Hur springer man snabbast 30 m på Mars?

En simulerad människa lär sig springa från noll med förstärkningsinlärning – på jorden och på Mars, där bara gravitationen skiljer. Projektrapport för Mars-run, 23–26 oktober 2026.

Filip · projektmapp `~/mars-run` · fysik MuJoCo/MJX · träning PPO + AMP på Runpod-GPU · rendering Blender Cycles

Svaret i korthet. Enligt vår modell springer man snabbast på Mars med **stor framåtlutning (≈ 46°)**, **långa luftfaser (≈ 62 % av tiden i luften)** och en **försiktig start** – greppet är bara 38 % av jordens. Det ger 30 m på **5,40 s** mot jordens **5,18 s** (medel av bästa checkpoint i tre oberoende träningar per värld). Mars förlorar starten men har högre toppfart (8,6 mot 7,5 m/s); på 60 m gick Mars om vid ungefär 46 m. Löpstilen blev densamma i alla tre träningarna per värld.

5,40 s
Mars, 30 m (5,42 / 5,41 / 5,38)

5,18 s
jorden, 30 m (5,22 / 5,13 / 5,18)

Innehåll

1. Frågan och upplägget
2. Kroppen
3. Världarna och renderingen
4. Sprintmiljön
5. Träningsmetoden
6. Alla träningskörningar
7. Problem vi löste
8. Resultat
9. Svaret på forskningsfrågan – och förbehållen
10. Hur nära en riktig löpare?
11. Filmer och visualisering
12. Infrastruktur
13. Öppna frågor

---

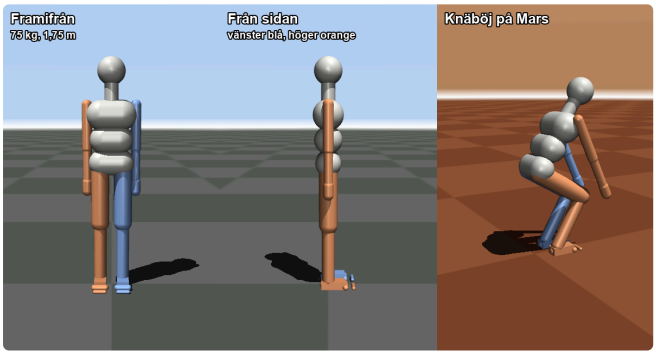
1. Frågan och upplägget

Forskningsfrågan är: *hur tar man sig snabbast 30 m på Mars, från stillastående?* Ursprungligen gällde den 1 km, men den ändrades till en sprint. Då behövs ingen trötthets- eller energimodell, och starten blir avgörande. Greppet (friktion × normalkraft) är nämligen bara 38 % av jordens, eftersom Mars gravitation är 3,71 m/s² mot jordens 9,81.

Fråga	Beslut
Kropp	Momentstyrd människa med mänskliga momenttak och Hill-kurva (kraften sjunker med ledfarten). En muskelmodell kan bli ett senare steg.
Rymddräkt	Nej – en människa i Mars-gravitation, t.ex. i en tryckkupol.
Snabbast	Kortast tid över 30 m från stillastående.
Ordning	Jorden först, tills löpningen ser verklig ut. Sedan Mars.
Jämförbarhet	Exakt samma träning i båda världarna; bara gravitationen skiljer (kontrollerat med diff av startskripten).
Frihet	Mänsklig stilguide (AMP) bara i början, sedan släpps den så att fysiken får avgöra löpstilen.
Beräkning	Bygge och felsökning på Macen (Intel, MuJoCo 3.10); träning på Runpod-GPU (L40S) med MJX.

2. Kroppen

MuJoCos standardhumanoid duger inte för en människofråga. Den väger 41 kg, är 1,56 m lång och har likformig densitet. Knät ger 80 Nm och fotleden 20 Nm (en människa har cirka 220 Nm), den saknar tår och har ingen kraft–fart-gräns. Därför byggde vi en egen parametrisk kropp i `body.py`: 1,75 m, 75 kg och 31 motoriserade leder. Bålen har 3 leder; varje ben har höft (3), knä, fotled (2) och tår; varje arm har axel (3), armbåge, underarmsrotation och handled (2). Funktionen `limit_torque()` är musklernas Hill-gräns och används av all styrning, även i MJX.



Första kroppen: segmentmassor och längder ur antropometriska mätdata.



Vår kropp mot MuJoCos humanoid.

