

IPv6 v gridu pro LHC experimenty

Jiří Chudoba

FZU – Fyzikální ústav AV ČR

This work was partially supported by project FORTE CZ.02.01.01/00/22_008/0004632

Den IPv6, 4.6.2026



Co-funded by
the European Union



Ministry of Education,
Youth and Sports
of the Czech Republic



FZU

Institute of Physics
of the Czech
Academy of Sciences



Division of Elementary
Particle Physics

LHC: Large Hadron Collider

LHC je 27 km dlouhý protonový urychlovač CERNu na francouzsko-švýcarské hranici.

Klíčové experimenty: ATLAS, CMS, ALICE a LHCb – každý s odlišnou fyzikální agendou.

Nejslavnější výsledek: objev Higgsova bosonu v roce 2012 (ATLAS + CMS).

Experimenty produkují dlouhodobě velké objemy dat



ATLAS

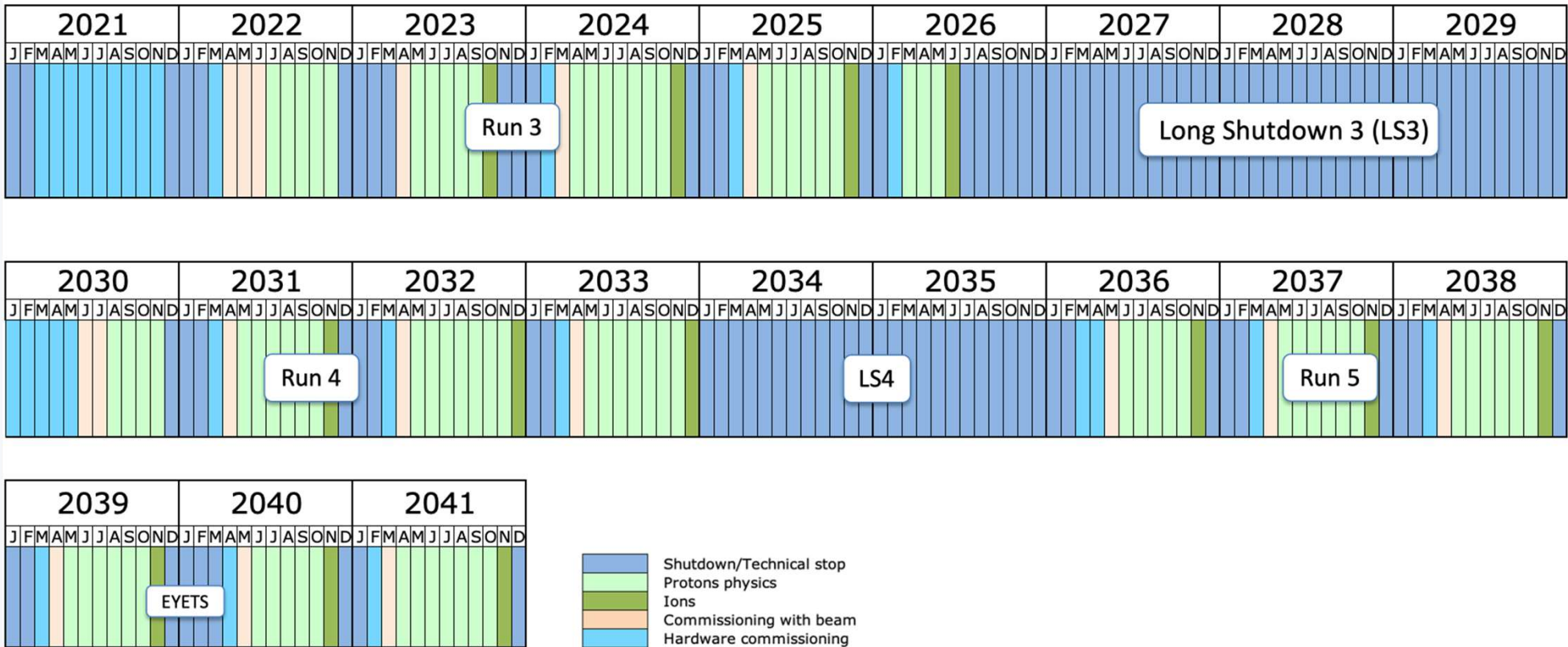
