[38] Pascual-Leone N, Gross PW, Meza BC, Fabricant PD. Techniques in pediatric anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy 2022;38:2784–6. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2022.08.003.

[39] Papaleontiou A, Poupard AM, Mahajan UD, Tsantanis P. Conservative vs surgical treatment of anterior cruciate ligament rupture: A systematic review. Cureus 2024;16:e56532. https://doi.org/10.7759/cureus.56532.

[40] Monk AP, Davies LJ, Hopewell S, Harris K, Beard DJ, Price AJ. Surgical versus conservative interventions for treating anterior cruciate ligament injuries. Cochrane Database Syst Rev 2016;4:CD011166. https://doi.org/10.1002/14651858.CD011166.pub2.

[41] Shen X, Liu T, Xu S, Chen B, Tang X, Xiao J, et al. Optimal timing of anterior cruciate ligament reconstruction in patients with anterior cruciate ligament tear: A systematic review and meta-analysis. JAMA Netw Open 2022;5:e2242742. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.42742.

[42] Kolin DA, Dawkins B, Park J, Fabricant PD, Gilmore A, Seeley M, et al. ACL reconstruction delay in pediatric and adolescent patients is associated with a progressive increased risk of medial meniscal tears. J Bone Joint Surg Am 2021;103:1368–73. https://doi.org/10.2106/JBJS.20.01459.

[43] Dai, W., Leng, X., Wang, J., Cheng, J., Hu, X., & Ao, Y. (2022). Quadriceps tendon autograft versus bone-patellar tendon-bone and hamstring tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. The American Journal of Sports Medicine,

50(12), 3425–3439. https://doi.org/10.1177/03635465211030259

[44] McCarroll JR, Shelbourne KD, Porter DA, Rettig AC, Murray S. Patellar tendon graft reconstruction for midsubstance anterior cruciate ligament rupture in junior high school athletes. An algorithm for management: An algorithm for management. Am J Sports Med 1994;22:478–84. https://doi.org/10.1177/036354659402200407.

[45] Kohl S, Stutz C, Decker S, Ziebarth K, Slongo T, Ahmad SS, et al. Mid-term results of transphyseal anterior cruciate ligament reconstruction in children and adolescents. Knee 2014;21:80–5. https://doi.org/10.1016/j.knee.2013.07.004.

[46] Du H, Li L, Qin Z, Guo J, Zhang X. Over-the-top technique for ACL reconstruction: Advantages, disadvantages, and postoperative complications. Orthop Surg 2025;17:333–47. https://doi.org/10.1111/os.14328.

[47] Lawrence JTR, Bowers AL, Belding J, Cody SR, Ganley TJ. All-epiphyseal anterior cruciate ligament reconstruction in skeletally immature patients. Clin Orthop Relat Res 2010;468:1971–7. https://doi.org/10.1007/s11999-010-1255-2.

[48] Magnussen RA, Lawrence JTR, West RL, Toth AP, Taylor DC, Garrett WE. Graft size and patient age are predictors of early revision after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft. Arthroscopy 2012;28:526–31. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2011.11.024.

[49] Ekås, G. R., Ardern, C. L., Grindem, H., & Engebretsen, L. (2020). Evidence too weak to guide surgical treatment decisions for anterior cruciate ligament injury: a systematic review of the risk of new meniscal tears after anterior cruciate ligament injury. British Journal of Sports Medicine, 54(9), 520–527. https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-100956.

[50] Jesani S, Getgood A. Modified Lemaire lateral extra-articular tenodesis augmentation of anterior cruciate ligament reconstruction. JBJS Essent Surg Tech 2019;9:e41. https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.19.00017.

[51] Webster KE, Feller JA. Exploring the high reinjury rate in younger patients undergoing anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med 2016;44:2827–32. https://doi.org/10.1177/0363546516651845.

[52] Baghdadi S, VanEenenaam DP Jr, Williams BA, Lawrence JTR, Maguire KJ, Wells L, et al. Quadriceps tendon autograft in pediatric ACL reconstruction: Graft dimensions and prediction of size on preoperative MRI. Orthop J Sports Med 2021;9:23259671211056678. https://doi.org/10.1177/23259671211056678.

[53] Migliorini, F., Pilone, M., Schäfer, L., Bertini, F. A., Giorgino, R., & Maffulli, N. (2025). Allograft ver-sus autograft ACL reconstruction in skeletally immature patients: a systematic review. British Medical Bulletin, 153(1). https://doi.org/10.1093/bmb/ldae020

[54] Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis: A systematic review and meta-analysis. Am J Sports Med 2016;44:1861–76. https://doi.org/10.1177/0363546515621554.

[55] Cronström, A., Tengman, E., & Häger, C. K. (2021). Risk factors for Contra-lateral secondary anterior cruciate ligament injury: A systematic review with meta-analysis. Sports Medicine (Auckland, N.Z.), 51(7), 1419–1438. https://doi.org/10.1007/s40279-020-01424-3 .

[56] Lorange J-P, Senécal L, Moisan P, Nault M-L. Return to sport after pediatric anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review of the

criteria. Am J Sports Med 2024;52:1641–51. https://doi.org/10.1177/03635465231187039.

[57] Kay J, Memon M, Marx RG, Peterson D, Simunovic N, Ayeni OR. Over 90 % of children and adolescents return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2018;26:1019–36. https://doi.org/10.1007/s00167-018-4830-9.

[58] Hansen CF, Madsen MØ, Warming S, Lind M, Faunø P, Rathcke MW, et al. Pedi-IKDC exhibits questionable measurement properties in a cohort of pediatric patients with ACL rupture. Scand J Med Sci Sports 2023;33:1831–40. https://doi.org/10.1111/sms.14413.

[59] Ganko A, Engebretsen L, Ozer H. The rolimeter: a new arthrometer compared with the KT-1000. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2000;8:36–9. https://doi.org/10.1007/s001670050008.