Validering (`checks.py`)

Kontroll	Resultat	Förväntat
Massa / längd	75,0 kg / 1,750 m	parametrar
Tyngdpunktens höjd	0,572 · H	0,55–0,57 · H
Fritt fall	9,810 / 3,710 m/s²	inställt g
Halv knäböj, jorden	höft 18 %, knä 18 %, fotled 13 % av max	rimlig belastning
Halv knäböj, Mars	7 % / 7 % / 3 %	≈ 0,38 × jorden
Squat jump, jorden	30 cm (upphopp 2,42 m/s)	män 30–45 cm
Squat jump, Mars	107 cm = 3,6 × jorden	> 2,64 × (lättare last → snabbare ben)
Terräng i MuJoCo	medelfel 0,3 mm, max 6 mm	0 (5 cm rutnät)

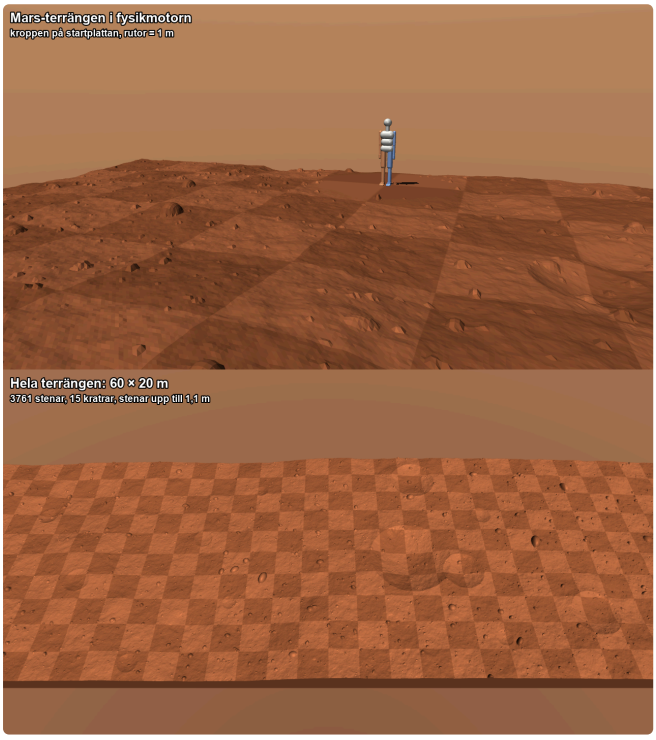
Hopptestet använder enkel styrning utan balans (maximal kraft med optimal fördröjning) – en nedre gräns för förmågan. Kollapskvoten Mars/jorden blev 1,78 mot 1,63 vid ren g-skalning, eftersom leddämpning och kontakternas tidskonstanter inte skalar med g.

---

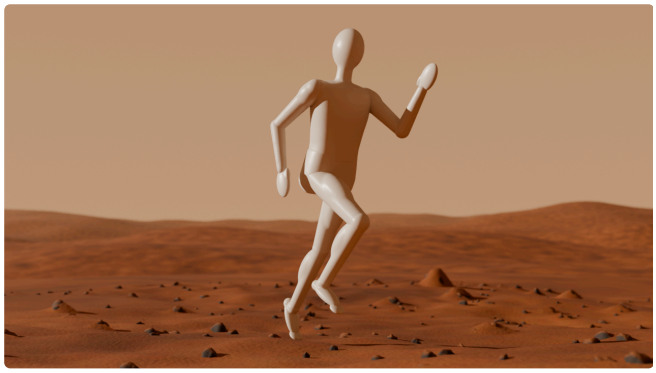
3. Världarna och renderingen

Mars-terräng (`terrain.py`): fraktal grundyta, kratrar och stenar med verklig storleksstatistik (Golombek & Rapp 1997). Samma höjdkarta används av MuJoCo och Blender. **Själva träningen sker på platt mark** för att isolera gravitationens effekt; terrängen syns bara i Blender-filmerna.

Jordscenen är en friidrottsbana med startlinje vid x = 0, mållinje vid 30 m och läktare. **Blender-kedjan**: `blendexport.py` spelar in MuJoCo-läget per bildruta till JSON, och `blender/build_scene.py` bygger scenen (terräng, stenar, himmel, mjuk skyltdocka) och renderar med Cycles på CPU. EEVEE kraschar på den här Macen.



Mars-terrängen som höjdkarta i fysikmotorn.


Första Blender-renderingen: skyltdockan på Mars.