CMS

ALICE

LHCb

Zdroj obrázky: Visit CERN – LHC aerial view postcard

Dlouhodobé plány HL-LHC



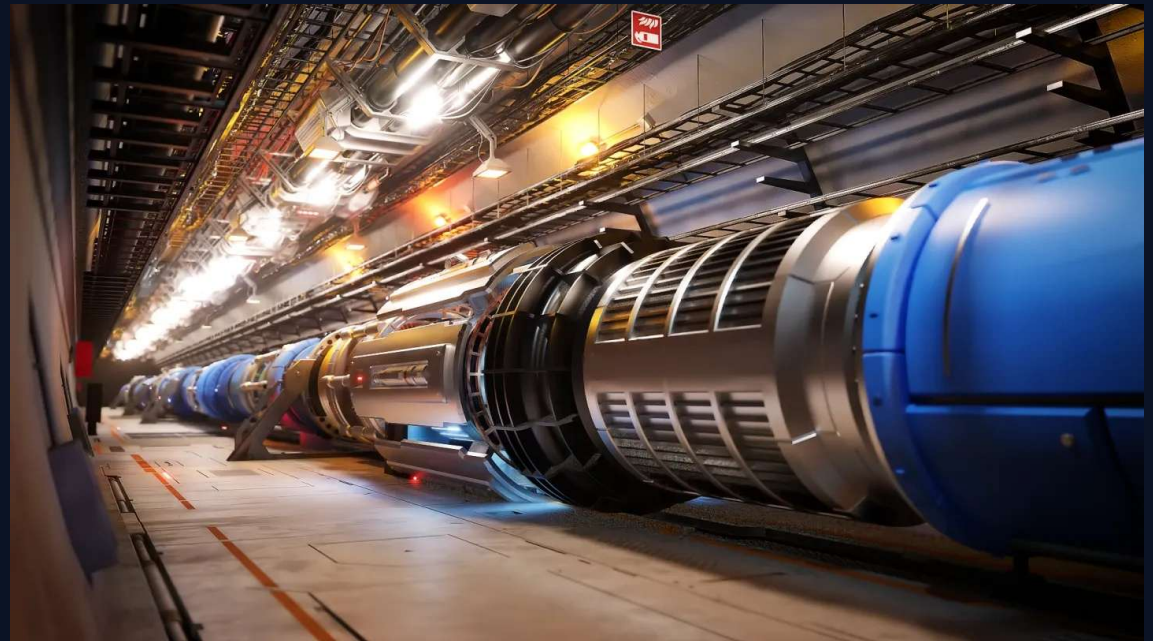
Last update: November 24

FCC

Future Circular Collider (FCC) je studovaný nástupce LHC s tunelem o délce ~91 km.

První etapa FCC-ee by měla sloužit jako „Higgs factory“, později by mohl následovat protonový FCC-hh.

Pro provozní týmy je to připomínka, že přechod na IPv6 není jednorázová akce, ale příprava na další dekády.



WLCG: od MONARC k dnešní globální infrastruktuře

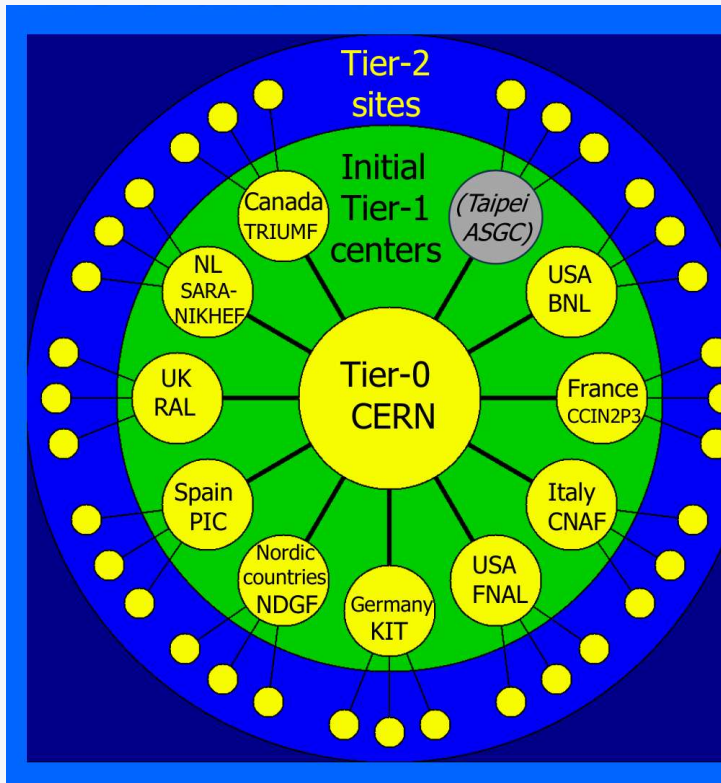
distribučovaný výpočetní a datový systém



Dnes

WLCG propojuje CERN, Tier-1, Tier-2 i lokální analýzu v jedné provozované federaci. Bez sítí by ten model nefungoval.

