
Kardiozirkulatorische, metabolische und hormonelle Adaptation von querschnittsgelähmten Sportlern unterschiedlicher Läsionshöhe in Ruhe und unter Belastung

A. Schmid (Projektleiter), D. Bültermann, A. Berg, J. Keul (†)

1 Problem

Eine vollständige Durchtrennung des Rückenmarks führt nicht nur zum Ausfall der motorischen und sensorischen Funktionen, sondern auch zur Schädigung vegetativer Funktionen, die über afferente und efferente Rückenmarksbahnen gesteuert werden. In Abhängigkeit von der anatomischen Lage und Verschaltung überwiegend der efferenten, präganglionären Fasern zum peripheren sympathischen Nervensystem im Rückenmark verursacht eine Querschnittslähmung durch Unterbrechung der Bahnen aus zentralen Zentren ein pathologisches Verhalten des sympathischen Systems unterschiedlicher Ausprägung (SCHMID et al. 1998a) und führt zu kardiozirkulatorischen und metabolischen Veränderungen in Ruhe und unter Belastung (HOPMANN et al. 1998; SCHMID et al. 1998b).

Die Funktion des sympathoadrenergen Systems ist Voraussetzung vieler physiologischer Abläufe des Menschen und hat großen Einfluss auf kardiozirkulatorische Funktionen, Stoffwechselforgänge und die hormonelle Steuerung. Während ansteigender körperlicher Belastung tritt durch die Aktivierung des sympathischen Systems eine Zunahme des freien Plasmanoradrenalins und -adrenalins mit einem gleichgerichteten Verhalten von Herzfrequenz, Schlagvolumen, Blutdruck, Glykogenolyse, Glykolyse und Lipolyse auf (LANDSBERG et al. 1996).

2 Methode

An den nachfolgenden Untersuchungen haben sich 55 Männer nach kompletter Querschnittslähmung beteiligt. Entsprechend der Lähmungshöhe wurden diese in Tetraplegiker (Lähmungshöhe oberhalb C7: TETRA, n=25), und Paraplegiker (T1 – T5: HPARA, n=10; T6 – T10: MPARA, n=10; ab T11: LPARA, n=10) unterteilt. Als Kontrollgruppe dienen 18 altersgleiche, nichtbehinderte, männliche Probanden (AB). Die Teilnehmer unterzogen sich einem Stufentest auf dem Rollstuhlgometer oder dem Laufband. Die freien Plasmaadrenalin- (A) und Plasmanoradrenalin-konzentrationen (NA) wurden radioenzymatisch aus Blut des hyperämisierten Ohrläppchens, die Basalwerte (vor) von Glukose (Hexokinase-Methode), freie Fettsäuren (Photometrie) und Insulin (RIA) aus dem Blut der V. cubitalis in Ruhe und direkt nach maximaler Ausbelastung bestimmt. Die Herzfrequenz

wurde aus dem 12-Kanal-Elektrokardiogramm (Cardiognost EK56, Fa. Hellige) und das Laktat aus dem Blut des hyperämisierten Ohrläppchens in Ruhe und am Ende jeder Belastungsstufe bestimmt. Kontinuierlich wurden die spirometrischen Daten (Oxycon, Fa. Mijhard) aufgezeichnet.

3 Ergebnisse

Die Herzfrequenz und die Sauerstoffaufnahme in Ruhe und bei Ausbelastung lag bei Tetraplegikern und Paraplegikern mit hoher Läsion niedriger als bei Paraplegikern unterhalb Th5. Tetraplegiker zeigten im Vergleich zu allen anderen untersuchten Gruppen eine niedrigere NA- und A-Konzentration in Ruhe, bei maximaler Ausbelastung konnte nur ein geringer Anstieg der Plasmakatecholamine festgestellt werden. Querschnittgelähmte unterhalb Th1 und Kontrollpersonen zeigten signifikante Anstiege von A und NA unter Belastung, die bei A nur gering ausfielen. Die Konzentrationen der Paraplegiker mit hohen Läsionen zwischen Th1 und Th5, aber auch die der Kontrollpersonen lagen zu jedem untersuchten Zeitpunkt signifikant niedriger als die der Paraplegiker mit Läsionshöhen unter Th5. Die Befunde sind in folgender Tabelle aufgeführt.

