

Aktuelle Forschung in der Biomechanik

Martin Mössner

martin.moessner@uibk.ac.at
21. März 2024

Modellierung der Muskelkraft

Muskel-Sehne Komplex: funktionelle Einheiten

Kontraktiler Element (CE, K)

Muskelfaser, eigentlich nur die Muskelfibrillen
aktiv, erzeugt die Kraft

Parallel Elastisches Element (PEE, B)

Bindegewebe im Muskel
passiv, Widerstand gegenüber Formveränderung

Seriell Elastisches Element (SEE, S)

Sehne
passiv, wie bei B

Muskel: Kontraktionsarten

Isometrische Kontraktion

Muskellänge bleibt konstant
Muskel aktiviert und erzeugt Kraft

Konzentrische Kontraktion

Aktive Kontraktion bewirkt Verkürzung des Muskels

Exzentrische Kontraktion

Äußere Kräfte dehnen Muskel
entgegen Kontraktionsbewegung

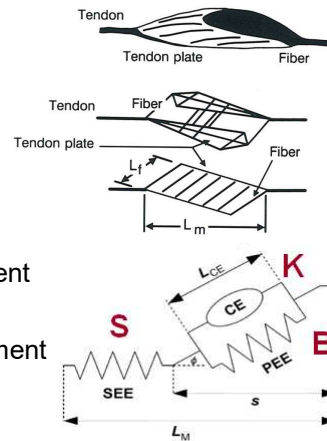
Muskelmodellierung - Abstraktionen

Sehne = Sehne + Sehnenplatte

Muskel = Muskelfasern + Bindegewebe



- S Sehne
seriell elastisches Element
- B Bindegewebe
parallel elastisches Element
- K Muskelfaser
kontraktiler Element



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

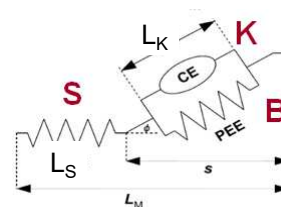
24

Muskel-Sehne Komplex: Kraft

$$L_M = L_S + L_K \cdot \cos \phi$$

$$F_M = F_S = (F_K + F_B) \cdot \cos \phi$$

Die Muskelkraft (F_M) wird über die Sehne auf das Skelett übertragen. Die Sehnenkraft (F_S) ist gleich der Kraft, die die Muskelfaser erzeugt. Die Kraft der Muskelfaser setzt sich aus einem aktiven Anteil (F_K) und einem passiven Anteil (F_B) zusammen.



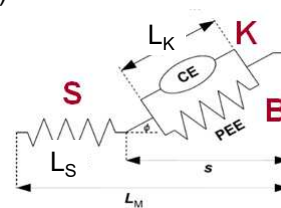
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

25

Muskel-Sehne Komplex: Kraft

$$F_K = F_{iso,max} \cdot f(L_K) \cdot g(V_K) \cdot a$$

Die aktive Kraft der Muskelfaser ist das Produkt aus isometrische Maximalkraft des Muskels: $F_{iso,max}$
Kraft-Längen Beziehung: $f(L_K)$
Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung: $g(V_K)$ und Aktivierung: a



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

26

Muskel: Bezeichnungen

- $L_K, V_K = L'_K$
Länge und Dehngeschwindigkeit des kontraktilen Elements
 $V > 0$ Dehnung $V < 0$ Kontraktion
 L_K ist die Länge der Muskelfaser
- $F = F_K(L_K, V_K, a)$
erzeugte Kraft im kontraktilen Element
In Klammer Angabe, dass die erzeugte Kraft F_K von der Länge L_K , der Dehngeschwindigkeit V_K und der Aktivierung a abhängt
- analog für B (Bindegewebe) und S (Sehne)

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

27

Muskelkräfte: Daten

Table 2 Muscle properties adopted for the three-dimensional lower limb model used to simulate a sidestep

