

Mechanisch gedrag en sterkte van de wervelkolom onder compressie

Implicaties voor de beoordeling van fysieke belasting

Jaap H. van Dieën¹

Summary

Changes of temporal characteristics of work load may influence the risk of damaging spinal motion segments. Previously, it has been shown that energy storage in motion segments under compression, which is dependent on the temporal pattern of the force applied, is a good predictor of the occurrence of damage. In this paper two case-studies are presented in which energy storage is calculated to evaluate work load. In the first case-study job-rotation, a change of the temporal characteristics of the work load, appears to cause a decrease of the energy stored and hence of the risk of damage. In a case-study on lifting, it is shown that the effect of a reduction of the intensity of the work load (i.e. a reduction of the mass lifted) can be offset by changes of the frequency or duration of lifting. These adverse effects of the change in frequency or duration are not adequately reflected in the NIOSH lifting guidelines. It is concluded that temporal characteristics have to be considered when evaluating work load and that calculation of energy storage in the motion segment can be used to this end.

Samenvatting

Veranderingen van de temporele eigenschappen van fysieke belasting bij de arbeid kunnen de kans op schade aan de wervelkolom beïnvloeden. In eerder onderzoek werd aangetoond, dat de hoeveelheid energie, die in wervelsegmenten wordt opgeslagen ten gevolge van compressie, een goede voorspeller is voor het optreden van schade. Deze hoeveelheid energie is afhankelijk van het temporele patroon van de opgelegde compressiekracht. In dit artikel worden twee case-studies beschreven, waarin de berekening van de energie-opname in het wervelsegment wordt gebruikt om arbeidsbelasting te beoordelen. In de eerste case-study blijkt taakrotatie, een verandering van de temporele eigenschappen van de arbeidsbelasting, een vermindering van de energie-opname en dus van de kans op schade te bewerkstelligen. De tweede case-study heeft betrekking op tillen. Aangetoond wordt dat het positieve effect van een vermindering van de intensiteit van de belasting (een reductie van het te tillen gewicht) kan worden geëlimineerd door toename van de frequentie of duur van de tilhandelingen. Deze negatieve effecten van verandering in duur of frequentie worden in de beoordeling van tillen met de NIOSH richtlijnen niet voldoende zwaar gewogen. Geconcludeerd kan worden dat bij de beoordeling van arbeidsbelasting rekening gehouden moet worden met de temporele kenmerken van de op de rug inwerkende krachten en dat de berekening van energie-opname in het wervelsegment hiertoe kan worden gebruikt.

Inleiding

Aan arbeid gerelateerde lage rugpijn (LRP) vormt een belangrijk gezondheidkundig probleem in de geïndustrialiseerde landen. De prevalentie van LRP onder de gehele volwassen bevolking is ongeveer 50% en in sommige beroepsgroepen loopt dit op tot 80% (bijv. Wickström, 1978). Hoge mechanische belasting van structuren van de wervelkolom, die optreedt bij fysiek zwaar werk, lijkt een belangrijke rol te spelen in de etiologie van deze klachten. Daarom worden preventieve strategieën voor LRP veelal gebaseerd op een reductie van de mechanische arbeidsbelasting.

Deels voortvloeiend uit dergelijke strategieën, maar veel meer nog als autonome ontwikkeling, hebben mechanisatie en automatisering van fysiek zwaar werk een grote vlucht genomen. Men zou kunnen verwachten dat deze trend heeft geleid tot een afname van de prevalentie van LRP. Echter, voor zo'n reductie zijn weinig aanwijzingen te vinden. In de Nederlandse tuinbouw, bijvoorbeeld, heeft in de laatste jaren veel mechanisatie en automatisering plaats gevonden. Niettemin is in deze bedrijfstak het aantal arbeidsongeschikten door aandoeningen van het spier- en skeletstelsel gestaag toegenomen in de laatste

15 jaar. Deze schijnbare tegenstelling zou gedeeltelijk verklaard kunnen worden, doordat de geschetste ontwikkelingen in het arbeidsproces niet alleen de intensiteit van de arbeidsbelasting veranderen, maar vaak ook de temporele kenmerken als frequentie en duur. Deze laatste veranderingen zouden negatieve consequenties kunnen hebben voor de gezondheid van de werkende. In veel gevallen lijken taken meer statisch of repetitief te zijn geworden en het werktempo neemt meestal toe. Uit de epidemiologische literatuur is bekend dat dit zelfstandige risicofactoren zijn voor aandoeningen van het spier- en skeletstelsel. De mogelijkheden om te komen tot een reductie van de intensiteit van de belasting zijn soms beperkt door economische of technische randvoorwaarden. Dit is vaak het geval in de agrarische sector, waar technische interventies kunnen stranden op de aard van de producten en de beperkte economische marges. In dergelijke gevallen kunnen organisatorische maatregelen, die de arbeid vooral in het temporele domein wijzigen, zoals rust-toeslagen en taakrotatie, uitkomst bieden.

Gezien het bovenstaande is meer inzicht nodig in de invloed van de temporele eigenschappen van de belasting op de ontwikkeling van LRP. Vervolgens moeten methoden ontwikkeld worden om de mechanische belasting van de rug te beoordelen, waarbij zowel met de intensiteit als de temporele eigenschappen van de belasting voldoende rekening wordt gehouden.

1. IMAG-DLO, afdeling Arbeid, Postbus 43, 6700 AA Wageningen, tel. 08370-76460, fax 08370-25670.

De ontwikkeling van zulke methoden wordt belemmerd door de beperkte kennis die voorhanden is over de etiologie van LRP. Hoewel in de literatuur geen overeenstemming over de exacte etiologie bestaat, zijn veel auteurs het er over eens dat mechanische schade aan structuren van de wervelkolom een belangrijke causale factor is (Bogduk en Twomey, 1987). Uitgaande van dit gegeven is een criterium nodig, dat onafhankelijk van de vorm van de belasting voorspelt wanneer schade aan de wervelkolom optreedt. Met andere woorden, dit criterium moet zowel toepasbaar zijn voor belasting van hoge intensiteit en korte duur als voor langdurige sub-maximale belasting. Recent is aangetoond dat de hoeveelheid energie, die in een wervelsegment wordt opgeslagen, zo'n criterium vormt voor belasting met compressiekrachten (Van Dieën en Toussaint, 1992; Van Dieën, 1993). Deze energie-opslag is te berekenen met een eenvoudig biomechanisch model. Het doel van dit artikel is te illustreren hoe dit criterium kan worden gehanteerd. Na een beknopte beschrijving van het model, worden twee case-studies beschreven waarin de volgende vragen aan de orde komen:

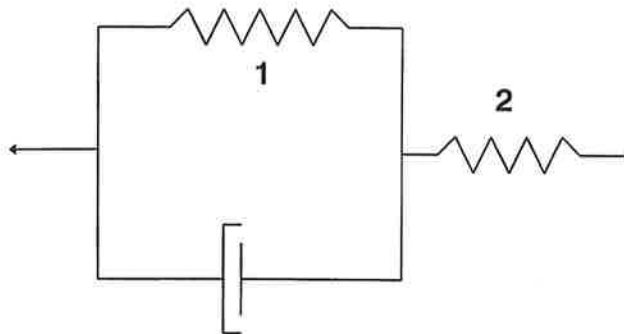
1. Kunnen veranderingen van de arbeidsbelasting in het temporele domein op zichzelf worden gebruikt om het risico op schade aan de wervelkolom te beperken? Of, vice versa, kunnen negatieve veranderingen van de belasting in het temporele domein leiden tot een verhoging van het risico?
2. Wat is het effect op het schade-risico van een reductie van de belastingsintensiteit als deze gepaard gaat met negatieve veranderingen in het temporele domein?

Model ontwikkeling

Het mechanisch gedrag van de wervelkolom wordt gewoonlijk bestudeerd op het niveau van het wervelsegment (i.e. twee wervels en de verbindende tussenwervelschijven en banden). De belangrijkste kracht die op het wervelsegment inwerkt bij de levende mens is de compressiekracht. Deze kracht is gedurende de gehele dag aanzienlijk en wordt met name hoog wanneer de romp voorover wordt gebogen en krachten omhoog of naar het lichaam toe (tillen en trekken) worden uitgeoefend. Compressiekrachten kunnen beschadigingen van de wervels en de eindplaat van de discus intervertebralis veroorzaken. Deze vorm van schade wordt verondersteld een belangrijke rol te spelen in de etiologie van LRP (Bogduk en Twomey, 1987). Een aantal auteurs heeft laten zien dat de maximale compressiekracht, die een wervelsegment kan weerstaan, wordt bepaald door het produkt van de botdichtheid en de oppervlakte (BMC) van de wervels (Hansson et al., 1980; Brinckmann et al., 1989). Echter de sterkte hangt ook af van de snelheid, waarmee de kracht wordt opgevoerd (Kazarian en Graves, 1977). Bovendien kunnen submaximale compressiekrachten eveneens tot schade leiden wanneer ze herhaald worden opgelegd (Hansson et al., 1987; Brinckmann et al., 1989). Met andere woorden, ook het temporele patroon van de inwerkende krachten bepaalt de kans dat schade optreedt. Daarom is de relatie tussen maximale kracht en BMC niet generaliseerbaar voor verschillende vormen van belasting. Als gevolg hiervan lijkt de compressiekracht op zich niet de grootte waarop een risicoschatting moet worden gebaseerd.

Een meer fundamentele beschouwing van de wijze waarop schade aan structuren ontstaat maakt aannemelijk dat niet kracht maar de hoeveelheid opgeslagen energie een criterium voor sterkte vormt (Gordon, 1988). Wil zich namelijk een breuk vormen dan is het nodig alle chemische bindingen te verbreken, die aanvankelijk de twee vlakken bijeen hielden. De totale hoeveelheid mechanische energie, die daarbij nodig is, blijkt gelijk te zijn aan

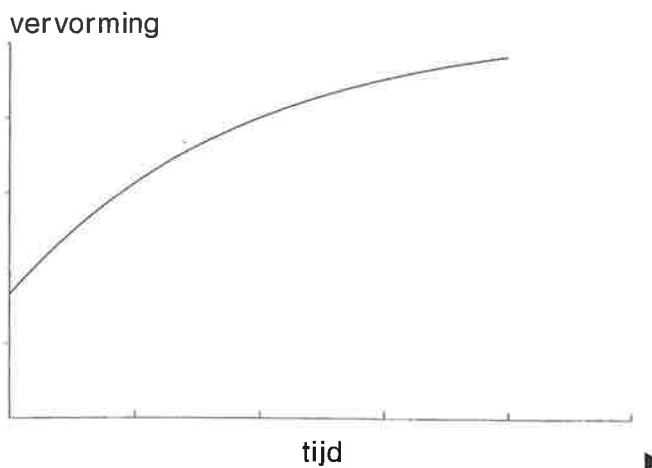
Figuur 1. Mechanisch model van een wervelsegment onder compressie. Voor uitleg zie tekst.



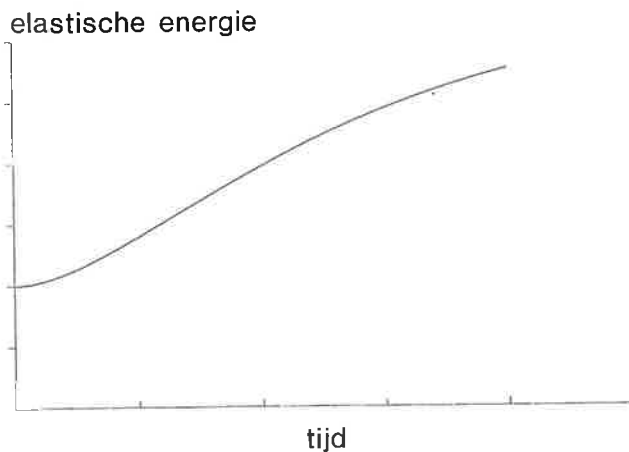
de chemische energie nodig voor het verbreken of vormen van die bindingen. Nu is het zo dat bij de meeste in de techniek gebruikte materialen een eenduidige (lineaire) relatie bestaat tussen de opgelegde kracht en de hoeveelheid opgeslagen energie. Echter zoals andere biologische materialen en structuren vertoont het bewegingssegment een tijdsafhankelijk mechanisch gedrag, waardoor deze relatie minder eenduidig is.