Hierarchie WLCG: Tier-0 až Tier-3



Tier-0 (CERN)

První zápis a promptní zpracování dat z experimentů.

Tier-1

Trvalé kopie, reprocessing, velké storage a 24/7 provoz.

Tier-2

Simulace, analýza a regionální kapacity; dnes hlavní provozní plocha pro distribuovaný compute.

Tier-3

Lokální univerzitní a experimentální zdroje mimo formální závazky WLCG.

WLCG dnes: globální služba pro fyziku z LHC

Už nejde jen o „grid“ jako historický pojem, ale o dlouhodobě provozovanou mezinárodní infrastrukturu.

~160

výpočetních center

40+

zemí

17

Tier-1 center

140+

menších Tier-2 center

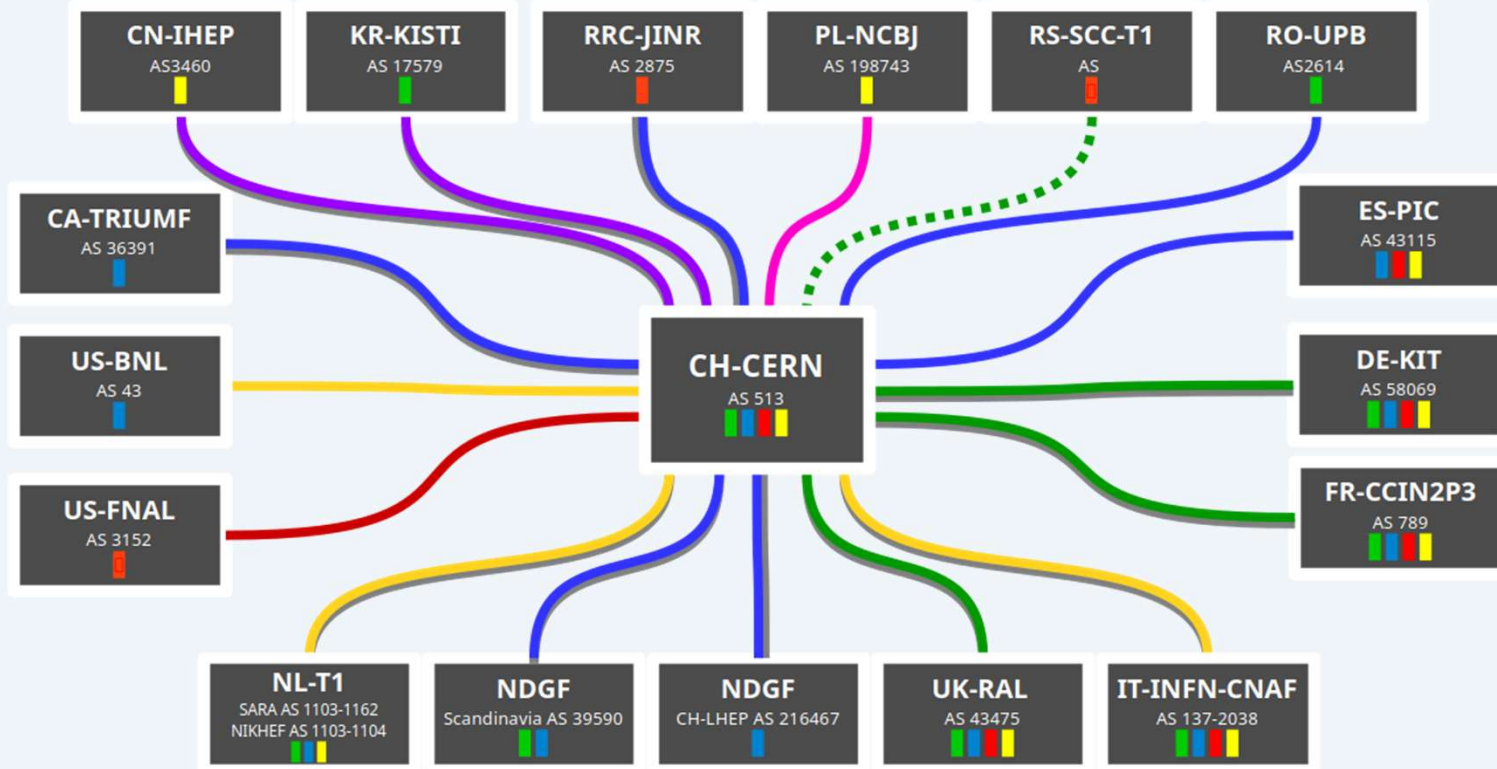
CERN typicky poskytuje jen menší část celkového CPU a storage; většinu nesou partnerská centra. Stovky PB až exabajty dat a miliony denních úloh vyžadují robustní routing, monitoring a provozní koordinaci.