Muscle (group)	F _{MAX}	L _{Kopt}	W	PB0	LS0	l ₀	Γ ₁	Γ ₂	Γ ₃	Γ ₄	Γ ₅	Γ ₆
Illopoas	800	0.1019	1.298	1.0	0.1085	0.2304	0.03	0	0	0	0	0
Hip extensors	1300	0.1447	0.625	1.366	0.1315	0.2218	-0.076	0.015	-0.01	0	0	0
Hip adductors	1805	0.1228	0.56	1.0	0.1266	0.2310	-0.03	0.037	0.01	0	0	0
Hip abductors	1950	0.0620	0.56	1.698	0.0538	0.0693	-0.062	-0.06	0	0	0	0
Rectus femoris	780	0.0840	1.44	1.0	0.3460	0.4145	0.03	-0.03	0	0.043	0	0
Vastus lateralis	1870	0.0840	0.627	1.332	0.1570	0.2023	0	0	0	0.043	0	0
Vastus medialis	1295	0.0890	0.627	1.212	0.1266	0.1756	0	0	0	0.043	0	0
Vastus intern	1235	0.0870	0.627	1.321	0.1360	0.1834	0	0	0	0.043	0	0
Biceps femoris LH	720	0.1090	1.2	1.0	0.3410	0.4008	-0.075	0.03	0	-0.045	0	0
Biceps femoris SH	400	0.1094	1.2	1.0	0.3355	0.4116	-0.055	0.03	0	-0.04	0	0
Hamstrings	1360	0.1730	1.2	1.0	0.1000	0.2731	0	0	0	-0.045	0	0
Gastrocnemius	1605	0.0508	0.89	1.0	0.4010	0.4518	0	0	0	-0.025	-0.053	0.008
Soleus	2830	0.0300	1.039	1.616	0.2680	0.2941	0	0	0	0	-0.053	0.008
Tibialis post	1270	0.0310	0.56	1.0	0.3100	0.3496	0	0	0	0	-0.008	0.019
Tibialis ant	600	0.0980	0.442	1.0	0.2230	0.3203	0	0	0	0	0.035	0.005
Peroneals	1195	0.0516	0.56	1.0	0.2727	0.3304	0	0	0	0	-0.011	-0.021

F_{max}—Maximum isometric force

L_{CEopt}—Optimum CE length

W—Maximum length range of force production relative to L_{CEopt}

PEE_{slack}—Slack length of PEE relative to L_{CEopt}

L_{slack}—Slack length of SEE

l₀—Muscle length in the neutral posture of the model.

Γ_{1-Γ₆}

α₁–α₆—Moment arms for hip flexion, hip adduction, hip internal rotation, knee extension, ankle dorsiflexion, ankle inversion-eversion respectively.

aus: McLean et al (2003)

$$LB0 = L_{Kopt} \cdot PB0$$

$$k_s = F_{MAX} / (0.04 \cdot LS_0)^2$$

$$VL: k_s = 47 \text{ Mpa}$$

$$\phi = 10-22^\circ$$

$$k_B = F_{MAX} / (W \cdot L_{Kopt})^2$$

$$k_B = 0.67 \text{ MPa}$$

$$V_{MAX} = 10 \cdot L_{Kopt}$$

$$V_{MAX} = 0.84 \text{ m/s}$$

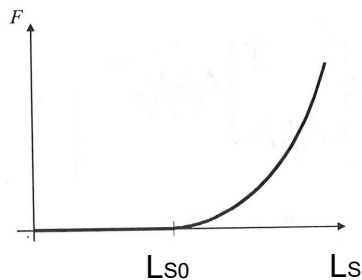
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

28

Sehne Modell

Kraft sobald Sehne gespannt

Kraftanstieg quadratisch



$$F_S(L_S) = \begin{cases} 0 & L_S < L_{S0} \\ k_S \cdot (L_S - L_{S0})^2 & L_S > L_{S0} \end{cases}$$

z.B.: VL L_{S0} = 157 mm, k_S = 47 MPa.

Sehnenendehnung beträgt 0-5% der Sehnenlänge.