Dit mechanisch gedrag van het wervelsegment onder compressie kan worden gemodelleerd met behulp van een niet-lineair visco-elastisch model, zoals het veer-demper systeem weergegeven in figuur 1 (Van Dieën en Toussaint, 1992; Van Dieën, 1993). Bij belasting treedt een onmiddellijke vervorming op in de seriële veer (veer 2 in figuur 1, het y-intercept in figuur 2). De demper verzet zich in eerste instantie sterk tegen vervorming, maar zal langzamerhand meegeven, totdat na verloop van tijd de ingedrukte parallelle veer (veer 1 in figuur 1) in evenwicht komt met de opgelegde compressiekracht (de curve in figuur 2 loopt naar een asymptoot). Tijdens de vervorming wordt voortdurend energie toegevoerd aan het wervelsegment (kracht maal vervorming) en in de veren opgeslagen (figuur 3). Het is natuurlijk interessant om, gegeven de theoretische beschouwing over het ontstaan van breukvlakken, te beoordelen of deze in het wervelsegment opgeslagen hoeveelheid energie als voorspeller van schade is te gebruiken. Daarbij ligt het voor de hand dat, naarmate het oppervlak van de wervel groter is en meer mineralen per volume-eenheid weefsel aanwezig zijn (BMC), meer bindingen verbroken zullen moeten worden. Om te testen of de energie opslag, zoals berekend door het model, gebruikt kan worden als voorspeller van schade is

Figuur 2. Indien het wervelsegment wordt gecompri-meerd met een constante kracht vanaf tijdstip $t = 0$, ontstaat een geleidelijk toenemende vervorming.



Figuur 3. Uit de vervorming en enkele eigenschappen van het segment kan de opslag van energie in het segment worden berekend.



een aantal simulaties uitgevoerd van eerder door Keller (1987) en Hansson (1987) verrichtte experimenten. De invoer-gegevens hiervoor, afkomstig uit genoemde artikelen, waren het temporele patroon van de compressiekracht dat tot schade aanleiding gaf en de mechanische eigenschappen van de 13 geteste wervelsegmenten. Na 1800 s continue lage belasting werden de segmenten cyclisch belast totdat schade optrad na nog eens 100 tot 1900 s.

De elastische energie, die opgeslagen was op het moment van bezwijken, werd berekend volgens het bovengenoemde model en gerelateerd aan de BMC van de segmenten. Dit leverde een sterk positieve relatie op, die 92% van de variantie in energie opname verklaarde. Verdere simulaties gebaseerd op andere data-sets toonden aan dat deze relatie gelijk was voor herhaalde submaximale belasting en belasting met een snel toenemende kracht. Concluderend: voor een wervelsegment van gegeven botdichtheid en oppervlakte bepaalt de hoeveelheid in het segment opgeslagen energie of het segment bezwijkt. Daarom kan de hoeveelheid opgeslagen energie, zoals berekend met behulp van het niet-lineair visco-elastisch model, worden gebruikt om het schade-risico tengevolge van compressie van wervelsegmenten in te schatten.

De hierboven beschreven resultaten zijn gebaseerd op onderzoek aan wervelsegmenten in vitro. Kwantitatieve toepassing hiervan op de levende mens moet daarom met zorg worden beschouwd.

Bijvoorbeeld de temperatuur beïnvloedt de sterkte van een wervelsegment. Een verschil in temperatuur van een segment tijdens de test en in de levende mens zal de validiteit van toepassing van de resultaten dus ondermijnen. Verder treedt zuivere compressie van wervelsegmenten nooit op in vivo. Echter, wanneer de resultaten worden gebruikt voor vergelijkende analyses lijkt toepassing van het maximale energie criterium voor de sterkte van wervelsegmenten voldoende valide. Zodoende kan worden gesteld dat het taakontwerp, dat leidt tot een minimalisatie van de opname van energie in een wervelsegment, het beste is uit oogpunt van de preventie van schade aan de wervelkolom van de werkende.

In twee case-studies die hieronder beschreven worden wordt dit criterium gebruikt om de in de inleiding opgeworpen vragen te beantwoorden.

Case study 1: taakroulatie en taakverbreding

Als deel van een project gericht op de ontwikkeling van een programma voor de preventie van aandoeningen van

het bewegingsapparaat in de agrarische sector (Hildebrandt et al., 1991), werd een inventarisatie gemaakt van de mogelijke ergonomische verbeteringen in de teelt van groenten onder glas (Van der Schilden, 1991). Met het oog op de 'tayloristische' arbeidsorganisatie, die gebruikelijk is in de Nederlandse tuinbouw, werd taakroulatie genoemd als één van de mogelijke interventies. In deze context wordt onder taakroulatie verstaan het afwisselen van een fysiek belastende taak met één of meer relatief lichte taken. Deze optie voor verbetering van de arbeidsomstandigheden kreeg bij de implementatie van het preventie-programma in eerste instantie een lage prioriteit toebedeeld. Het effect van taakroulatie op de preventie van LRP was onvoldoende aangetoond. Daarnaast werd verwacht dat technische interventies tot een meer fundamentele oplossing van de geconstateerde knelpunten zouden leiden.

Toen tijdens een praktijkproef werd onderzocht hoe implementatie van de ergonomische verbeteringsmogelijkheden kon worden verkregen, bleek dat de haalbaarheid van technische interventies beperkt was. Daardoor won de optie taakroulatie aan belang. Hieruit volgend werden twee vragen geformuleerd: Ten eerste, biedt taakroulatie werkelijk bescherming tegen overbelasting van de wervelkolom? Ten tweede, als dat het geval is, welke verdeling van de lichte en zware taak over de tijd moet dan worden geprefereerd. In lijn met het bovenstaande kunnen deze vragen als volgt worden geoperationaliseerd: – Wordt een vermindering van de opslag van energie in het wervelsegment bereikt door afwisseling van periodes, gedurende welke het blootstaat aan hoge compressiekrachten, met periodes, gedurende welke de compressiekracht lager is. – Indien dat het geval is, welke verdeling van de periodes met hoge en lage compressiekrachten leidt tot een minimalisatie van de gedurende de werkdag opgeslagen energie.

