



Uršula Prelesnik,
Žiga Kozinc

Vrednotenje kardiorespiratorne zmogljivosti pri osebah s poškodbo hrbtenjače

Izvleček

Posamezniki s poškodbo hrbtenjače so v primerjavi s splošno populacijo manj telesno dejavni, zaradi česar so izpostavljeni večjemu tveganju za kronične nenalezljive bolezni in umrljivosti zaradi njih. Za predpisovanje učinkovitih programov aerobne vadbe in spremljanje vpliva rehabilitacije je ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti ključnega pomena. Za ta namen je pri osebah s poškodbo hrbtenjače uveljavljeno merjenje najvišje porabe kisika (VO_2peak) z ročno ergometrijo, ki je ponovljiva in veljavna, vendar ima nekatere omejitve, zaradi katerih je smiselno razmisliti tudi o drugih načinih testiranja VO_2peak . Ti načini morajo biti ponovljivi in veljavni. VO_2peak lahko posredno ocenimo iz rezultatov veljavnih in ponovljivih terenskih testov (večstopenjski in 6-minutni test poganjanja), ki omogočajo celostno oceno mobilnosti osebe na vozičku ter so z vidika cene, časa in potrebnih sredstev manj zahtevni od laboratorijskega testiranja. V okviru slednjega so za določanje VO_2peak veljavni in ponovljivi ergometrija na invalidskem vozičku (pri kateri preiskovanci izvajajo znani in funkcionalni vzorec gibanja), ergometrija v vodi (ki omogoča aktivacijo vseh oživčenih mišičnih skupin) in za posameznike z nepopolno poškodbo hrbtenjače testiranje med robotsko asistirano hojo s podporo telesne teže na tekalni stezi. Kadar oseba ne želi ali ne more izvajati maksimalnega testiranja, lahko VO_2peak dokaj dobro napovemo tudi s preprostimi antropometričnimi spremenljivkami in spremenljivkami mišično-skeletne kondicije ali pa se izvede submaksimalno testiranje.

Ključne besede: testiranje vzdržljivosti, kardiorespiratorna zmogljivost, veljavnost in ponovljivost, najvišja poraba kisika, osebe s poškodbo hrbtenjače



Image by Drazen Zigic on Freepik

Evaluation of cardiorespiratory fitness in people with spinal cord injury

Abstract

Individuals with spinal cord injury are less physically active compared to the general population, which exposes them to a higher risk of chronic non-communicable diseases and mortality associated with them. Assessing cardio-respiratory fitness is crucial for prescribing effective aerobic exercise programs and monitoring the impact of rehabilitation. For this purpose, measuring peak oxygen consumption (VO_2peak) using arm ergometry is well-established in individuals with spinal cord injury. This method is reliable and valid, but has some limitations, warranting consideration of alternative VO_2peak testing methods. These methods should be reliable and valid. VO_2peak can be indirectly assessed using results from field tests (multi-stage and 6-minute push tests), which allow for a comprehensive evaluation of wheelchair mobility and are less demanding in terms of cost, time, and resources compared to laboratory testing. Regarding the latter, valid and reliable methods for determining VO_2peak include wheelchair ergometry (where subjects perform a familiar and functional movement pattern), water ergometry (which enables activation of all innervated muscle groups), and, for individuals with incomplete spinal cord injury, testing during robotics-assisted gait with bodyweight support on a treadmill. When a person is unwilling or unable to perform maximal testing, VO_2peak can be reasonably well predicted using simple anthropometric and musculoskeletal fitness variables, or through submaximal testing.

Keywords: endurance testing, cardio-respiratory fitness, validity and reliability, peak oxygen consumption, individuals with spinal cord injury

Uvod

Na svetu živi več kot 15 milijonov ljudi s poškodbo hrbtenjače (v nadaljevanju: PH) (World Health Organization, 2024). Največ PH se zgodi zaradi travme, in sicer pri avtomobilskih nesrečah in padcih, obseg prizadetosti pa je odvisen od lokacije in resnosti poškodbe (GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators, 2019). Posledica PH je popolna ali nepopolna izguba senzoričnih in/ali motoričnih funkcij pod ravni poškodbe, pogosta je tudi disfunkcija avtonomnega živčnega sistema, ki vpliva na različne funkcije (na primer potenje) (World Health Organization, 2024). PH lahko zmanjša zmožnost opravljanja vsakodnevnih dejavnosti, vključno s hojo, uporabo rok, fiziološkim praznjenjem mehurja ali črevesja ter umivanjem in oblačenjem. Posamezniki s PH so v primerjavi s splošno populacijo tudi manj telesno dejavni. Manj kot četrtina odraslih invalidov se ukvarja s telesno dejavnostjo, ki zadostuje za doseganje zdravstvenih koristi, povezanih z gibanjem (Fernhall idr., 2008). Van den Berg-Emons idr. (2010) v svoji raziskavi poročajo, da je stopnja telesne dejavnosti pri osebah na invalidskih vozičkih za 40 % nižja kot pri osebah, ki vozička ne uporabljajo. Zaradi tega so osebe s PH bolj izpostavljene tveganju za hujša obolenja in umrljivosti zaradi kroničnih nenalezljivih bolezni, neposredno povezanih s telesno nedejavnostjo, vključno z boleznimi srca in ožilja, sladkorno boleznijo, debelostjo in depresijo (Froehlich-Grobe idr., 2016). Slabo zdravje srca in ožilja, s katerim se pogosto srečujejo osebe s PH, kaže na nujnost večje telesne dejavnosti in kardiorespiratorne zmogljivosti pri tej populaciji. Smernice osebam s PH svetujejo, da se pet dni na teden vsaj 30 minut ukvarjajo z zmerno intenzivno telesno vadbo ali tri dni na teden vsaj 20 minut z visoko intenzivno (Ogonowska-Slodownik idr., 2019).

Ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti pri populaciji s PH je ključnega pomena za spremljanje sprememb njihovega zdravstvenega stanja oziroma spremljanje vpliva rehabilitacije skozi čas in za predpisovanje učinkovitih individualiziranih programov aerobne vadbe (Bass idr., 2020). Zelo pomembno pa je tudi pri vrhunskih športnikih s PH. Ti se ukvarjajo s tekmovalnimi športi in potrebujejo biološko podlago za treniranje, da bi dosegli najboljše rezultate in preprečili morebitno pretreniranost in poškodbe (Cooper idr., 1999). Zlati standard za ocenjevanje kardiorespirator-

ne zmogljivosti pri splošni populaciji je merjenje največje porabe kisika (VO_2max) med obremenilnim testnim protokolom s stopnjevanjem intenzivnosti do izčrpanosti (ergometrija) (Vanhees idr., 2005). VO_2max je mera, ki pove, koliko litrov kisika lahko človek privzame v svoje telo oziroma ga porabi v minuti (Steinach in Gunga, 2021). Odvisna je od hitrosti prenosa kisika po krvnem obtoku (torej od sposobnosti srca, da prečrpa kri, in od koncentracije hemoglobina v krvi), od difuzijske kapacitete pljuči in od sposobnosti mišic, da kisik privzamejo (Engelking, 2015). Običajno se izraža kot količina kisika na kilogram telesne mase, porabljenega na minuto (ml/kg/min). Vrednosti se lahko gibljejo od več kot 90 ml/kg/min pri vrhunskih vzdržljivostnih športnikih do manj kot 20 ml/kg/min pri starejših; zdravi netrenirani moški, stari 25 let, imajo VO_2max okoli 40 ml/kg/min (pri ženskah so vrednosti za približno 15–20 % nižje) (Strasser in Burtscher, 2018). Pri splošni populaciji se obremenilni testi po navadi izvajajo na kolesu ali tekalni stezi (Steinach in Gunga, 2021). Pri športnikih je zaželeno, da je testiranje prilagojeno posameznikovemu športu – kolesar naj bi bil na primer testiran na cikloergometru, tekač na tekalni stezi, veslač na veslaškem ergometru in podobno –, saj lahko v nasprotnem primeru zaradi drugačnih vzorcev gibanja, uporabljene muskulature in oskrbe z energijo dobimo nepravilne rezultate, ki v večini primerov podcenjujejo športnikove sposobnosti (Steinach in Gunga, 2021). Zamed splošno populacijo je testiranje kardiorespiratorne zmogljivosti razmeroma dobro raziskano, pri posameznikih s PH pa primanjkuje dokazov o optimalnem načinu testiranja (Morgan idr., 2019). Pri njih je to zapleteno zaradi somatske in avtonomne disfunkcije, ki se razlikuje od posameznika do posameznika (Au idr., 2018). Testi so izpostavljeni variabilnosti, saj so lahko končne maksimalne vrednosti netočne zaradi različnih dejavnikov, na primer zaznanega napa, bolečine, moči mišic roke in avtonomne disfunkcije (Au idr., 2017; Currie idr., 2015; Nash idr., 2007; van Drongelen idr., 2006). Najpogosteje se pri posameznikih s PH ocenjuje VO_2peak (najvišja zabeležena poraba kisika med določeno obremenilno nalogo oziroma testiranjem), in sicer z uporabo ročnega ergometra (Eerden idr., 2018). Protokoli testiranja se med seboj nekoliko razlikujejo, v večini primerov pa gre za poganjanje ročnega ergometra proti upor, ki se običajno stopnjuje na eno do tri minute. Test se izvaja do izčrpano-

sti oziroma do točke, ko preiskovanec ne more več vzdrževati na začetku določene konstantne hitrosti vrtenja. Kriteriji, po katerih se presoja, ali je preiskovanec dosegel VO_2peak , so prav tako različni, po navadi pa se gleda, da je dosežen respiratorni količnik izmenjave plinov $\text{RER} > 1$ (anaerobni prag), da je dosežen plato porabe kisika in/ali da je dosežena srčna frekvenca blizu najvišje srčne frekvence, določene glede na starost (Eerden idr., 2018).

Ročna ergometrija je ponovljiva in veljavna metoda za merjenje kardiorespiratornih parametrov pri posameznikih s PH (Eerden idr., 2018; Myers idr., 2007), vendar ima nekatere omejitve – je zamudna ter zahteva prisotnost visoko usposobljenega osebja in posebno opremo, ki je tudi precej draga (Vanderthommen idr., 2002). Terenski testi (na primer 6-minutni test poganjanja) se lahko s posredno oceno VO_2peak uporabljajo kot alternativa ročni ergometriji. V primerjavi s to imajo nekatere pomembne prednosti: so cenejši in enostavnejši za izvajanje ter zahtevajo malo sredstev v smislu specializirane opreme in usposobljenega osebja (Vanderthommen idr., 2002). Še ena pomanjkljivost ročne ergometrije je, da osebe s PH (ki za premikanje in vsakodnevne dejavnosti najpogosteje uporabljajo ročni invalidski voziček) pri poganjanju ročnega ergometra izvajajo neznan in nefunkcionalen vzorec gibanja, ki ga v vsakdanjem življenju niso vajene; to bi lahko vplivalo na sposobnost osebe, da doseže maksimalen napor, in posledično na rezultat testiranja (Morgan idr., 2019). Alternativa je testiranje VO_2peak na invalidskem vozičku.

Da bi bili uporabni, morajo biti terenski testi ter alternativna testiranja in ocenjevanja VO_2peak veljavna in ponovljiva (Vanderthommen idr., 2002). Namen tega članka je ugotoviti veljavnost in/ali ponovljivost testiranja za posredno ali neposredno oceno VO_2peak oziroma ugotoviti njihovo uporabnost pri osebah s PH ter primerjati testiranje med sabo.