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

29

Sehnen

Vastus Lateralis (VL)

$F_{MAX}=1870 \text{ N}$, $L_{S0}=0.157 \text{ m}$, $k_S = 47 \text{ MPa}$

Gesucht Länge der S des VL bei einer Belastung von $F_S=1000 \text{ N}$
(entspricht einer Quadrizepskraft von ca. 4 kN).

$$1000 = 47.4 \cdot 10^6 \cdot (L_S - 0.157)^2$$

$$L_S = 0.1616 \text{ m} \quad \Delta L_S = 4.6 \text{ mm} \quad \text{bzw.} \quad 2.9\%$$

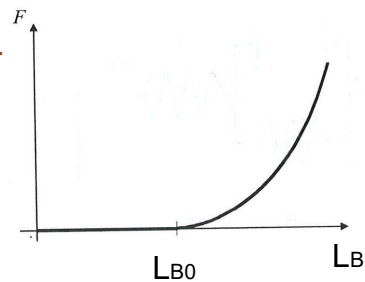
Sehnen dehnen sich wenig $\rightarrow L_M \approx L_{S0} + L_K \cos\phi$

Muskelbauch Modell

Kraft sobald Muskelbauch gespannt

Kraftanstieg quadratisch

$$F_B(L_B) = \begin{cases} 0 & L_B < L_{B0} \\ k_B \cdot (L_B - L_{B0})^2 & L_B > L_{B0} \end{cases}$$



z.B.: VL $L_{B0}=112 \text{ mm}$, $k_B=0.67 \text{ MPa}$.

Beachte: k_B ist 100-mal kleiner als k_S bei Sehnen!

Bindegewebe

Vastus Lateralis (VL)

$$F_{\text{MAX}}=1870 \text{ N}, \quad L_{\text{B0}}=0.112 \text{ m}, \quad k_{\text{B}} = 0.67 \text{ MPa}$$

Gesucht Länge des B des VL bei $F_{\text{B}}=1 \text{ kN}$ und $F_{\text{B}}=0.5 \text{ kN}$

$$1000=0.67 \cdot 10^6 \cdot (L_{\text{B}}-0.112)^2$$

$$L_{\text{B}} = 0.1506 \text{ m} \quad \Delta L_{\text{B}} = 38.6 \text{ mm} \text{ bzw. } 34\%$$

$$500=0.67 \cdot 10^6 \cdot (L_{\text{B}}-0.112)^2$$

$$L_{\text{B}} = 0.1393 \text{ m} \quad \Delta L_{\text{B}} = 27.3 \text{ mm} \text{ bzw. } 24\%$$

Tatsächliche Dehnung hängt von der Kraftentwicklung des kontraktiven Elementes ab!

Muskelgeometrie: Abstraktionen

Muskelkräfte werden durch Momente in den Gelenken aufgebracht

Muskelgeometrie \rightarrow Geradenstücke und Kreissegmente



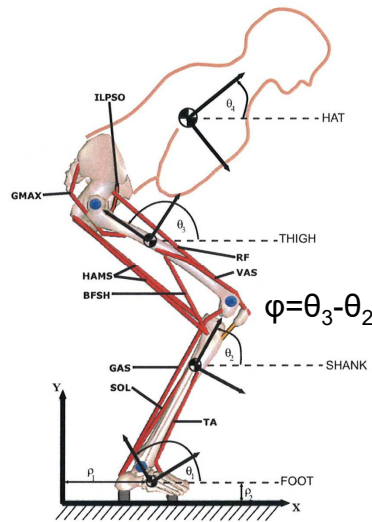
Muskel: Länge

Muskel-Länge

Aus Segmentgeometrie
von Stellung des Sportlers abhängig
wie ist der Zusammenhang?

Aus Muskelmodell
aus internen Daten
(Länge der Muskelfaser und Sehne)

$$L_M = L_K \cos\phi + L_S$$



aus: Seth et al (2008)

Muskel: Länge

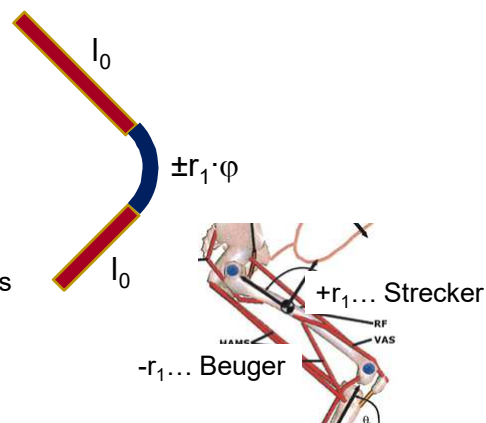
Muskel-Länge

$$L_M = l_0 + r_1 \cdot \varphi$$

l_0 Länge des Muskels bei
gestrecktem Gelenk ($\varphi=0$)

r_1 Hebelarm/Radius des Gelenks
Strecker $r_1 > 0$, Beuger $r_1 < 0$

φ Winkel im Gelenk (rad)
 $\varphi \text{ (rad)} \leftarrow \varphi \text{ (}^\circ) \cdot (3.14/180)$