---

4. Sprintmiljön

- **Observationer:** 108 tal (ledvinklar och ledfarter, bålens orientering och fart, fotkontakter, g m.m.). Från ARES-7 är det 111 tal: dessutom sidläge och riktning (cos/sin), så att löparen ser banan.
- **Handlingar:** 31 normaliserade ledmoment → Hill-gränsen. Styrning med 50 Hz.
- **Start:** slumpad men balanserad färdig-ställning (20/20 står med PD-reglering). Under träningen startar en andel episoder mitt i en inspelad löpning (RSI) så att nätet ser löpfart tidigt.
- **Fall:** en annan kroppsdel än fötterna rör marken.
- **Mål:** från v3 räknas målet först när bäckenet passerat 30 m *och* löparen står upprätt 1 m efter linjen (utlöpning). Tiden är tidpunkten då tyngdpunkten korsar 30 m.

Belöning	Innehåll	Användes i
v1	fart mot målet, obegränsad	ARES-1
v2	fart normerad 0–1	ARES-2, -3
v3	+ mål först efter 1 m upprätt utlöpning, tiden vid linjen	ARES-4, -5, -6, M1–M3, M5
v4	v3 + fallstraff −10 + 3× målbonus	ARES-M4 (misslyckad)
v5	v3, men fartbelöningen slutar vid mållinjen; målbonus 20 – samma för båda världarna	ARES-7, -M6 och alla senare

5. Träningsmetoden

PPO + AMP (Proximal Policy Optimization med Adversarial Motion Priors), skrivet i JAX ovanpå MJX (`train/ppo_amp.py`, `train/mjx_env.py`). Aktören och värdenätet är MLP:er med 256 + 256 tanh-celler. Diskriminatorn har 512 + 256 celler.

Inställning	Värde
Parallella miljöer × styrsteg per iteration	4 096 × 24 = 98 304 miljösteg per PPO-iteration
Uppdatering	4 epoker × 8 minibatcher, GAE $\lambda = 0{,}95$
Diskonteringsfaktor γ	0,99 (≈ 2 s horisont) → 0,995 från ARES-7
Inlärningstakt	$3 \cdot 10^{-4}$ fast → adaptiv med KL-mål 0,01 från ARES-6/M5
Träningstid	170 min per körning på en L40S ≈ 2 200 PPO-iterationer ≈ 215 miljoner miljösteg
Stilreferens (AMP)	26 klipp ur CMU:s motion capture (fri licens) överförda till vår kropp med inverskinematik (fel 3–5 cm)
Stilsläpp	stilvikt 0,5 → 0 mellan it 500 och 1000; därefter avgör bara uppgiften och fysiken
amp-drop	diskriminatorn ser inte bäckenhöjd och lodrät fart – jordens löpning ska inte styra flyghöjd på Mars

AMP-diskriminatorn lär sig skilja nätets rörelser från riktig mänsklig löpning, och "lurar man" den ges stilbelöning. Det får löparen att börja som en människa. Eftersom frågan är hur man *optimalt* springer på Mars – inte hur en jordbo springer där – trappas stilen ned till noll. Då får fysiken avgöra resten, och båda världarna får exakt samma frihet att utforska.

6. Alla träningskörningar

Varje körning fick ett modellnamn (ARES = jorden, ARES-M = Mars). Alla kördes på Runpod (L40S-GPU:er) och stoppade sig själva efter träningen; pod:arna raderades efteråt.