Methode

Het mechanisch model dat hierboven beknopt is beschreven werd met behulp van PSI/e simulatie software (BoZa Automatisering BV, Pijnacker, The Netherlands) geprogrammeerd op een PC. Voor een gedetailleerde beschrijving van het model wordt verwezen naar Van Dieën (1993). Voor de parameters die de mechanische eigenschappen van het wervelsegment beschrijven werden gemiddelde waarden uit het artikel van Keller en medewerkers (1987) gebruikt. Om de twee vragen omtrent taakroulatie te kunnen beantwoorden werd een range van fictieve taakontwerpen gesimuleerd (tabel 1). De taakontwerpen omvatten zwaar werk (z) of cycli met afwisselende periodes van zwaar en licht werk (l). Tijdens elke periode werd de compressiekracht (F_c) verondersteld constant te zijn. Shifts van twee uur werden gesimuleerd. Om de eerste vraag te beantwoorden werden de shifts met cycli van afwisselend zware en lichte periodes vergeleken met shifts waarin alleen het zware werk (cont z) werd gedaan. Om de tweede vraag te beantwoorden werden de shifts met taakroulatie en verschillende cyclusduur onderling vergeleken. Voor al deze vergelijkingen werden de maxima in de curve, die de energie-opslag beschrijft, gebruikt.

Resultaten

In figuur 4 wordt een voorbeeld gegeven van het verloop van de energie-opslag in de tijd bij simulatie van één van de taakontwerpen. Weergegeven zijn de uitkomsten bij afwisseling van een lichte en een zware taak en ter vergelijking bij uitvoering van alleen de zware taak. Duidelijk is de in de tijd oelopende hoeveelheid geabsorbeerde energie te zien met, bij het toepassen van taakroulatie, het

Tabel 1. De gesimuleerde taakontwerpen. Variaties in de verdeling van het zware (z) en het lichte werk (l) over de shift worden aangegeven door de cyclusduur (i.e. de gesommeerde duur van de zware en opvolgende lichte periode). De taakontwerpen verschillen in compressiekracht tijdens het zware werk (Fc z), tijdens het lichte werk (Fc l), de gemiddelde compressiekracht (Fc m), of de ratio van de duur van de zware en lichte periode (ratio z:l). NB de Fc m en de ratio z:l slaan niet op die condities waarin de compressiekracht continu hoog is (cont z). De ratio heeft evenmin betrekking op die condities waarin de compressiekracht continu op het gemiddelde niveau is (cont m)

	ontw. 1	ontw. 2	ontw. 3	ontw. 4	ontw. 5	ontw. 6
Fc z (N)	2500	2500	2500	2500	3000	2200
Fc l (N)	1500	1500	500	500	1500	1200
Fc m (N)	2400	2300	2300	2100	2400	2100
ratio z:l	9:1	8:2	9:1	8:2	6:4	9:1
cyclusduur (min)	cont z				cont z	cont z
	60	60	60	60	60	60
	40	40	40	40	40	40
	30	30	30	30	30	30
	20	20	20	20	20	20
	10	10	10	10	10	10
	5	5	5	5	5	5
	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
	cont m	cont m		cont m		

gedeeltelijk herstel tijdens de periode van lichter werk. Tabel 2 geeft de maximale energie-opslag tijdens elk van de twee uur durende shifts weer. Bij vergelijking van de shifts waarin alleen het zware werk werd verricht, met de onderliggende rijen, valt op dat taakrotatie inderdaad leidt tot een afname van de energie-opslag. Bij taakontwerp 1 is deze afname maximaal 5%, bij taakontwerp 2 en 3 is dat 10% en bij taakontwerp 4 zelfs 19%. Het zware werk leidt binnen deze taakontwerpen tot een zelfde compressiekracht (2500 N). Bij taakontwerp 5, waarbij het zware werk nog zwaarder is (Fc = 3000 N), wordt een reductie van 24% bereikt, als de gemiddelde belasting gelijk is aan die bij taakontwerp 1. Een substantiële vermindering van de energie-opslag wordt slechts dan bereikt als het verschil tussen de zware en lichte taak voldoende groot is.

Hoe korter de cyclusduur of hoe frequenter de afwisseling van zware en lichte taken, des te geringer is de energie-opslag in het wervelsegment. Dit effect is sterker naarmate de ratio van de duur van de zware en lichte periode kleiner is (vergelijk taakontwerp 1 met 2 en 1 met 5), of als het verschil in compressiekracht tussen beide periodes groter is (vergelijk taakontwerp 1 met 3).

Vergelijking van taakontwerp 2 met 3 maakt duidelijk dat het verlagen van de belasting tijdens de lichte periode

en het verlengen van de lichte periode tot vergelijkbare resultaten leiden.

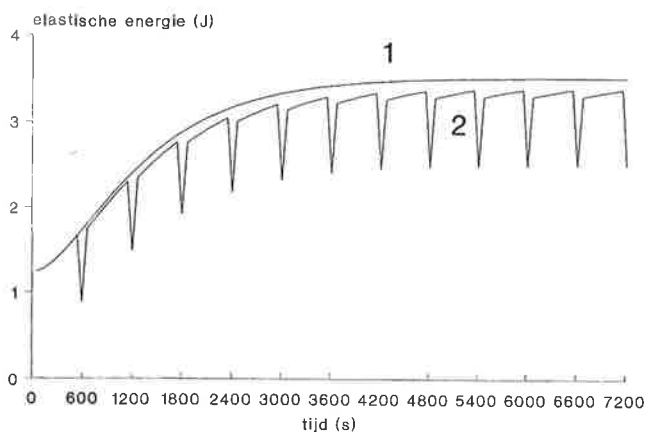
De meest effectieve wijze om de energie-opslag te beperken is het volledig elimineren van de hoge compressiekrachten. Dit wordt gedemonstreerd door de consistent geringere opslag in die situaties, waarbij de compressiekracht continu op het gemiddelde niveau behorend bij het taakontwerp is (zie tabel 2 onderste rij).

Discussie

De resultaten van deze case-study laten zien dat een interventie als taakrotatie, waarbij alleen de temporele kenmerken en niet de (piek-)intensiteit van de arbeidsbelasting worden veranderd, mogelijkheden biedt voor de preventie van LRP. Dit betekent dat negatieve veranderingen van de temporele kenmerken van de belasting op zich de kans op het ontstaan van klachten kunnen vergroten. Het effect van veranderingen in het temporele domein is echter beperkt, doordat een deel van de maximale energie-opslag in het wervelsegment alleen afhankelijk is van de piek-kracht tijdens de shift. Blootstelling van het wervelsegment aan een compressiekracht veroorzaakt een onmiddellijke tijdsafhankelijke vervorming (het y-intercept in figuur 2). Daardoor wordt een deel van de energie-opslag alleen door de momentane kracht bepaald (het y-intercept in figuur 3).