Muskel: Dehngeschwindigkeit

Muskel-Dehngeschwindigkeit

$$L_M = l_0 + r_1 \cdot \varphi$$

$$V_M = r_1 \cdot \omega, \quad \omega = \varphi'$$

$$L_M \approx L_K \cos\phi + L_{S0}$$

$$V_M \approx V_K \cos\phi$$

ω Winkelgeschwindigkeit im Gelenk (rad/s)

$$\text{Näherung: } \omega = (\varphi_2 - \varphi_1) / \Delta t$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

36

Niedersprung

Vastus Lateralis (VL)

Kniewinkel φ Stand $\varphi=0^\circ$ Hocke $\varphi=90^\circ$

Muskellänge $l_0=0.2023$ m Knieradius $r_1=0.043$ m

Sehnenlänge $L_{S0}=0.157$ m

Niedersprung in 0.2 s Beugung des Knie von 30 auf 120°

Fiederungswinkel $\phi=15^\circ$ ($\cos\phi=0.966$).

$$L_M = l_0 + r_1 \cdot \varphi = L_K \cos\phi + L_{S0}$$

φ ($^\circ$)	φ (rad)	L_M (m)	L_K, L_B (m)	L_S (m)
30	0.5236	0.2248	0.0702	0.1570
60	1.0472	0.2473	0.0935	0.1570
90	1.5708	0.2698	0.1168	0.1570
120	2.0944	0.2924	0.1401	0.1570

$$\omega = ((120-30) \cdot \pi / 180) / 0.2 = 7.85 \text{ rad/s}$$

$$V_M = r_1 \cdot \omega = 0.043 \cdot 7.85 = 0.338 \text{ m/s}$$

$$V_K = V_M / \cos\phi = 0.338 / 0.966 = 0.349 \text{ m/s}$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

37

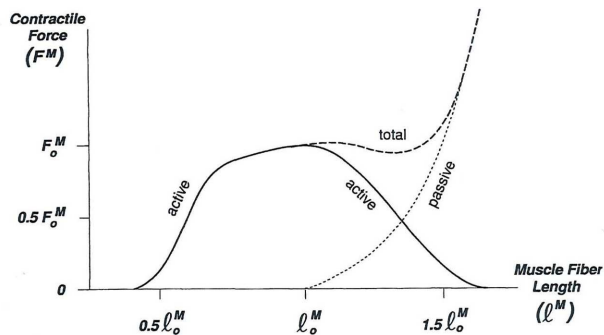
Hill-Modell: Kontraktiler Element

Muskelkraft hängt von Länge L_K , Dehngeschwindigkeit V_K und Aktivierung a ab

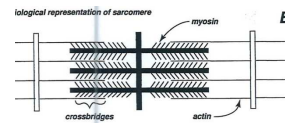
$$F_K = F_{iso,max} \cdot f(L_K) \cdot g(V_K) \cdot a$$

$F_{iso,max}$	isometrische Maximalkraft
$f(L_K)$	Kraft-Längenbeziehung
$g(V_K)$	Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung
$g(V_K) < 1$	konzentrische Kraftabnahme für $V_K < 0$
$g(V_K) = 1$	isometrische Kraft für $V_K = 0$
$g(V_K) > 1$	exzentrische Kraftzunahme für $V_K > 0$
a	Aktivierung, eigene Modelle, oft $a = 1$

Kraft-Längen Beziehung



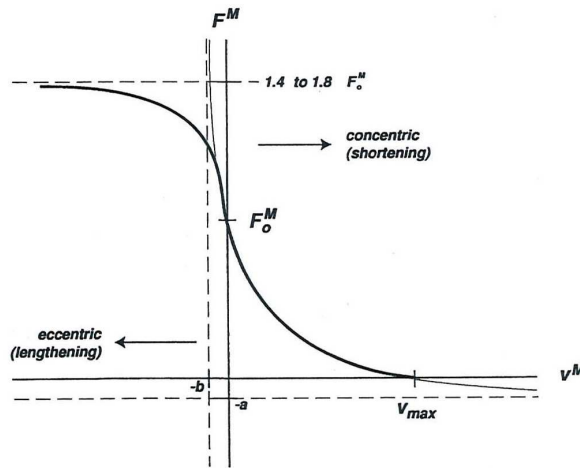
aus Yamaguchi



Die wesentlichen Eigenschaften der F-L Beziehung ergeben sich aus dem mikroskopischen Aufbau !