■ Ocenjevanje VO_2peak s pomočjo rezultatov terenskih testov

Po ugotovitvah razpoložljive literature lahko na podlagi rezultatov terenskega testa (prevožene razdalje) posredno ocenimo VO_2peak . Uporabimo lahko na primer rezultat večstopenjskega terenskega testa poganjanja, ki so ga za izvedbo raziskave

pripravili Vanderthommen idr. (2002). Ta dvoranski test, sestavljen iz osemkotnega poligona (15 m x 15 m), na katerem preiskovanci vsako minuto povečajo hitrost poganjanja za eno stopnjo do izčrpanosti, je odlično ponovljiv (ICC = 0,99), z njim pa lahko napovemo 59 % variance v VO_2peak (z naslednjo enačbo: VO_2peak (ml/kg/min) = $18,03 + 0,78 \times \text{št. izvedenih stopenj na testu}$). Visoko je ponovljiv tudi za doseženi VO_2peak (ICC = 0,88), ki so ga med testom v raziskavi merili s prenosnim sistemom analize zraka Cosmed K4b2 (COSMED, Italija; ta prenosni spirometer je bil pogosto uporabljen tudi v drugih raziskavah). Še en terenski test, opisan v raziskavah, je 6-minutni test poganjanja (variacija 6-minutnega testa hoje) (Bass idr., 2020; Cowan idr., 2012). Pri njem morajo preiskovanci v šestih minutah po 30 m dolgem poligonu v obliki številke osem prevoziti čim daljšo razdaljo (vmes lahko kadarkoli upočasnijo oziroma se ustavijo). Po ugotovitvah raziskave Cowan idr. (2012) je, ko gre za rezultat (prevoženo razdaljo), odlično ponovljiv (ICC = 0,97), vendar je njegova veljavnost za določanje telesne pripravljenosti (dobra/slaba) glede na določeno mejo prevožene razdalje dokaj slaba: kljub 86-odstotni občutljivosti je specifičnost le 33-odstotna (test je glede na določeno mejo pravilno prepoznal 86 % slabo telesno pripravljenih posameznikov in le 33 % dobro telesno pripravljenih). Je pa rezultat testa veljaven za oceno VO_2peak ($r = 0,75$ – močna korelacija, primerjano z ročno ergometrijo (Bass idr., 2020)). Prav tako je test zelo natančen pri neposrednem ocenjevanju VO_2peak (VO_2peak , izmerjen s prenosnim spirometrom med testom, je bil v zelo močni korelaciji ($r = 0,92$) z VO_2peak , izmerjenim med ročno ergometrijo) (Bass idr., 2020). V raziskavi Vinet idr. (1996) so za direktno merjenje VO_2peak potrdili tudi veljavnost terenskega testa na tartanski stezi, dolgi 400 m (prilagojen Leger-Boucherev test), kjer so se preiskovanci začeli poganjati s hitrostjo 4 km/h in jo vsako minuto stopnjevali za 1 km/h (med VO_2peak , izmerjenim s prenosnim sistemom analize zraka med testom, in VO_2peak , izmerjenim med ergometrijo na invalidskem vozičku, ni bilo statistično značilne razlike).

Čeprav z rezultati terenskih testov ne moremo povsem natančno napovedati VO_2peak , so ti testi zelo uporabni, saj lahko z njimi z majhnimi stroški ter z manjšo porabo časa in sredstev v grobem dokaj dobro ocenimo telesno pripravljenost osebe. Z vidika javnega zdravja je prepoznavanje

oseb na invalidskih vozičkih, ki bi lahko imele največ koristi od vadbenih ukrepov, to je oseb z nizko telesno pripravljenostjo, bolj pomembno kot ocenjevanje njihove natančne kardiorespiratorne zmogljivosti. Poleg tega terenski testi omogočajo celostno oceno osebe in invalidskega vozička, saj je mobilnost na invalidskem vozičku povezana ne samo s kardiorespiratorno zmogljivostjo posameznika, temveč tudi z njegovo tehniko poganjanja, z mehanskimi značilnostmi vozička in s prilagoditvijo teh značilnosti posameznikovi funkcionalni zmogljivosti (Vanderthommen idr., 2002). Vsi ti parametri, ki jih terenski test posredno oceni, so pomembni za neodvisnost in socialno vključenost osebe na invalidskem vozičku (Vanderthommen idr., 2002). Seveda pa je merjenje VO_2peak z laboratorijsko opremo (ergometrija) primernejše takrat, ko je potrebna natančna meritev.

■ Napovedovanje VO_2peak s spremenljivkami mišično-skeletne kondicije in submaksimalno testiranje

V raziskavi Chang idr. (2019) so pokazali, da je mogoče VO_2peak pri paraplegikih dobro napovedati (81,1 % variance) tudi s preprostim antropometričnimi spremenljivkami in spremenljivkami mišično-skeletne kondicije (testi mišične jakosti, vzdržljivosti in gibljivosti zgornjih udov: test jakosti stiska pesti, test števila upogibov komolca v 2 min s 4 kg utežjo in test praskanja hrbta). Te spremenljivke se da izmeriti z dokaj poceni in lahko dostopnimi orodji – to je velika prednost, zlasti če ne potrebujemo natančne vrednosti VO_2peak ali če oseba ne želi oziroma zaradi omejitev ne more izvajati obremenilnega testiranja.

Če oseba ne želi ali ne more izvajati maksimalnega obremenilnega testiranja, se lahko izvede tudi submaksimalno testiranje. Prednost slednjega je, da se z njim izognemo nekaterim omejitvam pri maksimalnem obremenilnem testiranju, to je namreč pri posameznikih s PH verjetno omejeno zaradi perifernih dejavnikov, ki zahtevajo kombinacijo aerobne pripravljenosti in moči zgornjih okončin (Au idr., 2017; Lenton idr., 2008). V študijah so poročali, da se VO_2peak poveča s treningom moči pri PH, kar kaže, da so za izboljšanje rezultata

testiranja morda delno odgovorne mišične spremembe in ne aerobne izboljšave (Nash idr., 2007). Ena izmed možnosti submaksimalnega testiranja je napovedovanje VO_2peak s pomočjo porabe kisika (VO_2) na pragu ventilacije (doseženem med ročno ergometrijo), kot so ugotovili v raziskavi Au idr. (2018). Prag ventilacije je opredeljen kot točka, pri kateri aerobni metabolizem ne prispeva več k celotni proizvodnji energije med vadbo (Myers idr., 2007). Določanje tega se pogosto uporablja za spremljanje telesne pripravljenosti in predpisovanje vadbe pri zdravih posameznikih ter tudi pri nekaterih športnikih s PH (Kodama idr., 2009; Ross idr., 2016). Po izsledkih raziskave Au idr. (2018) je to smiselno tudi pri nešportnih posameznikih s PH, saj je VO_2 na pragu ventilacije v zelo močni korelaciji z VO_2peak , izmerjenim med ročno ergometrijo ($r = 0,96$). Ta oblika testiranja predstavlja klinično pomembno alternativo za ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti, vendar je treba omeniti, da je bolj uporaben za posameznike s paraplegijo, saj se prag ventilacije pri posameznikih s tetraplegijo težje določi (v raziskavi so ga lahko določili le 68 % tetraplegikov).