Daar taakrotatie de piek-krachten niet verlaagt of elimineert wordt dit deel van energie-opslag niet veranderd. Vergelijking van de taakrotatie schema's met de conditie

Figuur 4. Voorbeelden van de energie-opslag in een taakontwerp met en zonder taakrotatie. In situatie 1 is de compressiekracht continu 2500 N. In situatie 2 wordt dit elke 10 minuten afgewisseld door een periode van 1 minuut met een compressiekracht van 1500 N.



Tabel 2. De maxima in de energie-opslag (J) gedurende de 2 uur durende shift voor elk taakontwerp en elke cyclusduur

cyclusduur (min)	ontw. 1	ontw. 2	ontw. 3	ontw. 4	ontw. 5	ontw. 6
cont z	3.52				4.89	2.81
60	3.50	3.47	3.48	3.43	4.61	2.79
40	3.48	3.42	3.43	3.32	4.40	2.77
30	3.46	3.37	3.39	3.23	4.25	2.75
20	3.43	3.32	3.33	3.12	4.09	2.72
10	3.39	3.25	3.26	3.00	3.90	2.69
5	3.37	3.21	3.22	2.92	3.80	2.67
0.167	3.34	3.17	3.17	2.85	3.70	2.65
cont m	3.28	3.04		2.59		

Tabel 3. De invoer gegevens voor de NIOSH beoordeling

parameter	originele situatie	herzien; frequentie maal 1.5	herzien; duur maal 1.5
H: horizontale afstand tiller last (cm)	33	33	33
V: verticale afstand handen grond (cm)	29	29	29
D: verticaal triltaject (cm)	42	42	42
A: asymmetrie, hoek schouders voeten (graden)	0	0	0
C: grip	goed	goed	goed
F: frequentie (min ⁻¹)	3	4.5	3
T: duur (hr)	1	1	1.5
lastgewicht (kg)	15	10	10

waarin de compressiekracht continu op het gemiddelde niveau is binnen elk taakontwerp laat zien dat eliminatie van de piekkrachten tot een substantiële verdere daling van de energie-opslag en dus van het risico van schade leidt. Daarom moet worden geconcludeerd dat in preventie programma's de eerste stap waarnaar gestreefd zou moeten worden een reductie van de intensiteit van de belasting is. Echter, indien taakroulatie een substantiële vermindering oplevert van de over de tijd gemiddelde belasting, reduceert het de kans dat schade aan de wervelkolom ontstaat. Zoals in figuur 4 is te zien zal dit effect groter zijn naarmate de shift langer is. Naast de puur fysieke voordelen die taakroulatie biedt en die onderwerp zijn van deze case-study, heeft het voordelen in relatie tot arbeidssatisfactie. Het lijkt daarom een goede optie voor de verbetering van arbeidsomstandigheden.

Voor wat betreft de belasting van de wervelkolom is het aan te bevelen licht en zwaar werk zo frequent mogelijk af te wisselen. Voor de belasting van spieren werd door Björkstén en Jonsson (1977) een zelfde conclusie getrokken. Echter voor wat betreft de belasting van spieren wordt dit positieve effect verminderd of zelfs omgekeerd, wanneer te frequent wordt afgewisseld, of in andere woorden wanneer de pauzes (periodes met licht werk) te kort worden (Duchateau en Hainaut, 1985). Wanneer we deze gegevens combineren lijkt het te adviseren taken zo te ontwerpen dat tussen licht en zwaar werk wordt afgewisseld met cycli van korter dan 1 minuut maar langer dan enkele seconden. Uit praktisch oogpunt vraagt een dergelijk taakontwerp om taakverbreding in plaats van taakroulatie. Dermate frequent afwisselen is wel denkbaar tussen functioneel gerelateerde taken, maar veel minder tussen aparte taken.

Case study 2: het tillen van kratten komkommers

Na de oogst worden komkommers in kratten naar de schuur getransporteerd, waar het sorteren plaats vindt. Deze kratten, die elk 15 kg wegen, worden van een kar of pallet getild en op de sorteermachine gelegd. Een aantal jaar geleden werd deze taak beoordeeld met behulp van de richtlijnen gepubliceerd door het NIOSH (1981). Deze richtlijnen geven een beoordeling van de mate waarin een te tillen last acceptabel is, gebaseerd op biomechanische, psychofysische en fysiologische criteria en rekening houdend met een aantal karakteristieken van de taak. De massa van de volle kratten bleek de 'Action Limit' te overschrijden met circa 7,5 kg en dus worden ergonomische interventies noodzakelijk geacht. Naast een reductie van de horizontale afstand van de werkende tot de last, werd geadviseerd de massa van de volle kratten te beperken tot 10 kg.

De combinatie van deze maatregelen zou leiden tot een volgens de richtlijnen acceptabele situatie. Echter, daar na effectivering van deze maatregelen hetzelfde aantal

komkommers gesorteerd zal moeten worden, zal òf de frequentie van de tilhandelingen òf de duur van de taak worden vergroot. Het meest waarschijnlijk zal de frequentie worden verhoogd, daar de capaciteit van de sorteermachine en de eraan werkende mensen gelijk blijft. In de NIOSH richtlijnen worden frequentie en duur beide betrokken in de beoordeling. Dit is echter niet gebaseerd op een biomechanisch criterium, maar op psychofysische en fysiologische criteria. De vraag doet zich voor of het biomechanisch voordeel van een reductie van de intensiteit van de belasting niet geheel of gedeeltelijk teniet wordt gedaan door de veranderingen in het temporele domein. De nieuwe NIOSH richtlijnen (Waters et al., 1993) kennen een sterkere invloed toe aan de temporele kenmerken bij de evaluatie van de arbeidsbelasting dan de versie van 1981. Daarom werd de taak opnieuw geanalyseerd met behulp van deze nieuwe richtlijnen en de resultaten werden vergeleken met de uitkomsten van de toepassing van het maximale energie criterium.

Methode

De geanalyseerde taak bestond uit het tillen van kratten, die in de originele situatie 15 kg wogen en in de herziene situaties 10 kg. In de twee herziene situaties was respectievelijk de frequentie of de duur 1,5 maal zo hoog als in de originele situatie. Alle andere condities waren gelijk in alle situaties. De invoergegevens voor de analyse met behulp van de NIOSH richtlijnen staan weergegeven in tabel 3. De uitkomst van deze analyse, de Recommended Weight Limit (RWL), is een maximum gewicht (24 kg) vermenigvuldigd met een aantal factoren, die worden berekend op basis van de invoergegevens. Elk van deze factoren heeft een waarde tussen 0 en 1 en kan zodoende de RWL beperken.