Kraft-Geschwindigkeit Beziehung

aus Yamaguchi

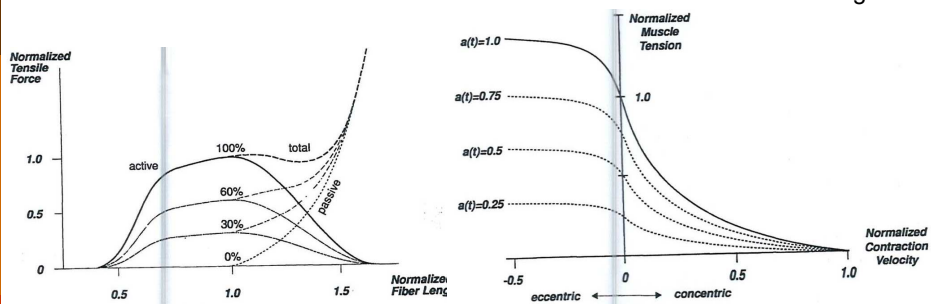


Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

40

Einfluss der Aktivierung

aus Yamaguchi



Aktive Muskelkraft ist proportional der Aktivierung
 Passive Muskelkraft ist unabhängig der Aktivierung

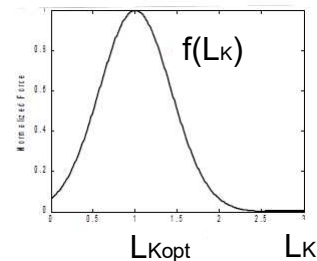
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

41

Hill-Modell: isometrische Kraft Kraft-Längen Beziehung

Modell: Glockenkurve

$F_{K,iso}(L_K)$ isometrische Kraft bei L_K
 $F_{iso,max}$ maximale isometrische Kraft
 L_{Kopt} optimale Muskelfaserlänge
 W beschreibt Breite der Glocke



$$F_{K,iso}(L_K) = F_{iso,max} \cdot f(L_K)$$

$$f(L_K) = \exp\left(-\left(\frac{L_K - L_{Kopt}}{W \cdot L_{Kopt}}\right)^2\right)$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

42

Isometrische Kraft Vastus Lateralis (VL)

ϕ Kniewinkel

$$L_M = l_0 + r_4 \cdot \phi, \quad l_0 = 0.2023 \text{ m}, \quad r_4 = 0.043 \text{ m}$$

$$F_{iso,max} = 1870 \text{ N}, \quad L_{Kopt} = 0.084 \text{ m}, \quad W = 0.627, \quad \phi = 15^\circ$$

Bestimme $F_{K,iso}(L_K) = F_{iso,max} \cdot f(L_K)$ bei $30, 60, 90$ und 120°

$$L_K(\phi) = 0.0702, 0.0935, 0.1168, 0.1401 \text{ m} \text{ siehe Folie 37}$$

$$F_{K,iso}(30^\circ) = 1870 \cdot \exp\left(-\left(\frac{0.0702 - 0.084}{0.627 \cdot 0.084}\right)^2\right) = 1746 \text{ N}$$

$$F_{K,iso}(60^\circ) = 1810 \text{ N}, \quad F_{K,iso}(90^\circ) = 1269 \text{ N}, \quad F_{K,iso}(120^\circ) = 601 \text{ N}$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

43

Isometrische Kraft

Vastus Lateralis (VL)

$$F_{K,iso}(120^\circ) = 601 \text{ N} \quad \text{ist klein – versagt Modell?}$$

$$F_B(120^\circ) = 0.67 \cdot 10^6 \cdot (0.1401 - 0.112)^2 = 529 \text{ N}$$

$$F_{VL} = 601 + 529 = 1130 \text{ N}$$

Bei großer Muskeldehnung passive Krafterzeugung!