Druga možnost submaksimalnega testiranja je 6-minutni test ročne ergometrije, ki so ga opisali Hol idr. (2007). Test vključuje šest minut submaksimalnega poganjanja ročnega ergometra pri konstantni izhodni moči (nastavljena tako, da v ustaljenem stanju izzove 60–70 % najvišjega starostno predvidenega srčnega utripa ali oceno 11–15 na Borgovi lestvici). Test je visoko ponovljiv za določanje VO_2 v ustaljenem stanju (ICC = 0,81) ter ima dobro veljavnost, saj je bila korelacija med VO_2peak med ročno ergometrijo in VO_2 med 6-minutnim testom zelo močna ($r = 0,92$). Totasy de Zepetnek idr. (2016) so za napovedovanje VO_2peak iz VO_2 , doseženega na 6-minutnem testu, zapisali naslednjo enačbo: VO_2peak (ml/kg/min) = $1,501 \times (\text{VO}_2) - 0,940$. Korelacija med izmerjenim in izračunanim VO_2peak je bila v njihovi raziskavi zelo močna ($r = 0,89$), med njima ni bilo statistično značilne razlike.

■ Neposredno merjenje VO_2peak

Kot že omenjeno, je zlati standard za merjenje kardiorespiratorne zmogljivosti pri osebah s PH ročna ergometrija (Eerden idr., 2018), vendar preiskovanci pri poganjanju ročnega ergometra izvajajo neznan in

nefunkcionalen vzorec gibanja. To pa ne drži za ergometrijo na invalidskem vozičku, pri kateri se preiskovanci poganjajo na lastnem invalidskem vozičku in tako izvajajo gib, ki so ga vajeni. Poleg tega se pri tej ergometriji z uporabo valjčkov ali tekalne steze lahko spreminja tudi naklon, kar še bolj posnema vsakodnevne ovire invalidov, saj se pogosto srečujejo s klančinami (Hurd idr., 2009). Ta način testiranja je tako lahko tudi dober trening za posameznike na invalidskih vozičkih. V vključenih raziskavah, pri katerih je bila izvedena ergometrija na invalidskem vozičku (na motorizirani tekalni stezi ali na sistemu valjčkov), so ugotovili, da je ta visoko ponovljiva ($ICC = 0,82$ – Morgan idr., 2019; $ICC = 0,84$ – Gauthier idr., 2017) in veljavna ($r = 0,84$ – Martel idr., 1991; $r = 0,79$ – Morgan idr., 2019; Cooper idr., 1999; primerjano z ročno ergometrijo) za testiranje VO_2peak . Tudi Baumgart idr. (2020), ki so v svojem sistematičnem pregledu literature in metaanalizi pregledali 19 raziskav, ki so primerjale doseženi VO_2peak na invalidskem vozičku (na tekalni stezi ali na sistemu valjčkov) in pri ročni ergometriji, so ugotovili, da se z obema metodama doseže enak VO_2peak (ni bilo statistično značilne razlike). Avtorji so zaključili, da razlike v načinu poganjanja, vključno z možnimi razlikami pri vključenosti mišic trupa, očitno ne vplivajo na VO_2peak , zato se za njegovo testiranje ti dve metodi lahko uporabljata izmenljivo. Pomembno pa je poudariti, da se pri vrhunskih športnikih s PH priporoča (tako kot pri drugih vrhunskih športnikih (Steinach in Gunga, 2021)), da se pogoji testiranja prilagodijo posameznikovemu športu za pridobitev čim bolj realne in relevantne vrednosti VO_2peak (Bernardi idr., 2010; Cooper idr., 1999). Pri športnikih, ki na primer dirkajo na invalidskih vozičkih, se svetuje izvajanje ergometrije na vozičku, pri tistih, ki se na primer ukvarjajo z namiznim tenisom, se lahko uporablja ročna ergometrija (Cooper idr., 1999).

Ena izmed možnosti testiranja VO_2peak je tudi testiranje v vodi, ki so ga izvedli Ogonowska-Slodownik idr. (2019). Testiranec je bil v vodi stabiliziran z elastičnim trakom in vzgonskim pasom, po potrebi je imel za dodaten upor v rokah uteži. Izvajal je tekoče gibanje z vso oživčeno muskulaturo (roke, trup, noge), test pa je bil z uporabo metronoma postopno stopnjevan do izčrpanosti. Na podlagi rezultatov te raziskave je takšno testiranje veljavno ($r = 0,72$, primerjano z ročno ergometrijo) in odlično ponovljivo ($r = 0,93$). Poleg tega so – čeprav razlika ni bila statistično značilna – preisko-

vanci v vodi dosegli malenkost višje vrednosti VO_2peak kot pri testiranju z ročnim ergometrom na kopnem. Prednosti testiranja VO_2peak v vodi so, da slednja zagotavlja vzgon in omogoča aktivacijo vseh oživčenih mišičnih skupin v telesu (v nasprotju z ročnim ergometrom), tudi tistih, ki so zaradi poškodbe šibkejši (pri nepopolnih PH) in jih na kopnem preiskovanci ne bi mogli aktivirati. Avtorji zato predpostavljajo, da se s testiranjem v vodi lahko doseže resničen VO_2peak , vendar so potrebne nadaljnje raziskave, ki bi to potrdile – VO_2peak , dosežen v vodi, vendarle ni bil statistično značilno višji od VO_2peak , doseženega na kopnem.