Modell	Värld	Datum	Recept	Resultat
ARES-1	jorden	23–24/10	uppgift v1 (obegränsad fart), AMP med alla 31 leder	Stilen kollapsade direkt; utfall framåt upp till 17 m. Stoppad ~1 140 it.
ARES-2	jorden	23–24/10	uppgift v2, stilvikt 0,7, svagare diskriminator, 30 % RSI	Stilen höll längre men dog; utfall ~13 m. Stoppad ~740 it.
ARES-3	jorden	23–24/10	som ARES-2 men AMP utan de 8 leder CMU inte mäter	Springer på riktigt från it 350; i mål från it 900; it 1700 5,20 s – men dyker över linjen.
ARES-4	jorden	24/10	belöning v3 (mål först efter 1 m upprätt utlöpning), 26 CMU-klipp	Bästa giltiga lopp it 1800: 5,34 s upprätt genom mål.
ARES-M1	Mars	24/10	ARES-4:s recept, g = 3,71	Ser ut som jordlöpning; ingen sen checkpoint i mål strikt.
ARES-M2	Mars	24/10	+ amp-drop (bäckenhöjd, lodrät fart), uppgift/stil 0,5/0,5	En enda strikt målgång (it 1200, 5,96 s).
ARES-M3	Mars	24/10	+ stilsläpp: stilvikt 0,5 → 0 mellan it 500 och 1000	Närmast hittills: 30,1 m; ny stil – kraftig lutning, långa studsande steg. Strikt i mål max 5/16.
ARES-M4	Mars	24/10	finjustering av M3 (belöning v4, fallstraff, 3× målbonus)	Misslyckad: kollapsade direkt när aktören släpptes. Raderad efter ~40 min.
ARES-5	jorden	24–25/10	M3:s recept på jorden	it 950: 16/16 i mål, 5,36 ± 0,05 s. Rasade vid it 965 och återhämtade sig aldrig.
ARES-M5	Mars	25/10	M3 + KL-kontroll (adaptiv inlärningstakt)	Inga ras, men bäst 3/16 i mål (it 1350).
ARES-6	jorden	25/10	ARES-5 + KL-kontroll	Inga ras; passerar 30 m i 15/16 lopp men faller i utlöpningen → 1/16 godkänt.
ARES-7	jorden	25/10	v5-belöning, 111 observationer, γ = 0,995, tidsgräns 10 s (samma för båda)	16/16 i mål vid varje checkpoint från it 450. Bäst 5,22 s.
ARES-M6	Mars	25/10	identiskt med ARES-7 utom g	16/16 i mål från it 500. Bäst 5,42 s.
ARES-7-s1/-s2	jorden	25–26/10	ARES-7 med slumpfrö 1 och 2	Bäst 5,13 / 5,18 s. Samma löpstil.
ARES-M6-s1/-s2	Mars	25–26/10	ARES-M6 med slumpfrö 1 och 2	Bäst 5,41 / 5,38 s. Samma löpstil.
ARES-60 / -M60	båda	25–26/10	60 m, tidsgräns 15 s	Jorden 9,22 s (it 1950), Mars 8,82 s (it 2234), medel av 16 lopp. Mars går om vid ~46 m.

7. Problem vi löste

Stilen kollapsade (ARES-1, -2)

Tår, underarmsrotation och handleder står exakt 0 i CMU-referensen, eftersom IK saknar markörer för dem. Diskriminatorn avslöjade nätet på dem enbart. **Lösning:** de 8 lederna togs bort ur stilbedömningen (ARES-3), och sedan sprang löparen på riktigt från iteration 350.

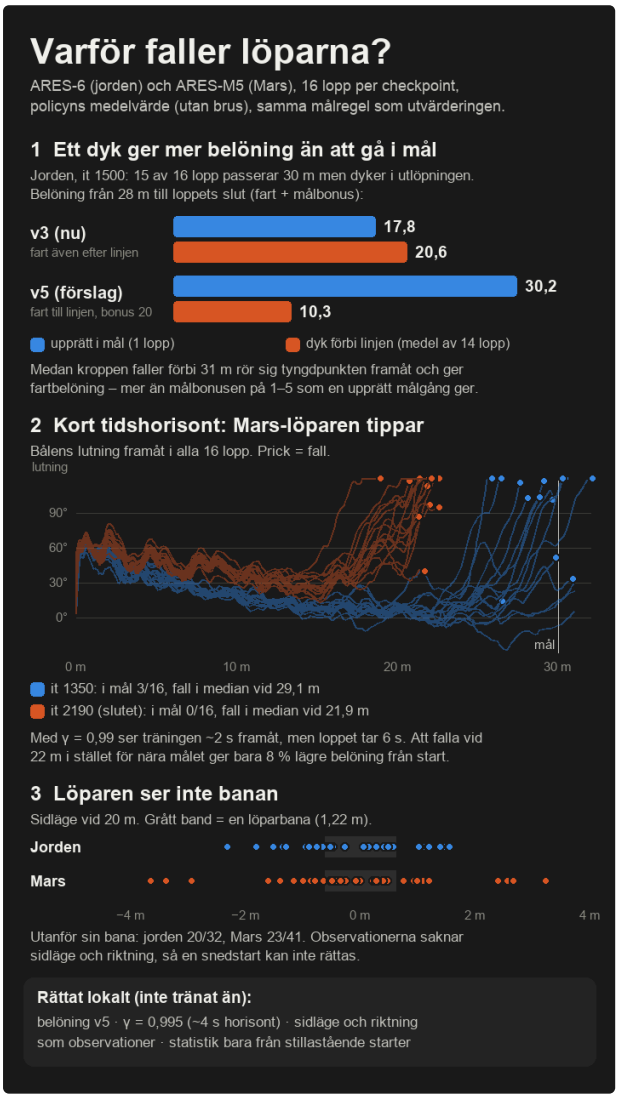
Löparen dök över linjen (ARES-3)

Målet räknades på tyngdpunkten, så att dyka var billigare än att springa hela vägen. **Lösning:** belöning v3 – mål först efter 1 m upprätt utlöpning.