Het model dat in figuur 1 is weergegeven werd met behulp van matlab software (the MathWorks Inc., Natick MA, USA) op een PC geprogrammeerd. De parameters die de mechanische eigenschappen van het werfsegment beschrijven waren identiek aan die van case-study 1. Als input voor het model is een tijdserie van de compressiekrachten nodig. Deze werd berekend met behulp van het 2-dimensionale 'Static Strength Prediction Model' (SSPM), ook bekend onder de naam 'Chaffin model' (University of Michigan, 1986). Compressiekrachten werden berekend voor een 50^e percentiel man, bij de start van de tilbeweging, bij rechttop staan met de krat in de handen en bij onbelast rechttop staan. De hoeken in de gewrichten bij het begin van de tilbeweging, die invoer vormen voor het SSPM, werden zo gekozen dat een realistische houding ontstond (zie tabel 4), terwijl de horizontale afstand van de handen tot de lijn tussen de enkels (H) en de verticale afstand tot de vloer (V) gelijk waren aan die in tabel 3. Een tilbeweging werd geacht 2 seconden te duren en de compressiekracht werd gemodelleerd als een sinusfunctie van de tijd. Aangenomen werd dat de werkende tussen de

Tabel 4. De segmenthoeken bij het begin van de tilbeweging. Deze vormen de input voor het SSPM

segment	hoek (graden)
onderarm	-90
bovenarm	-90
romp	18
bovenbeen	115
onderbeen	80

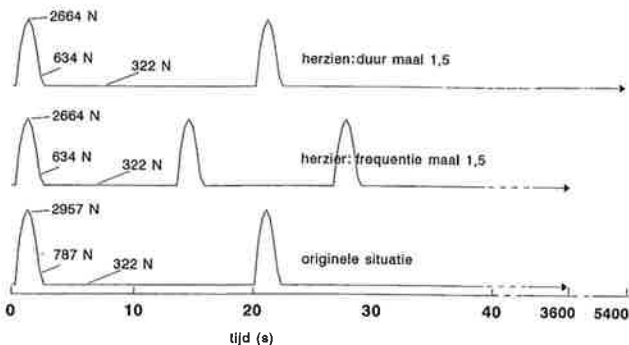
tilhandelingen rechtop stond zonder externe belasting. Voor elk van de drie te vergelijken situaties werd zo een tijdserie van de compressiekracht geconstrueerd en in het model ingevoerd (figuur 5).

Resultaten

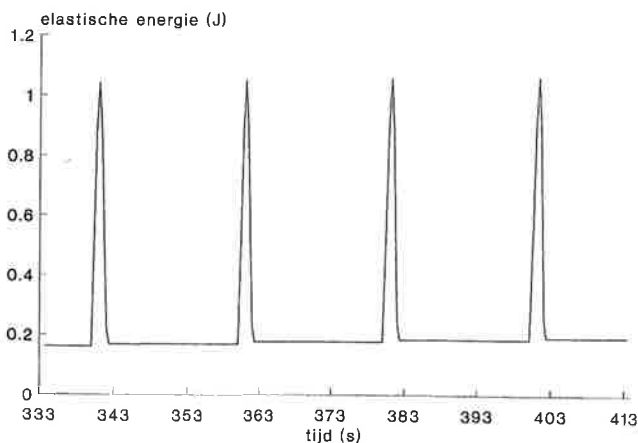
De evaluatie van de taken met behulp van de 1993-versie van de NIOSH richtlijnen leverde de volgende resultaten op. De massa van de last overschreed de RWL in de originele situatie met 3,75 kg. In de situaties met een lagere belasting maar hogere frequentie of langere duur was de last respectievelijk 1,1 en 1,0 kg lager dan de RWL. Dus volgens deze richtlijnen was de reductie van de massa van de kratten voldoende. Dit positieve effect werd niet geëlimineerd door de verhoging van frequentie of duur, hoewel deze tot een beperkte daling van de RWL leiden (van 12,25 kg naar 11 kg).

Figuur 6 geeft een voorbeeld van het verloop in de tijd van de energie-opslag in het wervelsegment. Een geleidelijke stijging van de hoeveelheid opgeslagen energie treedt op ook tijdens de fase waarin de persoon onbelast rechtop staat. Tijdens de eigenlijke tilbeweging zijn scherpe pie-

Figuur 5. De tijdseries van de compressiekracht voor de drie tiltaken. Deze vormen de input voor het model om de energie-opslag in een wervelsegment te berekenen.



Figuur 6. Een voorbeeld van een deel van de curve van de energie-opslag tijdens een tiltaak.



ken te zien, die een blijvende invloed hebben in die zin dat de lijn hoger ligt na dan net voor de tilbeweging. De maxima in de drie berekende curves werden gebruikt om de drie situaties te evalueren. Deze maxima vertoonden slechts verwaarloosbare verschillen ($\pm 1\%$).

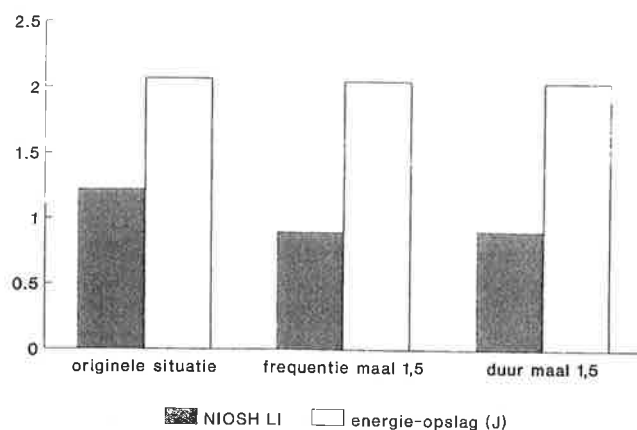
Een vergelijking van de resultaten van beide methodes wordt gegeven in figuur 7. De resultaten van de NIOSH richtlijnen zijn weergegeven met behulp van de 'Lifting Index' (LI: de ratio van de te tillen massa en de RWL). Een LI hoger dan 1 betekent dat de last de RWL overschrijdt. De resultaten verkregen met het maximale energie criterium zijn weergegeven als de maximale hoeveelheid opgeslagen energie tijdens de taak. Uit de figuur wordt duidelijk dat de beide methodes tot geheel andere conclusies leiden. Waar de NIOSH richtlijnen de herziening van de taak als voldoende beoordelen, geeft het maximale energie criterium aan dat geen substantiële verbetering is bereikt.