Isometrische Kraft

Beiträge anderer Muskel

$\varphi = 120^\circ$

aktiv 2·2036 N

passiv 2·1734 N

gesamt 2·3770 N

$\varphi = 135^\circ$

aktiv 2·1380 N

passiv 2·3104 N

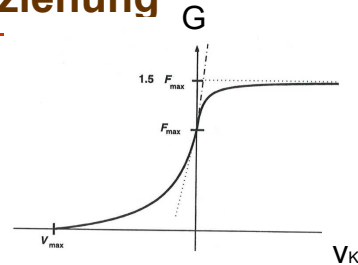
gesamt 2·4484 N

120°	L_M	L_K	$F_{K,iso}$	F_B	F_M
VL	0.292	0.1401	601	536	1137
VM	0.265	0.1440	490	543	1033
VI	0.274	0.1423	442	311	753
RF	0.505	0.1642	503	343	846

135°	L_M	L_K	$F_{K,iso}$	F_B	F_M
VL	0.304	0.1518	357	1074	1431
VM	0.276	0.1556	312	947	1259
VI	0.285	0.1540	273	634	907
RF	0.516	0.1758	438	449	846

Hill-Katz Modell Kraft-Geschwindigkeit Beziehung

$$g(V_K) = \begin{cases} \frac{V_{max} + V_K}{v_{max} - V_K/A} & V_K < 0 \\ 1 & V_K = 0 \\ \frac{G_{max} \cdot V_K + B \cdot V_{max}}{V_K + B \cdot V_{max}} & V_K > 0 \end{cases}$$



Hill (1938) für $V_K < 0$: $0 < g(V_K) < 1$, Kraftabnahme
 Katz (1939) für $V_K > 0$: $1 < g(V_K) < G_{max}$, Kraftzunahme

z.B.: VL $V_{max} = 0.84$ m/s, $G_{max} = 1.5$, $A = 0.25$, $B = 0.1$

Beachte: wird V_K sehr groß, so muss G abnehmen →
 Schädigung des Muskels

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

46

Hill Modell

Vastus Lateralis (VL)

$L_M = l_0 + r_4 \cdot \phi$, $l_0 = 0.2023$ m, $r_4 = 0.043$ m
 $F_{iso,max} = 1870$ N, $L_{Kopt} = 0.084$ m, $V_{max} = 0.84$ m/s
 $W = 0.627$, $L_{S0} = 0.157$ m, $L_{B0} = 0.112$, $\phi = 15^\circ$
 $k_S = 47$ MPa, $k_B = 0.67$ MPa, $A = 0.25$, $B = 0.1$

Bestimme $L_M, L_K, F_{ISO}, F_K, F_B, F_S, F_M$ bei Gelenkwinkel
 von $30, 60, 90, 120, 90, 60$ und 30° und Dehngeschwindigkeiten
 von $+0.3, +0.2, +0.1, 0, -0.07, -0.14$ und -0.21 m/s

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

47

Hill Modell: Beispiel

Vastus Lateralis (VL)

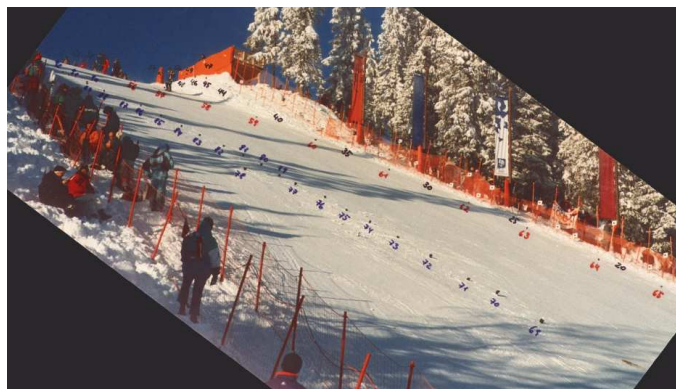
φ	L_M	L_K	F_B	$F_{K,iso}$	V_K	G	F_K	F_S
30	0.2248	0.0702	0	1746	0.30	1.3906	2428	2345
60	0.2473	0.0935	0	1810	0.20	1.3521	2447	2393
90	0.2698	0.1168	16	1269	0.10	1.2717	1614	1575
120	0.2924	0.1401	536	601	0.00	1.0000	601	1098
90	0.2698	0.1168	16	1269	-0.07	0.6875	872	858
60	0.2473	0.0935	0	1810	-0.14	0.5000	905	874
30	0.2248	0.0702	0	1746	-0.21	0.3750	655	633

$$F_K = F_{K,iso} \cdot G, \quad F_S = (F_K + F_B) \cdot \cos\Phi, \quad F_M = F_S$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