Še ena izmed možnosti testiranja VO_2peak je testiranje med robotsko asistirano hojo s podporo telesne teže na tekalni stezi, kot so ugotovili Gorman idr. (2014), ki so testirali posameznike z nepopolno motorično PH med hojo v eksoskeletu Lokomat® (Hocoma). Ta način je ponovljiv ($r = 0,96$) in veljaven ($r = 0,87$, primerjano z ročno ergometrijo). Veljavnost je bila boljša pri posameznikih s tetraparezo kot pri tistih s paraparezo (verjetno zato, ker imajo slednji normalno funkcijo zgornjih okončin in so se lahko bolj potrudili na ročnem ergometru kot na tekalni stezi, kjer so morali uporabljati paraparetične spodnje okončine) (Gorman idr., 2014). Tudi Jack idr. (2010) so primerjali VO_2peak , dosežen pri poganjanju ročnega ergometra, in VO_2peak , dosežen na tekalni stezi z uporabo eksoskeleta Lokomat®, našli samo ti dve raziskavi, ki se po rezultatih razlikujeta, bi bilo treba izvesti več raziskav, ki bi ugotavljale, ali hoja s pomočjo eksoskeleta Lokomat® na tekalni stezi izzove višji VO_2peak kot poganjanje ročnega ergometra (in ali je torej primernejša za oceno tega parametra). Tako testiranje je lahko uporabno, kadar želimo na primer ugotoviti VO_2peak pri posamezniku, ki zaradi prevelikega tonusa v mišicah zgornjih okončin ne more izvesti testiranja z ročnim ergometrom. Slabost pa je, da lahko eksoskelet za testiranje uporabimo le pri posameznikih z nepopolno poškodbo hrbtenjače, saj je nekaj aktiv-

nega premikanja potrebnega za doseg VO_2peak .

■ Vrednosti VO_2peak in najvišje moči

Med pregledanimi raziskavami so se dejanske vrednosti doseženega VO_2peak precej razlikovale: od $15,9 \pm 2,0$ ml/kg/min v raziskavi Morgan idr. (2019) do $40,20 \pm 8,47$ ml/kg/min v raziskavi Bernardi idr. (2010). To je pričakovano ob tem, da so bili v nekatere raziskave vključeni sedentarni ali zmerno telesno aktivni posamezniki s PH, v nekatere pa vrhunski športniki (v raziskavi Bernardi idr. (2010) so bili preiskovanci paraolimpijci). Poleg tega so bile v raziskavah, pri katerih je bil delež tetraplegikov večji, vrednosti nižje – najnižje so bile v raziskavi Morgan idr. (2019), kjer je bilo 70 % tetraplegikov (pri večini preostalih raziskav je bila večina preiskovancev paraplegikov). Povprečne vrednosti VO_2peak so pri tetraplegikih nižje, saj imajo manj aktivne mišične mase – to pomeni tudi nižjo stopnjo porabe kisika, saj tega porabljajo le aktivne mišice za proizvodnjo energije za vzdrževanje telesne aktivnosti (Cooper idr., 1999; Simmons idr., 2014; Steinach in Gunga, 2021). Omenjeno se sklada s sistematičnim pregledom Eerden idr. (2018), v katerem navajajo, da so bile vrednosti VO_2peak najnižje pri netreniranih posameznikih s tetraplegijo, najvišje pa pri treniranih posameznikih s paraplegijo. Namen tega pregleda literature je bil povzeti in opredeliti uporabnost znanih maksimalnih in submaksimalnih laboratorijskih obremenilnih testov za ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti pri osebah s PH. Avtorji navajajo, da je za maksimalno testiranje kardiorespiratorne zmogljivosti pri osebah s PH morda najustreznejša ročna ergometrija, saj je bila največja moč (angl. »peak power output«) pri ročni ergometriji nekoliko večja kot pri ergometriji na vozičku, čeprav za VO_2peak med njima ni bilo statistično značilnih razlik. Pri raziskavah, ki smo jih pregledali in ki primerjajo rezultate merjenja parametrov kardiorespiratorne zmogljivosti med ročno ergometrijo in ergometrijo na invalidskem vozičku, je bila največja dosežena moč res nekoliko večja pri ročni ergometriji (Martel idr., 1991; Tørhaug idr., 2016), medtem ko pri VO_2peak in drugih parametrih kardiorespiratorne zmogljivosti (subjektivni občutek napora, najvišja srčna frekvenca, največja pljučna ventilacija, najvišji količnik izmenjave plinov – RER) ni bilo statistično značilnih razlik

(Martel idr., 1991; Tørhaug idr., 2016). Če nas torej pri testiranju zanima tudi največja dosežena moč, je s tega vidika bolje uporabiti ročno ergometrijo. Če pa nas zanima samo VO_2 peak (in drugi parametri kardiorespiratorne zmogljivosti), sta obe metodi enako uporabni, vendar s to prednostjo ergometrije na invalidskem vozičku, da je gibanje pri njej do testirancev bolj prijazno, saj so ga bolj vajeni. Tudi Eerden idr. (2018) navaja, da ergometrija na invalidskem vozičku poda relevantne informacije o funkcioniranju posameznika v vsakdanjem življenju (ter da je za submaksimalno testiranje bolj uporabna kot ročna ergometrija).

Vredno je omeniti, da je treba biti pri testiranju kardiorespiratorne zmogljivosti pozoren, da so pogoji čim bolj podobni. Na nekatere parametre, ki lahko vplivajo na rezultate testiranja in s tem na ponovljivost testa, ne moremo vplivati (na primer na dnevno variabilnost v jakosti, koordinaciji, koncentraciji in/ali motivaciji preiskovancev), na nekatere pa je težko vplivati oziroma imamo slab nadzor nad njimi, na primer na uživanje stimulanov (kava, tobak), stopnjo verbalne spodbude med preiskovanci in njihovo različno odzivanje nanjo ter stopnjo utrujenosti zaradi različnih dejavnikov, kot so kakovost spanca prejšnjo noč, stres, aktivnost čez dan in podobno (Currell in Jeukendrup, 2008; American College of Sports Medicine, 2013). Pomembno je biti pozoren na tiste parametre, na katere lahko vplivamo: na primer čas testiranja (testiranje ob istem delu dneva) in protokol (ki mora biti čim bolj podobno izveden kot pri prejšnjih testiranjih) (Gauthier idr., 2017). Pri terenskih testih moramo biti pozorni tudi na sestavo tal, saj različne površine povzročajo različna trenja, to pa lahko vpliva na rezultat testa (Vanderthommen idr., 2002).