Discussie

De vermindering van de horizontale afstand, die geadviseerd werd na de analyse met behulp van de 1981-versie van de NIOSH richtlijnen, werd in alle drie de te vergelijken situaties geïncorporeerd. Deze interventie, die gemakkelijk kon worden uitgevoerd door wat voertruimte onder de pallets te creëren, heeft geen invloed op de temporele kenmerken van de belasting en werd daarom binnen de huidige vraagstelling als niet relevant beschouwd. Alle kenmerken behalve duur, frequentie en lastmassa werden in de drie situaties als constant beschouwd. Echter met lichtere kratten zal de tilbeweging waarschijnlijk sneller worden uitgevoerd, waarvoor een hogere versnelling van romp en last noodzakelijk is. Dit leidt tot grotere compressiekrachten. De energie-opslag voor de twee herziene situaties en vooral voor die met de hogere frequentie is dus een onderschatting, die vermeden zou kunnen worden door een dynamisch model te gebruiken voor de berekening van de compressiekrachten. Daar de NIOSH richtlijnen in het geheel geen rekening houden met de dynamica van de tilbeweging zou dit tot een nog groter verschil in uitkomsten van beide methoden leiden.

De uitkomsten van het maximale energie criterium zijn natuurlijk afhankelijk van de geschatte compressiekrachten. Hoewel de validiteit van het SSPM in dit opzicht waarschijnlijk beperkt is, zijn de fouten systematisch en deze zullen daarmee de vergelijking van de drie situaties niet beïnvloeden. De toepassing van het maximale energie criterium laat zien dat een beoordeling van de mechanische belasting van de wervelkolom zowel de intensiteit als de temporele eigenschappen van de belasting moet omvat-

Figuur 7. Vergelijking van de resultaten van de NIOSH beoordeling en de beoordeling gebaseerd op de energie-opslag (voor uitleg zie tekst).



ten. Effecten verkregen door een reductie van de intensiteit kunnen teniet worden gedaan door gelijktijdige verandering van de temporele kenmerken van de belasting. Hoewel temporele kenmerken ook in de NIOSH richtlijnen worden meegenomen, krijgen ze onvoldoende gewicht toegekend. De frequentie en duur van tillen worden beide weerspiegeld in de frequentie factor. In dit voorbeeld varieerde deze van 0,88 in de originele situatie tot 0,79 in één van beide herziene situaties. Door de verandering van de temporele kenmerken wordt de RWL in dit voorbeeld dus maximaal 10% beperkt in vergelijking tot de originele situatie. Het effect van deze verandering op de energie-opslag is bijna twee maal zo groot. Als de herziene taak wordt gesimuleerd met een frequentie van 3 tilbewegingen per minuut en een duur van 1 uur, dan is de energie-opslag 19% geringer dan na 1,5 uur op deze frequentie of dan na 1 uur met een frequentie van $4,5 \text{ min}^{-1}$. Daarom kan worden geconcludeerd dat op biomechanische gronden de duur en de frequentie zwaarder gewogen dienen te worden in de bepaling van de RWL dan nu op basis van psychofysische en fysiologische gronden gebeurt.

Algemene discussie

Dit onderzoek onderstreept duidelijk het belang van de temporele eigenschappen van de mechanische belasting met betrekking tot de ontwikkeling van schade aan de wervelkolom.

Veranderingen van de temporele eigenschappen kunnen het risico op schade verminderen, een strategie die als taakroulatie kan worden toegepast. Maar vice versa kunnen negatieve veranderingen, zoals vaak optreden bij partiële mechanisatie van arbeid, het risico vergroten.

Hoewel in case-study 1 het effect van eliminatie van piekbelastingen dat van taakroulatie domineerde, bleek in case study 2 dat veranderingen van de temporele kenmerken de positieve effecten van een reductie van de piekbelasting zelfs teniet kunnen doen. De schijnbare tegenstelling tussen deze resultaten uit de twee case-studies kan begrepen worden door de vergelijkingen waarop ze gebaseerd zijn nader te beschouwen. In case-study 1 werden taakroulatie schema's vergeleken met een taak van gelijke duur waarbij de compressiekracht telkens op het zelfde gemiddelde niveau was. Dus alleen de piek-intensiteit verschilde, terwijl de integraal van de compressiekracht over de tijd gelijk was tussen de te vergelijken situaties. De temporele verandering van de belasting in case-study 2 gingen niet alleen samen met een verandering van de piekbelasting ook de integraal van de compressiekracht werd beïnvloed.

De conclusie dat verandering van de belasting in het temporele domein een verandering van de piek-intensiteit teniet kan doen vraagt om een kritische beschouwing van de in de ergonomie veel gebruikte strategieën voor preventie. De benadering in dit onderzoek, gebaseerd op het maximale energie criterium, geeft de mogelijkheid een gelijktijdige beoordeling te maken van de temporele kenmerken en de intensiteit van de belasting. Daarnaast kunnen eigenschappen van de individuele werkende of groepen werkenden in de beoordeling worden betrokken. De mechanische parameters van het model van het gedrag van het wervelsegment kunnen worden aangepast bijvoorbeeld om de effecten voor een bepaalde leeftijdsgroep te analyseren.

Natuurlijk heeft het hier gebruikte model een aantal beperkingen. Ten eerste is het gebaseerd op data uit onderzoek op 'dood' materiaal. Normatieve toepassing van de resultaten, om het moment van optreden van schade te voorspellen, is daarom niet te verdedigen. Daarnaast zijn de uitkomsten van het model alleen valide voor belasting van het wervelsegment met axiale compressie. Bij andere

wijzen van belasten zullen andere delen van het segment bezwijken. Met het huidige model is het niet mogelijk de energie-opslag in deze delen te berekenen. Om de validiteit en toepasbaarheid van het model te vergroten is het daarom gewenst een model te ontwikkelen dat de vormen en het mechanisch gedrag van het wervelsegment in drie dimensies getrouw beschrijft. In alle biologische materialen is vervorming en energie-opslag echter tijdsafhankelijk. Dus aannemend dat de energie-opslag het criterium is dat bepaalt of schade ontstaat, zullen voor alle vormen van belasting de temporele eigenschappen in ogenschouw moeten worden genomen. De belangrijkste (kwalitatieve) conclusies van dit onderzoek staan daarom onafhankelijk van de beperkingen van het gehanteerde model.