Plötsliga ras (ARES-1, -5, M4)

Varje ras sammanföll med en spik i policyförlusten (normalt ±0,005, vid rasen 0,08–0,30). En enda PPO-uppdatering flyttade policyn långt utanför förtroendeområdet. **Lösning:** adaptiv inlärningstakt med KL-mål 0,01 (som legged_gym). Dessutom sparas hela träningstillståndet (värdenät, diskriminator, optimerare, normering) var 250:e iteration. Efter det blev det inga fler ras.

Varför ARES-6 och M5 ändå inte blev tillförlitliga



Diagnoskortet (tools/diagnose.py): varje styrsteg analyserat för 16 lopp.

1. **v3 belönade dyk:** fartbelöningen fortsatte efter linjen. Ett dyk förbi 31 m gav 20,6 mot 17,8 för att stå upprätt. → v5: fart bara fram till linjen, målbonus 20.
2. **För kort horisont:** γ = 0,99 ≈ 2 s, men loppet tar 5–6 s. Tidiga vinster från en hård lutning vägde tyngre än fallet vid 22 m. → γ = 0,995.
3. **Löparen såg inte banan:** observationerna saknade sidläge och riktning, men sidled straffades. → 111 observationer.
4. **Träningsstatistiken räknade flygande starter** (RSI) som målgångar. → bara stillastående starter i statistiken.

5. **Olika tidsgräns** (8 s jorden, 14 s Mars, härledd ur g). Det upptäcktes och rättades: 10 s för båda, sparad i varje checkpoint.

Drift och infrastruktur

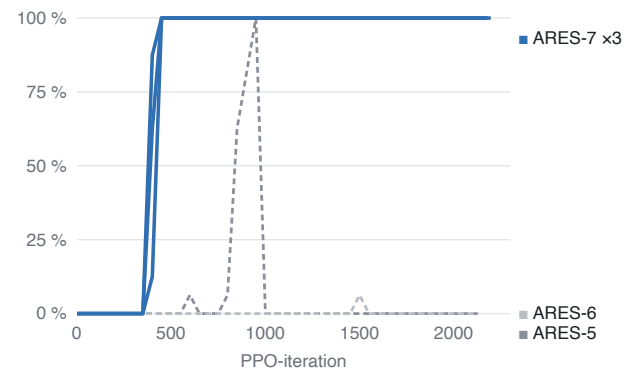
- En pod startade aldrig. Läxa: kontrollera inom 15–20 min att koden hämtats, annars byt hall.
- Finjusteringen M4 kollapsade direkt när aktören släpptes (för kort uppvärmning av värdenätet och nystartad Adam).
- Macens disk blev full två gånger, vilket gav trasiga Blender-klipp och en förlorad slutbild för ARES-60. Bevakarna skriver nu atomiskt och hoppar vidare om en ögonblicksbild saknas.
- Croc-överföringar: relärummet bestäms av kodens fyra första tecken. Varje överföring får därför ett eget hashat prefix.

---

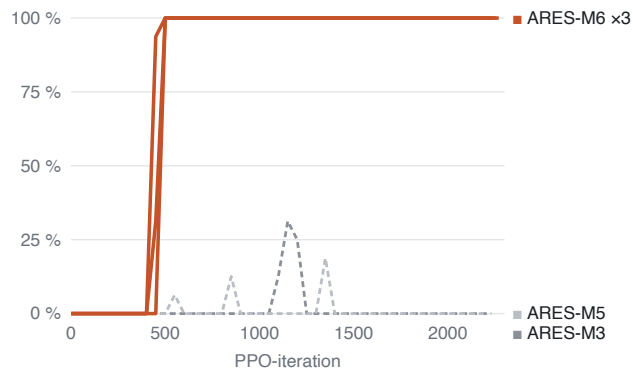
8. Resultat

All utvärdering görs **strikt**: deterministisk policy (medelvärdet, inget brus), 16 lopp med olika startställning, mål = upprätt 1 m efter linjen, tid = när tyngdpunkten korsar 30 m. Varje checkpoint (var 50:e iteration) testades så.