	VO ₂ [ml*min ⁻¹]	Hf [l*min ⁻¹]	P [Watt]	NA [ng/ml]	A [ng/ml]
TETRA Ruhe	281,5	67,7		0,28	0,06
max.	1027,7	110,2	33	0,34	0,08
HPARA Ruhe	327,0	73,4		0,36	0,09
max.	1818,0	172,1	67	0,91	0,14
MPARA Ruhe	350,5	79,1		0,66	0,15
max.	2177,9	181,7	79	2,08	0,25
LPARA Ruhe	349,6	76,3		0,54	0,17
max.	2248,0	176,2	72	1,52	0,30
AB Ruhe	409,2	71,4		0,37	0,11
max.	2131,8	168,9	63	0,83	0,26

Vor Belastung lagen die Glukose- und Insulinspiegel bei Tetraplegikern signifikant höher als bei Paraplegikern und Kontrollpersonen, die freien Fettsäuren höher als bei tiefen Paraplegikern und Kontrollpersonen. Die Spiegel der Paraplegiker unterschieden sich nicht. Die Gruppen der querschnittgelähmten Probanden wiesen signifikant höhere Spiegel an freien Fettsäuren auf als die Kontrollpersonen. Während unter akuter körperlicher Belastung bei allen Paraplegikern und den Kontrollpersonen freie Fettsäuren, Glukose und Insulin signifikant anstiegen, zeigten Tetraplegiker unter Belastung einen Abfall von Glukose und Insulin. Dies ist in folgender Tabelle dargestellt.

		FFS [mmol*l-1]	Glukose [mg*dl-1]	Insulin [uE*ml-1]
TETRA	Ruhe	0,82 ± 0,40 ^{3,4}	99,6 ± 10,3 ^{2,3,4}	18,2 ± 24,6 ^{2,3,4}
	max.	0,86 ± 0,43 ⁴	85,2 ± 12,1 ^{2,3,4}	11,3 ± 5,8
HPARA	Ruhe	0,67 ± 0,34 ⁴	99,7 ± 15,7 ¹	9,1 ± 2,9 ¹
	max.	0,94 ± 0,28 ⁴	106,5 ± 20,4 ¹	13,5 ± 7,3
MLPARA	Ruhe	0,60 ± 0,28 ¹	95,2 ± 11,4	10,9 ± 5,4 ¹
	max.	0,99 ± 0,33	116,7 ± 30,1 ¹	15,5 ± 10,1
AB	Ruhe	0,42 ± 0,24 ^{1,2}	90,3 ± 7,1 ¹	8,4 ± 5,0 ¹
	max.	0,52 ± 0,27 ^{1,2}	98,7 ± 10,4 ¹	16,8 ± 20,3

Signifikant unterschiedlich mit ¹ TETRA, ² HPARA, ³ MLPARA, ⁴ AB.

4 Diskussion

Bei querschnittgelähmten Menschen treten durch Unterbrechung der efferenten Bahnen eine Verminderung der innervierten Muskulatur und eine Störung des peripheren sympathischen Systems von aktivierenden zentralen Zentren mit den entsprechenden kardiozirkulatorischen, metabolischen und hormonellen Veränderungen in Ruhe und unter Belastung auf.