Ten slotte lijkt, gezien het belang van compressiekrachten op het wervelsegment en hun gevolgen, vergelijkenderwijs toepassen van het model te rechtvaardigen. De compressiekracht is de grootste component van de op het wervelsegment inwerkende krachten. De schade die door deze krachten kan worden veroorzaakt, micro-fracturen van de eindplaat van de discus intervertebralis en van het onderliggend trabeculair bot, komt veelvuldig voor (Vernon-Roberts en Pirie, 1973; 1977; Hansson en Roos, 1983). Dit type beschadiging veroorzaakt een onherstelbare vervorming van het wervelsegment, hetgeen de normale mechanische werking van het segment belemmert en verdere schade kan veroorzaken (Dunlop et al., 1984; Adams et al., 1993). Ook wordt de voedingstoestand van de discus door deze schade negatief beïnvloed (Pritzker, 1977; Brinckmann, 1985). Tenslotte kan de in geval van breuk optredende blootstelling van het bloed in de wervels aan het antigene discus materiaal een ontsteking veroorzaken (Bisla et al., 1976; McFadden en Taylor, 1989) en daardoor direct tot LRP aanleiding geven (Bogduk en Twomey, 1987).

Dankbetuiging

Een deel van dit onderzoek werd financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Gezondheidszorg Agrarische Sectoren (Stigas).

Referenties

- Adams, M.A., McNally, D.S., Wagstaff, J., Goodship, A.E., 1993. Abnormal stress concentrations in lumbar intervertebral discs following damage to the vertebral bodies: a cause of disc failure? *Eur. Spine J.* 1: 214-221.
- Bisla, R.S., Marchisello, P.J., Lockshin, M.D., Hart, D.M., Marcus, R.E., Granda, J., 1976. Autoimmunological basis of disk degeneration. *Clin. Orthop. Rel. Res.* 121: 205-211.
- Björkstén, M., Jonsson, B., 1977. Endurance limit of force in long-term intermittent static contractions. *Scand. J. Work Environ. Health* 3: 23-27.
- Bogduk, N., Twomey, L.T., 1987. Clinical anatomy of the lumbar spine. Churchill-Livingstone, Melbourne, 166 pp.
- Brinckmann, P., 1985. Pathology of the vertebral column. *Ergonomics* 28: 77-80.
- Brinckmann, P., Biggeman, M., Hilweg, D., 1988. Fatigue fracture of human lumbar vertebrae. *Clin. Biomech. suppl.* 1.
- Brinckmann, P., Biggeman, M., Hilweg, D., 1989. Prediction of the compressive strength of human lumbar vertebrae. *Clin. Biomech. suppl.* 12.
- Dieën, J.H. van, 1993. Functional load of the low back. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, IMAG-DLO, Wageningen, 150 pp.
- Dieën, J.H. van, Toussaint, H.M., 1992. Prediction of vertebral end-plate fractures in different loading protocols. In: M. Hagberg, A. Kilbom (Ed.), International scientific Conference on Prevention of Work-related Musculoskeletal Disorders PREMUS. National Institute of Occupational Health, Solna, pp. 302-304.
- Duchateau, J., Hainaut, K., 1985. Electrical and mechanical failures during sustained and intermittent contractions in humans. *J. Appl. Physiol.* 58: 942-947.
- Dunlop, R.B., Adams, M.A., Hutton, W.C., 1984. Disc space nar-

- rowing and the lumbar facet joints. *J. Bone Joint Surg.* 66B: 706-710.
- Gordon, J.E., 1988. *The science of structures and materials.* Scientific American Library, New York, pp. 73-101.
 - Hansson, T., Roos, B., 1983. The amount of bone mineral and schmorl nodes in lumbar vertebrae. *Spine* 8: 266-270.
 - Hansson, T., Roos, B., Nachemson, A., 1980. The bone mineral content and ultimate compressive strength in lumbar vertebrae. *Spine* 5: 46-55.
 - Hansson, T.H., Keller, T.S., Spengler, D.M., 1987. Mechanical behavior of the human lumbar spine II. Fatigue Strength during dynamic compressive loading. *J. Orthop. Res.* 5: 479-487.
 - Hildebrandt, V.H., Urlings, I.J.M., Dieën, J.H. van, 1991. An ergonomic prevention program for musculoskeletal complaints and work load in the Dutch agriculture. In: Y. Quennec, F. Daniellou, (Ed.), *Designing for everyone.* Taylor and Francis, London, pp. 284-286.
 - Kazarian, L.E., Graves, G.A., 1977. Compressive strength characteristics of the human vertebral centrum. *Spine* 2: 1-14.
 - Keller, T.S., Spengler, D.M., Hansson, T.H., 1987. Mechanical behaviour of the human lumbar spine I. Creep analysis during static compressive loading. *J. Orth. Res.* 5: 467-478.
 - McFadden, K.D., Taylor, J.R., 1989. End-plate lesions of the lumbar spine. *Spine* 14: 867-869.
 - NIOSH, 1981. *Work practices guide for manual lifting.* National Institute of Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH 45226, NIOSH Technical Report 81-122.
 - Pritzker, K.P.H., 1977. Aging and degeneration in the lumbar intervertebral discs. *Orth. Clin. North Am.* 8: 65-77.
 - Schilden, M. van der, 1991. Possible solutions for bad labour conditions in lettuce and radish nurseries. *Acta Horticulturae* 295: 243-258.
 - University of Michigan, Center for Ergonomics 1986. *2-D Static strength prediction model, version 4.0.*
 - Vernon-Roberts, B., Pirie, C.J., 1973. Healing trabecular microfractures in the bodies of lumbar vertebrae. *Ann. Rheum. Dis.* 32: 406-412.
 - Vernon-Roberts, B., Pirie, C.J., 1977. Degenerative changes in the intervertebral discs of the lumbar spine and their sequelae. *Rheumatol. Rehab.* 16: 13-21.
 - Waters, T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L.J., 1993. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics* 36: 749-776.
 - Wickstrom, G., 1978. Effect of work on degenerative back disease. *Scand. J. Work Environ. Health* 4: suppl. 1: 1-12.