Jorden – andel i mål, 16 lopp

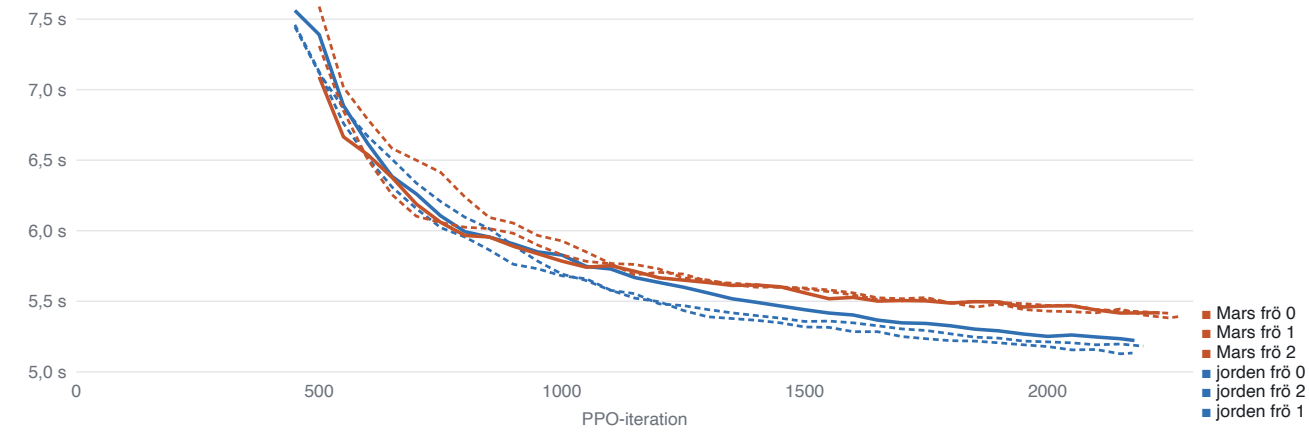


Mars – andel i mål, 16 lopp



Streckat: äldre recept. Heldraget: ARES-7/M6-receptet, tre träningar per värld (frö 0, 1, 2). Med det nya receptet går alla sex träningar i mål 16/16 vid varje checkpoint från iteration 450–500 och framåt; de gamla nådde aldrig dit (utom ARES-5 kortvarigt före raset).

Medeltid 30 m (checkpoints med 16/16 i mål)



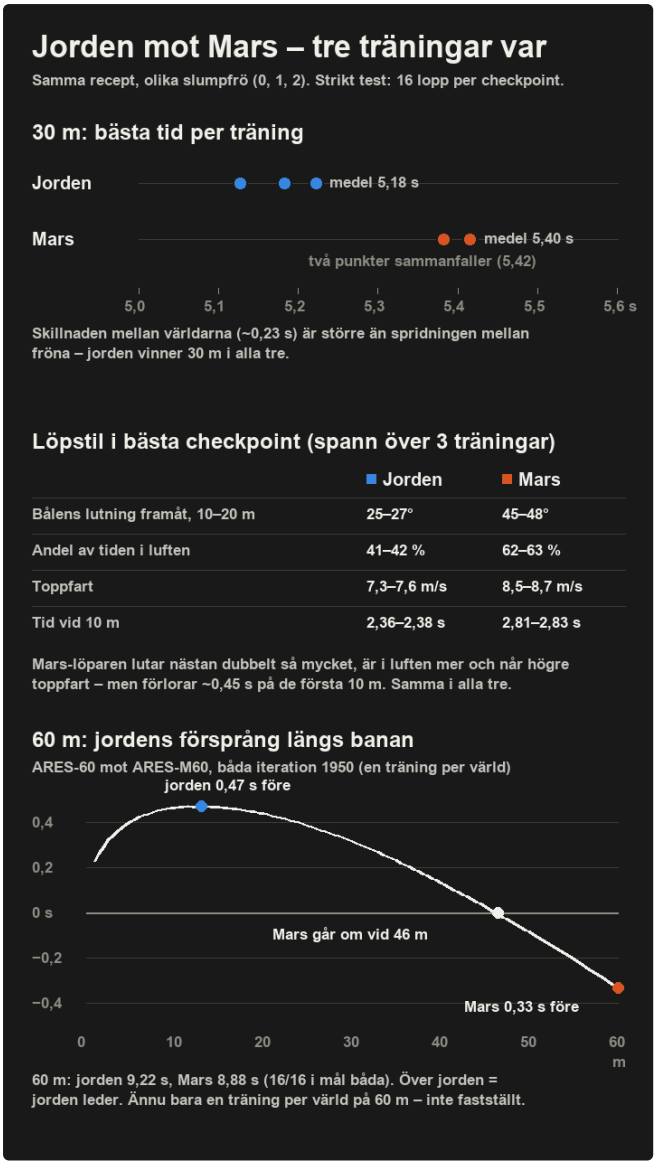
Tiderna sjunker fortfarande med ungefär 0,02–0,05 s per 200 iterationer när träningstiden tar slut – i båda världarna.