Die Ausprägung der Schädigung des sympathischen Systems ist abhängig vom anatomischen Verlauf der sympathischen Bahnen im Rückenmark und den Austrittspunkten. Bei Halsmarkschädigung werden die efferenten Fasern, die das Rückenmark auf Höhe Th1 bis Th5 verlassen und u.a. das Herz innervieren, unterbrochen. Die Messung der freien Plasmakatecholamine erlaubt aufgrund der sehr kurzen Halbwertszeit eine Beurteilung der aktuellen sympathischen Aktivität, dabei entstammt das in den Blutstrom gelangende Noradrenalin überwiegend postganglionären noradrenergen sympathischen Neuronen, weniger dem Nebennierenmark. Freies Plasmaadrenalin wird überwiegend aus dem Nebennierenmark, das seine Impulse über efferente Fasern aus den Segmenten zwischen Th6 und L1 erhält, freigesetzt. Übereinstimmend mit anderen Untersuchungen fand sich bei Tetraplegikern eine extreme Verminderung der körperlichen Leistungsfähigkeit, Regulationsstarre der Herzfrequenz, eine ausgeprägte Einschränkung der maximalen Sauerstoffaufnahme und nur ein geringer Anstieg der freien Adrenalin- und NoradrenalinKonzentration unter Belastung. Die vegetative Adaptation des Herzens an körperliche Belastung erfolgt bei Unterbrechung der efferenten sympathischen Bahnen im Halsmark durch Reduktion der parasymphatischen vagalen Aktivität (SCHMID et al. 1998d; SCHMID et al. 2001).

Unterschiedlich beurteilt werden Einflüsse der Querschnittlähmung bei einer Läsionshöhe tiefer als Th1 auf kardiozirkulatorische und metabolische Befunde bei Ausbelastung.

Diese Unterschiede sind weniger Folge der geringeren innervierbaren Muskelmasse, als vielmehr Folge der Störung der Freisetzung von Noradrenalin und mehr noch des Adrenalins während körperlicher Belastung. Im Vergleich zu Tetraplegikern war die Einschränkung der maximalen kardiozirkulatorischen und metabolischen Leistungsfähigkeit bei HPARA weitaus geringer ausgeprägt. Dies zeigt die Bedeutung der noradrenergen sympathischen Innervation des Herzens und der Oberkörpermuskulatur aus efferenten sympathischen Fasern mit den Austrittspunkten zwischen Th1 und Th5. Insgesamt spiegeln die Ergebnisse die anatomische Lage der Austrittspunkte der präganglionären sympathischen Fasern wieder. Zusätzlich zu der Verminderung der innervierbaren Muskelmasse ist vor allem auch die eingeschränkte kardiozirkulatorische Kapazität Ursache der deutlich eingeschränkten körperlichen Leistungsfähigkeit bei Tetraplegie. Diese Veränderungen müssen in der Trainingsplanung berücksichtigt werden, eine einfache Übertragung der Konzepte aus dem nichtbehinderten Leistungssport ist nicht möglich.

In Übereinstimmung mit den Angaben aus der Literatur wiesen Tetraplegiker erhöhte Glukose- und Insulinkonzentrationen in Ruhe als Hinweis auf eine periphere Insulinresistenz auf. Bei diesem Personenkreis wurde gehäuft eine diabetische Stoffwechsellage beobachtet (BAUMANN et al. 1994). Durch stufenweise ansteigende, erschöpfende Rollstuhlgometrie stieg die Glukose- und Insulinkonzentration im Serum bei Paraplegikern und Nichtbehinderten an. Ein gegensätzliches Verhalten mit einem Abfall der Glukose und des Insulins zeigten Tetraplegiker. KJAER et al. (1996), der zu vergleichbaren Ergebnissen kam, führt dies auf eine vermehrte periphere Glukoseaufnahme der arbeitenden Muskelzelle bei fehlender Steigerung der katecholamin-induzierten hepatischen Glykogenolyse zurück (SCHMID et al. 1994, SCHMID et al. 1998c).