48

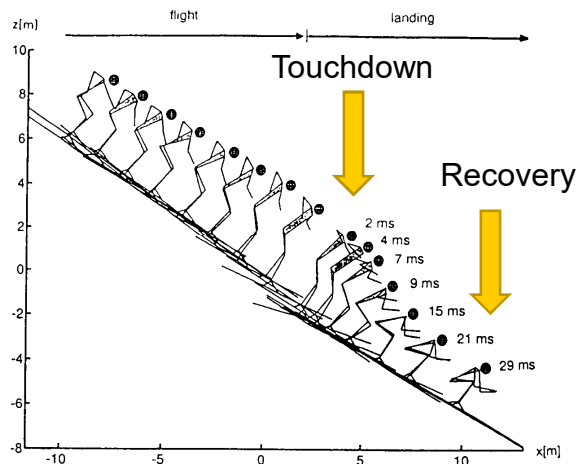
Russisprung in Lillehammer



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

49

Landebewegung Russisprung



Zeiten · 10 !

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

50

Landung nach Sprung in der Abfahrt (z.B. Hausbergkante, Russisprung)

Welche Kraft erzeugt der Quadrizeps bei einer Aktivierung von 90% in folgenden zwei Stellungen? Welches Moment wirkt im Knie? Sehrendehnung?

Touchdown: Knie: Winkel 30° , Winkelgeschwindigkeit $900^\circ/\text{s}$

Recovery: Knie: Winkel 130° , Winkelgeschwindigkeit $100^\circ/\text{s}$

Daten: Radius im Knie: 44 mm, Muskellänge: 19 cm, optimale Muskelfaserlänge: 90 mm, Formfaktor: $W=0.7$

isometrische Maximalkraft des Quadrizeps: 7.5 kN,

Fiederungswinkel: 20°

Steifigkeit Muskelbauch: 0.7 MPa, Sehne: 70 MPa

Ruhelänge Muskelbauch: 0.12 m, Sehne: 0.14 m

$A=0.25$, $B=0.1$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

51

Landung nach Sprung in der Abfahrt Touchdown

$$L_M = l_0 + r_1 \cdot \varphi = 0.19 + 0.044 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.2130 \text{ m}$$

$$L_K = (L_M - L_{S0}) / \cos\phi = (0.2130 - 0.140) / \cos(20^\circ) = 0.0777 \text{ m} \quad 0.0658 \text{ m}$$

$$V_M = r_1 \cdot \omega = 0.044 \cdot 900 \cdot \pi / 180 = 0.6912 \text{ m/s}$$

$$V_K = V_M / \cos\phi = 0.7355 \text{ m/s}$$

$$f(L_K) = \exp(-((0.0777 - 0.090) / (0.7 \cdot 0.090))^2) = 0.9628 \quad 0.8626$$

$$g(V_K) = (G_{MAX} \cdot V_K + V_{MAX} \cdot B) / (V_K + V_{MAX} \cdot B)$$

$$= (1.5 \cdot 0.7355 + 0.9 \cdot 0.1) / (0.7355 + 0.9 \cdot 0.1) = 1.4455$$

$$F_K = F_{iso,max} \cdot f(L_K) \cdot g(V_K) \cdot a = 7500 \cdot 0.9628 \cdot 1.4455 \cdot 0.9 = 9394 \text{ N} \quad 8416 \text{ N}$$

$$F_B = 0 \text{ N da } L_K < 0.12 \text{ m}$$

$$F_M = (F_K + F_B) \cos\phi = 8827 \text{ N} \quad 7909 \text{ N}$$

$$M_M = F_M \cdot r_1 = 8827 \cdot 0.044 = 388 \text{ Nm} \quad 348 \text{ Nm}$$

Landung nach Sprung in der Abfahrt Recovery

$$L_M = l_0 + r_1 \cdot \varphi = 0.19 + 0.044 \cdot 130 \cdot \pi / 180 = 0.2898 \text{ m}$$

$$L_K = (L_M - L_{S0}) / \cos\phi = (0.2898 - 0.140) / \cos(20^\circ) = 0.1594 \text{ m} \quad 0.1534 \text{ m}$$