■ Testiranje drugih spremenljivk kardiorespiratorne zmogljivosti

Večina pregledanih raziskav je poleg vrednosti VO_2 peak vsaj delno poročala tudi o nekaterih drugih vrednostih kardiorespiratorne zmogljivosti. V raziskavi Bass idr. (2020), v kateri so primerjali 6-minutni test poganjanja in ročno ergometrijo, se vrednosti porabe kisika, saturacije krvi s kisikom in sistoličnega krvnega tlaka med testoma niso statistično značilno razlikovale. Najvišja srčna frekvenca, pljučna

ventilacija, proizvodnja ogljikovega dioksida, RER, subjektivni občutek napora in diastolični krvni pritisk pa so bili statistično značilno višji med ročno ergometrijo kot med 6-minutnim testom poganjanja. V raziskavi Morgan idr. (2019), pri kateri so primerjali ergometrijo na invalidskem vozičku in ročno ergometrijo, pa se vrednosti, merjene poleg VO_2 peak (RER, najvišja srčna frekvenca in subjektiven občutek napora), med testoma niso razlikovale. Tudi Cooper idr. (1999) so ob primerjavi ergometrije na invalidskem vozičku in ročne ergometrije ugotovili, da se najvišja srčna frekvenca in najvišja minutna ventilacija med testoma nista razlikovali. V raziskavi Bass idr. (2020) lahko razlike v vrednostih omenjenih spremenljivk delno pripišemo različnim zahtevam v anaerobnem metabolizmu med testoma (Meyer idr., 2004): 6-minutni test poganjanja je test s fiksnim trajanjem in cikličnim nihanjem delovne obremenitve, medtem ko je ročna ergometrija stopnjevano testiranje s postopnim povečevanjem delovne obremenitve na vsako minuto oz. tri minute (običajno traja od osem do 12 minut). Med 6-minutnim testom mišične zahteve nenehno nihajo zaradi ciklične delovne obremenitve, ki jo povzročajo oblika poligona v obliki osmice, faze potiskanja in počitka ob poganjanju z invalidskim vozičkom ter učinki inercije, ki so posledica zaporednih faz pospeševanja in upočasnevanja na različnih delih osmice (Bass idr., 2020). Kadar so mišične zahteve minimalne, lahko aerobni metabolizem pretežno zadovoljuje energetske potrebe (Romijn idr., 1993). Zato se lahko v teh obdobjih zmanjša odvisnost od anaerobnega metabolizma, kar lahko zmanjša kopičenje mlečne kisline in metabolno acidozo skupaj s sproščanjem CO_2 zaradi kompenzatorne hiperventilacije (Meyer idr., 2004). To bi lahko pojasnilo nižjo pljučno ventilacijo, proizvodnjo CO_2 in RER med 6-minutnim testom poganjanja v primerjavi z ročno ergometrijo. Poleg tega so ta obdobja nižje intenzivnosti morda prispevala tudi k nižji najvišji srčni frekvenci in manjšemu subjektivnemu občutku napora. Druga ključna razlika med testoma je v tem, da je pri ročni ergometriji delovna obremenitev predpisana (število vrtljajev na minuto in upor na ergometru), medtem ko je pri 6-minutnem testu pod lastnim nadzorom. To lahko povzroči razlike v motivaciji in naprežanju (preiskovanci se morda med 6-minutnim testom ne poganjajo tako močno) ter posledično različne vrednosti prej omenjenih spremenljivk. Vendar je pomembno omeniti, da je bil RER

med obema testoma $\geq 1,3$, kar potrjuje, da sta oba povzročila maksimalni napor (American College of Sports Medicine, 2021).

■ Pomanjkljivosti IN priložnosti za nadaljnje raziskovanje

Raziskave, ki smo jih pregledali, so imele nekatere pomanjkljivosti. Na splošno je bil v vseh vzorci preiskovancev razmeroma majhen (največ 52 v raziskavi Totosy de Zepetnek idr. (2016)). Poleg tega je bilo v vseh veliko več moških preiskovancev (ali izključno moški preiskovanci); to je sicer pričakovano, saj je 80 % odraslih s poškodbo hrbtenjače moškega spola (Morgan idr., 2019). Večje število moških v raziskavah tako morda niti ni slabost, saj je vzorec bolj reprezentativen. Je pa slabost, da so v nekaterih raziskavah (Bernardi idr., 2010; Gauthier idr., 2017; Vanderthommen idr., 2002) vključili še uporabnike invalidskih vozičkov z drugimi patologijami (amputacijo spodnjih okončin, poliomielitisom, cerebralno paralizo in podobno), kar onemogoča posplošitev rezultatov samo na osebe s PH (čeprav je bil delež preiskovancev z drugimi patologijami majhen). V nekaterih raziskavah so na primer vključili samo paraplegike, kar onemogoča posplošitev na vse osebe s PH.

V prihodnosti bi bilo treba na področju veljavnosti in ponovljivosti testov za ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti oseb s PH izvesti več raziskav, ki bi imele večje velikosti vzorca in izvedene analize po podskupinah (na primer po spolu in glede na stopnjo poškodbe – paraplegija in tetraplegija). Poleg tega bi bilo dobro pri vseh raziskavah, ki ugotavljajo korelacijo med rezultatom terenskega testa in vrednostjo VO_2 peak, sestaviti še regresijsko enačbo za napoved VO_2 peak. V zvezi z ergometrijo v vodi so potrebne nadaljnje raziskave, ki bi potrdile veljavnost in ponovljivost ter morda večjo smiselnost takšnega testiranja v primerjavi z ročno ergometrijo. Treba bi bilo tudi preveriti, kako je z napovedjo VO_2 peak s pomočjo antropometričnih spremenljivk in spremenljivk mišično-skeletne kondicije pri tetraplegikih. Dobro bi bilo izvesti več raziskav, ki bi primerjale doseženi VO_2 peak pri ročni ergometriji in pri robotsko asistirani hoji s podporo telesne teže na tekalni stezi. Več raziskav bi se lahko izvedlo tudi na temo submaksimalnega testiranja in napovedovanja VO_2 peak iz rezultata tega.