Zusammenfassend weisen Querschnittgelähmte durch die behinderungsbedingte Hypomobilität eine periphere Insulinresistenz auf. Paraplegiker zeigen eine mit Nichtbehinderten vergleichbare Antwort der untersuchten Parameter auf akute körperliche Belastung. Die weitreichende Schädigung des sympathischen Nervensystems bei Tetraplegie hat eine verminderte katecholamininduzierte hepatische Glykogenolyse mit niedrigen Glukosespiegeln unter Belastung zur Folge. Um eine optimale Leistungserbringung zu gewährleisten ist deshalb die regelmäßige Kohlenhydrataufnahme unbedingt erforderlich.

5 Literatur

BAUMAN, W.A.; SPUNGEN, A.M.: Disorders of carbohydrate and lipid metabolism in veterans with paraplegia or quadriplegia: a model of premature aging. *Metabolism* 43 (1994), 749-756

- HOPMAN, M.T.; DUECK, C.; MONROE, M.; PHILIPS, W.T.; SKINNER, J.S.: Limits to maximal performance in individuals with spinal cord injury. *International Journal of Sports Medicine* 19 (1998), 98-103
- KJAER, M.; POLLACK, S.F.M.; MOHR, T.; WEISS, H.; GLEIM, G.W.; BACH, F.W.; NICOLAISEN, T.; GALBO, H.; RAGNARSSON, K.T.: Regulation of glucose turnover and hormonal responses during electrical cycling in tetraplegic humans. *American Journal of Physiology* 271 (1996), 191-199
- LANDSBERG, L.; YOUNG, J.B.: Catecholamines and the adrenal medulla. In: WILSON, J.D. (ed.): *Williams Textbook of Endocrinology*. Philadelphia 1996, 621-705
- SCHMID, A.; LEHMANN, M.; BARTUREN, J.M.; HUONKER, M.; LÖHLEIN, A.; PETERSEN, H.G.; DIMEO, F.; KEUL, J.: Verhalten von ausgewählten Hormonen bei ausdauertrainierten und nichttrainierten Paraplegikern und nichtbehinderten Kontrollpersonen. In: LIESEN, H. (ed.): *Regulations- u. Repairmechanismen*. Köln 1994, 564-567
- SCHMID, A.; HUONKER, M.; STAHL, F.; BARTUREN, J.M.; KÖNIG, D.; HEIM, M.; LEHMANN, M.; KEUL, J.: Free plasma catecholamines in spinal cord injured persons with different injury levels at rest and during exercise. *Journal of Autonomic Nervous System* 68 (1998a), 96-100
- SCHMID, A.; HUONKER, M.; BARTUREN, J.M.; STAHL, F.; SCHMIDT-TRUCKSÄSS, A.; KÖNIG, D.; GRATHWOHL, D.; LEHMANN, M.; KEUL, J.: Catecholamines, heart rate and oxygen uptake during exercise in persons with spinal cord injury. *Journal of Applied Physiology* 85 (21998) 2, 635-641
- SCHMID, A.; HUONKER, M.; BARTUREN, J.M.; BEERMANN, A.; BÜLTERMANN, D.; HEIM, M.; LEHMANN, M.; BERG, A.; KEUL, J.: Verhalten von Glukose, Insulin und Cortisol bei Querschnittgelähmten unterschiedlicher Läsionshöhen vor und nach einer Rollstuhlergometrie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 1 (1998c), 184-186
- SCHMID, A.; HUONKER, M.; STOBER, P.; BARTUREN, J.M.; SCHMIDT-TRUCKSÄSS, A.; DÜRR, H.; VÖLPEL, H.J.; KEUL, J.: Physical performance and cardiovascular and metabolic adaptation of elite female wheelchair basketball players in wheelchair ergometry and in competition. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 77 (1998d), 527-533
- SCHMID, A.; SCHMIDT-TRUCKSÄSS, A.; HUONKER, M.; KÖNIG, D.; EISENBARTH, I.; SAUERWEIN, H.; BRUNNER, C.; STORCH, M.J.; LEHMANN, M.; KEUL, J.: Catecholamines response of high performance wheelchair athletes at rest and during exercise with autonomic dysreflexia. *International Journal of Sports Medicine* 22 (2001), 2-7