$$V_M = -r_1 \cdot \omega = -0.044 \cdot 100 \cdot \pi / 180 = -0.0768 \text{ m/s}$$

$$V_K = V_M / \cos\phi = -0.0817 \text{ m/s}$$

$$f(L_K) = \exp(-((0.1594 - 0.090) / (0.7 \cdot 0.090))^2) = 0.2967 \quad 0.3635$$

$$g(V_K) = (V_{MAX} + V_K) / (V_{MAX} - V_K / A)$$

$$= (0.9 - 0.0817) / (0.9 + 0.0817 / 0.25) = 0.6670$$

$$F_K = F_{iso,max} \cdot f(L_K) \cdot g(V_K) \cdot a = 7500 \cdot 0.3635 \cdot 0.6670 \cdot 0.9 = 1336 \text{ N} \quad 1636 \text{ N}$$

$$F_B = k_B \cdot (L_K - L_{B0})^2 = 0.7 \cdot 10^6 \cdot (0.1594 - 0.12)^2 = 1089 \text{ N} \quad 780 \text{ N}$$

$$F_M = (F_K + F_B) \cos\phi = 2279 \text{ N} \quad 2271 \text{ N}$$

$$M_M = F_M \cdot r_1 = 2279 \cdot 0.044 = 100 \text{ Nm} \quad 100 \text{ Nm}$$

Landung nach Sprung in der Abfahrt Sehnenlänge

$$F_S = k_S \cdot (L_S - L_{S0})^2$$
$$\Delta L = L_S - L_{S0} = \sqrt{F_S / k_S}$$

Touchdown:

$$\Delta L = \sqrt{8827 / 70e6} = 0.0112 \text{ m}, \quad \Delta L / L = 8\%$$

Recovery:

$$\Delta L = \sqrt{2279 / 70e6} = 0.0057 \text{ m}, \quad \Delta L / L = 4\%$$

Berechnet man F_M und M_M mit L_S statt L_{S0} , so ergibt sich:

Touchdown: $F_M = 7909 \text{ N}$, $M_M = 348 \text{ Nm}$ → kleinere Belastung!

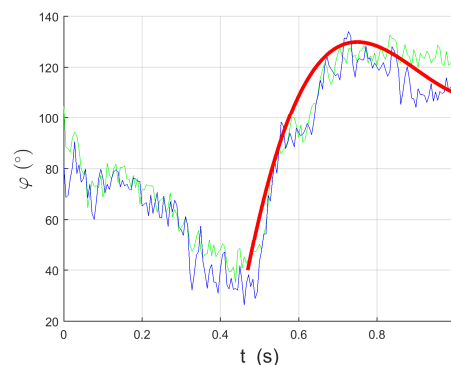
Recovery: $F_M = 2271 \text{ N}$, $M_M = 100 \text{ Nm}$ → Gleiches F_M aber F_K steigt, F_B sinkt

Schwarz ... Sehne ist Stahlseil **Grün reale Sehne**

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

54

Landen: Russisprung



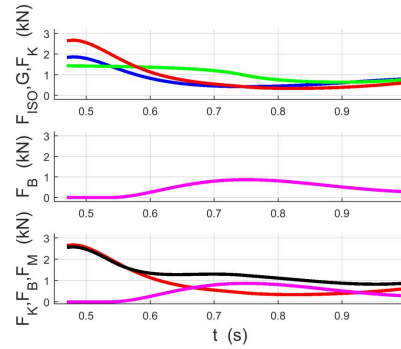
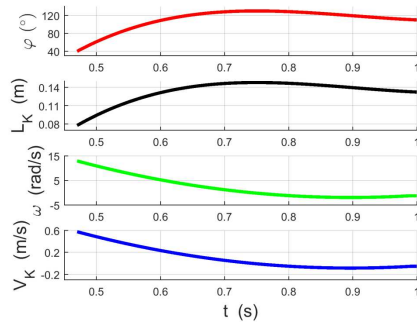
Kinematik aus der Messung in Lillehammer
Kniewinkel bei Landebewegung

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

55

Landen: Russisprung

VL



Links: φ (rot), ω (grün), V_M (blau)

Rechts: F_{ISO} (blau), G (grün), F_K (rot),
 F_B (violett), F_M (schwarz)