Zaključek

Posamezniki s PH so zaradi telesne nedeljavnosti izpostavljeni večjemu tveganju za kronične nenalezljive bolezni in umrljivosti zaradi njih, zato je nujno, da bi se pogostejše telesno udeleževali. Za predpisovanje učinkovitih programov aerobne vadbe in spremljanje vpliva rehabilitacije skozi čas je ocenjevanje kardiorespiratorne zmogljivosti ključnega pomena. Uveljavljena metoda za ocenjevanje te pri osebah s PH je merjenje VO_2peak z ročno ergometrijo, ki je ponovljiva in veljavna metoda, vendar ima nekatere omejitve, zaradi katerih je smiselno razmisliti tudi o drugih načinih testiranja in ocenjevanja VO_2peak . Posredno ga lahko ocenimo na primer z uporabo rezultata večstopenskega terenskega testa poganjanja in 6-minutnega terenskega testa poganjanja, ki sta veljavna in ponovljiva za oceno VO_2peak . Čeprav z njima ne moremo povsem natančno napovedati VO_2peak , sta lahko zelo uporabna, saj sta z vidika cene, časa in potrebnih sredstev manj zahtevna od laboratorijskega testiranja, poleg tega pa omogočata celostno oceno mobilnosti osebe na invalidskem vozičku. Pri laboratorijskem testiranju je poleg ročne ergometrije zelo uporabna ergometrija na invalidskem vozičku. Je veljavna in ponovljiva za merjenje VO_2peak , poleg tega preiskovanci – v nasprotju z ročno ergometrijo – izvajajo znan in funkcionalen vzorec gibanja, na napravi pa se lahko med drugim spreminja naklon (kar posnema klančine v vsakdanjem življenju invalidov). Je pa treba omeniti, da je največja dosežena moč večja pri ročni ergometriji. Če nas torej pri testiranju zanima tudi ta parameter, je s tega vidika boljše uporabiti ročno ergometrijo. Če pa nas zanima samo VO_2peak (in drugi parametri kardiorespiratorne zmogljivosti), sta obe metodi enako uporabni, saj v pregledanih raziskavah ni bilo statistično značilnih razlik. Tudi laboratorijsko testiranje VO_2peak v vodi je veljavno in ponovljivo, poleg tega voda zagotavlja vzgon in omogoča aktivacijo vseh oživčenih mišičnih skupin v telesu. Za posameznike z nepopolno poškodbo hrbtenjače je uporabno tudi testiranje med robotsko asistirano hojo s podporo telesne teže na tekalni stezi. Kadar oseba ne želi ali ne more izvajati maksimalnega testiranja, lahko VO_2peak dokaj dobro napovemo tudi s preprostimi antropometričnimi spremenljivkami in spremenljivkami mišično-skeletne kondicije ali pa se izvede submaksimalno testiranje (na primer 6-minutni test ročne ergometrije in napoved VO_2peak iz

VO_2 v ustaljenem stanju ali napoved VO_2peak s pomočjo VO_2 na pragu ventilacije).

Literatura

- American College of Sports Medicine. (2013). *ACSM's Health-Related Physical Fitness Assessment Manual*. Lippincott Williams & Wilkins.
- American College of Sports Medicine. (2021). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Wolters Kluwer.
- Au, J. S., Sithamparapillai, A., Currie, K. D., Krassioukov, A. V., MacDonald, M. J. in Hicks, A. L. (2018). Assessing Ventilatory Threshold in Individuals With Motor-Complete Spinal Cord Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 99(10), 1991–1997. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.05.015>
- Au, J. S., Totosy DE Zepetnek, J. O. in Macdonald, M. J. (2017). Modeling Perceived Exertion during Graded Arm Cycling Exercise in Spinal Cord Injury. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(6), 1190–1196. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001203>
- Bass, A., Brosseau, R., Décary, S., Gauthier, C. in Gagnon, D. H. (2020). Comparison of the 6-Min Propulsion and Arm Crank Ergometer Tests to Assess Aerobic Fitness in Manual Wheelchair Users With a Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 99(12), 1099–1108. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000001534>
- Baumgart, J. K., Brurok, B. in Sandbakk, Ø. (2020). Comparison of Peak Oxygen Uptake Between Upper-Body Exercise Modes: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Physiology*, 11, 412. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00412>
- Bernardi, M., Guerra, E., Di Giacinto, B., Di Cesare, A., Castellano, V. in Bhambhani, Y. (2010). Field Evaluation of Paralympic Athletes in Selected Sports: Implications for Training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(6), 1200–1208. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c67d82>
- Chang, J. S., Lee, Y. H. in Kong, I. D. (2019). Predictive factors of peak aerobic capacity using simple measurements of anthropometry and musculoskeletal fitness in paraplegic men. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(6), 925–933. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08531-6>
- Cooper, R., O'Connor, T., Robertson, R., Langbein, W. in Baldini, F. (1999). An investigation of the exercise capacity of the Wheelchair Sports USA team. *Assistive Technology*, 11(1), 34–42. <https://doi.org/10.1080/10400435.1999.10131983>
- Cowan, R., Callahan, M. in Nash, M. (2012). The 6-min Push Test Is Reliable and Predicts Low Fitness in Spinal Cord Injury. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(10), 1993–2000. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31825cb3b6>
- Currie, K. D., West, C. R., Hubli, M., Gee, C. M. in Krassioukov, A. V. (2015). Peak heart rates and sympathetic function in tetraplegic nonathletes and athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(6), 1259–1264. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000514>
- Eerden, S., Dekker, R. in Hettinga, F. J. (2018). Maximal and submaximal aerobic tests for wheelchair-dependent persons with spinal cord injury: a systematic review to summarize and identify useful applications for clinical rehabilitation. *Disability and Rehabilitation*, 40(5), 497–521. <https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1287623>
- Engelking, L. R. (2015). Exercise ($\text{V}\text{O}_2\text{(max)}$ and RQ). V *Textbook of Veterinary Physiological Chemistry* (str. 493–497). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391909-0.50078-5>
- Froehlich-Grobe, K., Jones, D., Businelle, M. S., Kendzor, D. E. in Balasubramanian, B. A. (2016). Impact of disability and chronic conditions on health. *Disability and Health Journal*, 9(4), 600–608. <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2016.04.007>
- Gauthier, C., Arel, J., Brosseau, R., Hicks, A. L. in Gagnon, D. H. (2017). Reliability and minimal detectable change of a new treadmill-based progressive workload incremental test to measure cardiorespiratory fitness in manual wheelchair users. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 40(6), 759–767. <https://doi.org/10.1080/10790268.2017.1369213>
- GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators. (2019). Global, regional, and national burden of traumatic brain injury and spinal cord injury, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet. Neurology*, 18(1), 56–87. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(18\)30415-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(18)30415-0)
- Gorman, P. H., Geigle, P. R., Chen, K., York, H. in Scott, W. (2014). Reliability and relatedness of peak VO_2 assessments during body weight supported treadmill training and arm cycle ergometry in individuals with chronic motor incomplete spinal cord injury. *Spinal Cord*, 52(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.6>
- Hol, A. T., Eng, J. J., Miller, W. C., Sproule, S. in Krassioukov, A. V. (2007). Reliability and validity of the six-minute arm test for the evaluation of cardiovascular fitness in people with spinal cord injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(4), 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.12.044>
- Hurd, W. J., Morrow, M. M. B., Kaufman, K. R. in An, K.-N. (2009). Wheelchair propulsion demands during outdoor community ambulation. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*,