Tre träningar per värld – replikerat

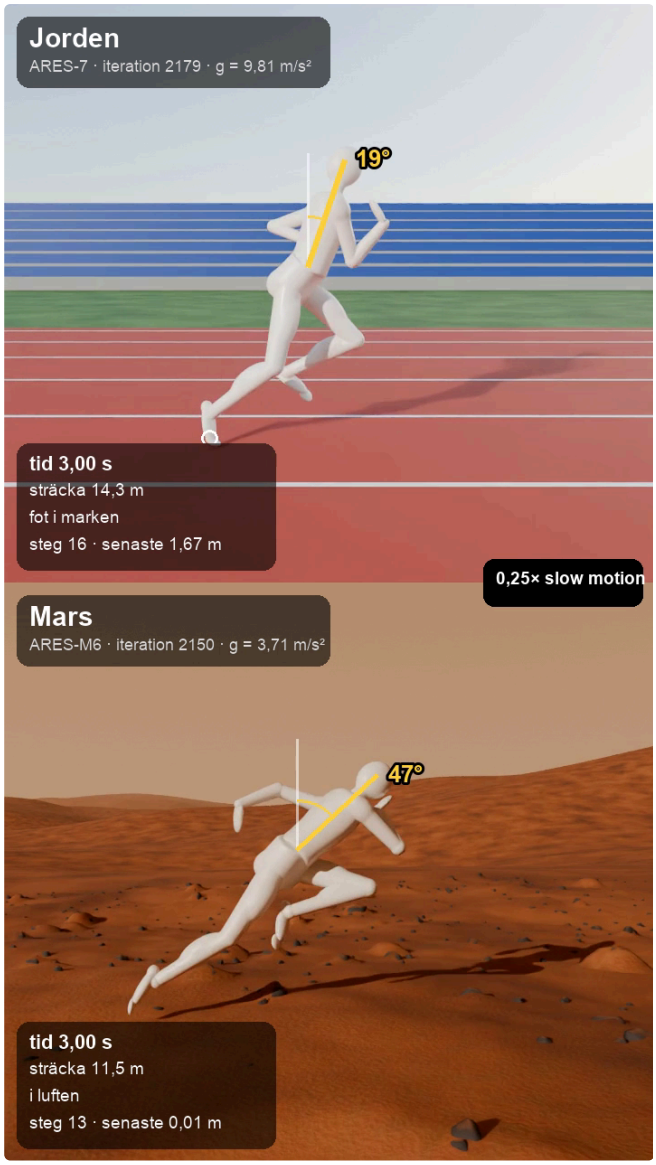
Mått (spann över 3 träningar)	Jorden	Mars
Bästa medeltid 30 m (frö 0 / 1 / 2)	5,22 / 5,13 / 5,18 s	5,42 / 5,41 / 5,38 s
Medel	5,18 s	5,40 s
Tid vid 10 m	2,36–2,38 s	2,81–2,83 s
Bålens lutning, 10–20 m	25–27°	45–48°
Andel av tiden i luften	41–42 %	62–63 %
Toppfart	7,3–7,6 m/s	8,5–8,7 m/s

Mellantider (ARES-7 it 2179 / M6 it 2150)	5 m	10 m	20 m	30 m
Jorden	1,54	2,36	3,82	5,22
Mars	1,94	2,81	4,20	5,42

Jorden vinner starten (0,45 s före vid 10 m). Mars är snabbare i flygande fart: 10–30 m tar 2,61 s mot 2,86 s. Ingen löpare byter bana (max 0,29 / 0,41 m i sidled).



Tre träningar per värld (tools/repeat_card.py).



Samma ögonblick, t = 3,00 s, ur slow motion-jämförelsen. Gul linje = bålens lutning.

60 m (en träning per värld)

Jorden 9,22 s (ARES-60 it 1950; slutbilden förlorades), Mars 8,82 s (ARES-M60 it 2234), medel av 16 lopp. Jorden leder med som mest 0,47 s vid 13 m; Mars går om vid ungefär 46 m. Med bara en träning per värld är det inte fastställt.

9. Svaret på forskningsfrågan – och förbehållen

Så springer man snabbast 30 m på Mars, från stillastående – enligt vår modell:

- **Luta framåt ≈ 46°** (jorden 26°). Lutningen låter löparen trycka framåt utan att foten halkar, trots att greppet bara är 38 % av jordens.
- **Långa luftfaser:** 62 % av tiden i luften (jorden 41 %).
- **Försiktig start:** 2,82 s vid 10 m mot jordens 2,37 s – greppet räcker inte för jordens acceleration.
- **Högre toppfart:** 8,6 m/s (jorden 7,5 m/s). På längre lopp tar Mars igen förlusten från starten.

Resultat: 30 m på 5,40 s mot jordens 5,18 s.

Förbehåll

1. **Inte bevisat optimum** – det är den bästa stil PPO hittade, men alla tre fröna konvergerar till samma stil.
2. **Inte färdigtränat** – tiderna sjönk fortfarande när tiden tog slut (gäller båda världarna lika).
3. **Förenklad kropp** – momentstyrd, 1,75 m / 75 kg, friktion 0,9, inga senor eller muskelmodell. Mars-regolit har troligen friktion 0,6–0,8, vilket skulle göra starten ännu svårare.
4. **Platt bana** – ingen terräng i träningen.



Svarskortet (tools/answer_card.py).

10. Hur nära en riktig löpare?

Mått	Vår jordlöpare	Riktiga löpare
30 m från stillastående	5,13–5,22 s	motionär ≈ 4,6–5,2 s, elit 3,8 s
Toppfart	7,3–7,6 m/s	motionär ~7–8 m/s, elit 11–12 m/s
Stegfrekvens	3,9–4,6 Hz	liknande
Steglängd	1,6–1,9 m	liknande vid den farten
Markkontakt	~130–140 ms	liknande vid den farten
Bålens lutning vid 20–30 m	23–30°, rätar aldrig upp sig	≈ 5–15°

Jordlöparen motsvarar alltså en motionär, med mänskliga stegmått. Den tydligaste skillnaden är att bålen förblir framåtlutad hela loppet – den sista uppresningen hinner inte bli lönsam på 30 m. Det gäller båda världarna lika, så jämförelsen påverkas mindre än de absoluta tiderna.

---

11. Filmer och visualisering

- **Träningsvyn** (`trainviz.py`): en film per checkpoint med löparen och policynätverket. Nätbilden är trogen beräkningen: cell = aktivering, tråd = vikt × aktivering.
- **Träningsläktaren** (`live.py`): mobilsida via Tailscale med senaste checkpoint-film, inlärningskurva och strikta resultat, där det senaste visas överst.
- **"Från fall till löpning"** (24/10): de roligaste fallen och ARES-3:s väg till 30 m, med musiken "Exhilarate" (Kevin MacLeod).
- **Slow motion jorden mot Mars**: ARES-7 it 2179 mot M6 it 2150 i Blender, med lutningslinje, fotsteg och musik.
- **Svarskortet** och diagnos- och repetitionskorten (mobilformat 720 × 1280).
- **"Från fall till löpning – jorden och Mars"** (26/10, 51 s): båda världarna staplade, från iteration 100 (faller efter en sekund) till iteration 2150, renderad i Blender med nätverken och svaret på frågan. Musik "Cretaceous Dawn" (Kevin MacLeod). Filmen och allt material: dynasus.com/marsrun.

Alla filmer i 9:16 (720 × 1280) med text ≥ 15 px. Klippbanken med 238 filmer och 5 stillbilder finns i `film/` med beskrivningar i `film/logg.md`.

---

12. Infrastruktur

Del	Vad
body.py, terrain.py, checks.py	kropp, Mars-terräng, fysikkontroller
sprint_env.py / train/mjx_env.py	sprintmiljön i MuJoCo (CPU) och MJX (GPU), paritetstestad (train.test_env)
mocap.py, train/reference.py	CMU-klipp → vår kropp med IK → AMP-referens
train/ppo_amp.py	PPO + AMP i JAX: KL-kontroll, stilsläpp, amp-drop, fullt tillstånd, återupptagning
deploy/	kodpaket och pod-skript; kod och ögonblicksbilder överförs med croc
launchd-jobb	kodsändare, träningsbevakare (strikt test av varje ny checkpoint), Träningsläktaren, renderingskön
tools/strict_eval.py, diagnose.py, gait_analysis.py	strikt test, analys per styrsteg, löpstilsmått
blendexport.py, blender/build_scene.py, tools/*_reel.py	Blender-export, scen, filmmontage med ljud

---

13. Öppna frågor

- **60 m med tre träningar per värld** – för att fastställa att Mars går om vid ~46 m.
- **Mars-friktion 0,6–0,8** i stället för 0,9 – den troligen största osäkerheten för startfasen.
- **Längre träning** – tiderna hade inte planat ut.
- **Terräng** – träna på den genererade Mars-ytan.
- **Muskelmodell och senor** – hälsenans fjädring saknas.