- 19(5), 942–947. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2008.05.001>
20. Jack, L. P., Purcell, M., Allan, D. B. in Hunt, K. J. (2010). Comparison of peak cardiopulmonary performance parameters during robotics-assisted treadmill exercise and arm crank ergometry in incomplete spinal cord injury. *Technology and Health Care: Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 18(4–5), 285–296. <https://doi.org/10.3233/THC-2010-0591>
21. Kodama, S., Saito, K., Tanaka, S., Maki, M., Yachi, Y., Asumi, M., Sugawara, A., Totsuka, K., Shimano, H., Ohashi, Y., Yamada, N. in Sone, H. (2009). Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: a meta-analysis. *JAMA*, 301(19), 2024–2035. <https://doi.org/10.1001/jama.2009.681>
22. Martel, G., Noreau, L. in Jobin, J. (1991). Physiological responses to maximal exercise on arm cranking and wheelchair ergometer with paraplegics. *Spinal Cord*, 29(7), 447–456. <https://doi.org/10.1038/sc.1991.61>
23. Meyer, T., Faude, O., Scharhag, J., Urhausen, A. in Kindermann, W. (2004). Is lactic acidosis a cause of exercise induced hyperventilation at the respiratory compensation point? *British Journal of Sports Medicine*, 38(5), 622–625. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2003.007815>
24. Morgan, K. A., Taylor, K. L., Tucker, S. M., Cade, W. T. in Klaesner, J. W. (2019). Exercise testing protocol using a roller system for manual wheelchair users with spinal cord injury. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 42(3), 288–297. <https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1443542>
25. Myers, J., Lee, M. in Kiratli, J. (2007). Cardiovascular disease in spinal cord injury: an overview of prevalence, risk, evaluation, and management. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 86(2), 142–152. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31802f0247>
26. Nash, M. S., van de Ven, I., van Elk, N. in Johnson, B. M. (2007). Effects of circuit resistance training on fitness attributes and upper-extremity pain in middle-aged men with paraplegia. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(1), 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.10.003>
27. Ogonowska-Slodownik, A., Geigle, P., Gorman, P., Slodownik, R. in Scott, W. (2019). Aquatic, deep water peak VO₂ testing for individuals with spinal cord injury. *Journal of spinal cord medicine*, 42(5), 631–638. <https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1559494>
28. Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E. in Wolfe, R. R. (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *The American Journal of Physiology*, 265(3 Pt 1), E380–391. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380>
29. Ross, R., Blair, S. N., Arena, R., Church, T. S., Després, J.-P., Franklin, B. A., Haskell, W. L., Kaminsky, L. A., Levine, B. D., Lavie, C. J., Myers, J., Niebauer, J., Sallis, R., Sawada, S. S., Sui, X., Wisløff, U., American Heart Association Physical Activity Committee of the Council on Lifestyle and Cardiometabolic Health, Council on Clinical Cardiology, Council on Epidemiology and Prevention, ... Stroke Council. (2016). Importance of Assessing Cardiorespiratory Fitness in Clinical Practice: A Case for Fitness as a Clinical Vital Sign: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*, 134(24), e653–e699. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000461>
30. Simmons, O. L., Kressler, J. in Nash, M. S. (2014). Reference Fitness Values in the Untrained Spinal Cord Injury Population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(12), 2272–2278. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.015>
31. Steinach, M. in Gunga, H.-C. (2021). Exercise physiology. V *Human Physiology in Extreme Environments* (str. 81–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815942-2.00003-1>
32. Strasser, B. in Burtcher, M. (2018). Survival of the fittest: VO₂max, a key predictor of longevity? *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 23(8), 1505–1516. <https://doi.org/10.2741/4657>
33. Tørhaug, T., Brurok, B., Hoff, J., Helgerud, J. in Leivseth, G. (2016). Arm Crank and Wheelchair Ergometry Produce Similar Peak Oxygen Uptake but Different Work Economy Values in Individuals with Spinal Cord Injury. *BioMed Research International*, 2016, 5481843. <https://doi.org/10.1155/2016/5481843>
34. Totosty de Zepetnek, J. O., Au, J. S., Hol, A. T., Eng, J. J. in MacDonald, M. J. (2016). Predicting peak oxygen uptake from submaximal exercise after spinal cord injury. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquée, Nutrition Et Métabolisme*, 41(7), 775–781. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0670>
35. van Drongelen, S., de Groot, S., Veeger, H. E. J., Angenot, E. L. D., Dallmeijer, A. J., Post, M. W. M. in van der Woude, L. H. V. (2006). Upper extremity musculoskeletal pain during and after rehabilitation in wheelchair-using persons with a spinal cord injury. *Spinal Cord*, 44(3), 152–159. <https://doi.org/10.1038/sj.sc.3101826>
36. Vanderthommen, M., Francaux, M., Colinet, C., Lehance, C., Lhermerout, C., Crielaard, J. in Theisen, D. (2002). A multistage field test of wheelchair users for evaluation of fitness and prediction of peak oxygen consumption. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 39(6), 685–692.
37. Vanhees, L., Lefevre, J., Philippaerts, R., Martens, M., Huygens, W., Troosters, T. in Beunen, G. (2005). How to assess physical activity? How to assess physical fitness? *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation: Official Journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology*, 12(2), 102–114. <https://doi.org/10.1097/01.hjr.0000161551.73095.9c>
38. Vinet, A., Bernard, P.-L., Poulain, M., Varray, A., Gallis, D. L. in Micallef, J.-P. (1996). Validation of an incremental field test for the direct assessment of peak oxygen uptake in wheelchair-dependent athletes. *Spinal Cord*, 34(5), 288–293. <https://doi.org/10.1038/sc.1996.52>
39. World Health Organization. (2024). *Spinal cord injury*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>

dr. Žiga Kozinc, doc.
Univerza na Primorskem,
Fakulteta za vede o zdravju
ziga.kozinc@fvz.upr.si