Pro síťáře je důležité, že data netečou jen z CERNu ven – významná část provozu je dnes mezi centry navzájem.

Klíčová zpráva pro IPv6 Day

WLCG není centralizovaný model s jedním datacentrem. Je to federace lokalit, kde síť je součástí samotného výpočetního modelu.

LHCOPN



Line speeds:

- 20Gbps
- 40Gbps
- 100Gbps
- 200Gbps
- 400Gbps
- 800Gbps
- IPv4

Experiments:

- Alice
- Atlas
- CMS
- LHCb

Last update:

- 20260528
- edoardo.martelli@cern.ch

HEPiX IPv6 Working Group

Fáze migrace podle HEPiX: testbed a analýza → dual-stack storage → odstraňování legacy IPv4 → IPv6 na compute a worker nodes.

Klíčovní stakeholderi: WLCG operations, experimenty, síťové týmy, vývojáři storage a monitoringu.

Cíl pro WAN: odstranit IPv4 z LHCOPN před DC27; LHCONE následně před další velkou data challenge.

2011–2016

analýza, testbed, první opravy

2017–2023

dual-stack storage ve WLCG

2023–dnes

compute + worker nodes + IPv6-only WAN

Stav v roce 2026: dual-stack je široce nasazen

Největší pokrok je na storage a v LHCOPN. Compute vrstva je dál nejcitlivější část.

100 %

Tier-1 storage na IPv6

98 %

Tier-2 storage na IPv6

~75 %

CE + worker nodes
nasazeno do května 2026

~85 %

služeb v VO feeds
už dual-stack

Storage kampaň je v podstatě dokončena; těžiště se přesunulo na compute služby, worker nodes a zbytky IPv4 mezi dual-stack endpointy.

HEPiX zároveň zdůrazňuje, že monitoring je pro přechod klíčový – bez viditelnosti se residual IPv4 špatně dohledává.

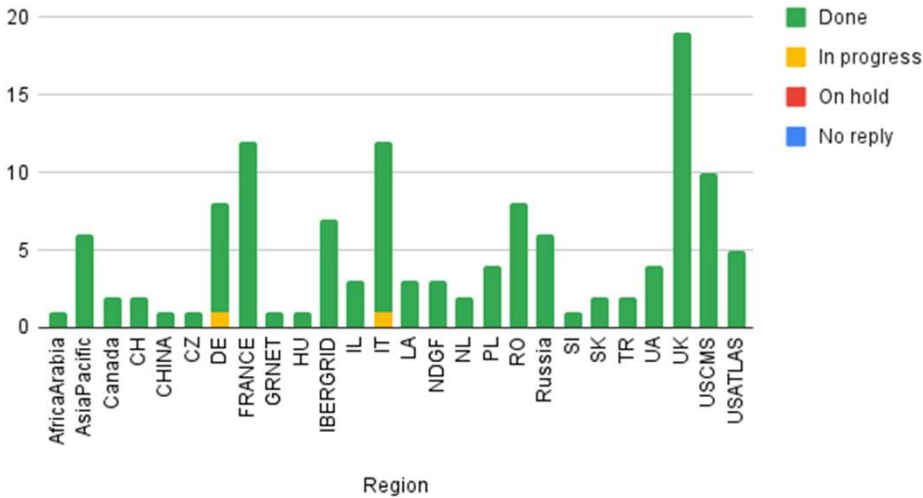
Interpretace

WLCG už dnes umí obsloužit velkou část provozu nativně přes IPv6. Otázka už není „zda“, ale „jak rychle a s jakým rizikem“.

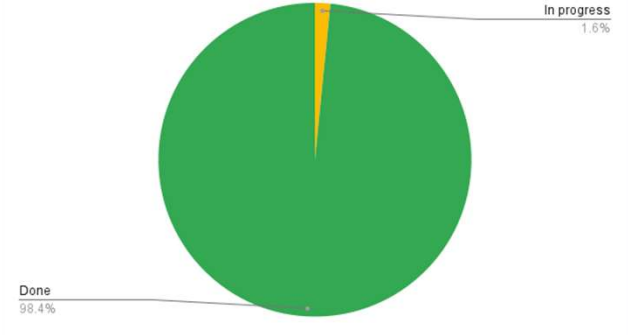
Zdroj: CHEP 2026 / HEPiX 2026: storage 100 % T1, 98 % T2; compute ~75 %; VO feeds ~85 % dual-stack.

Storage

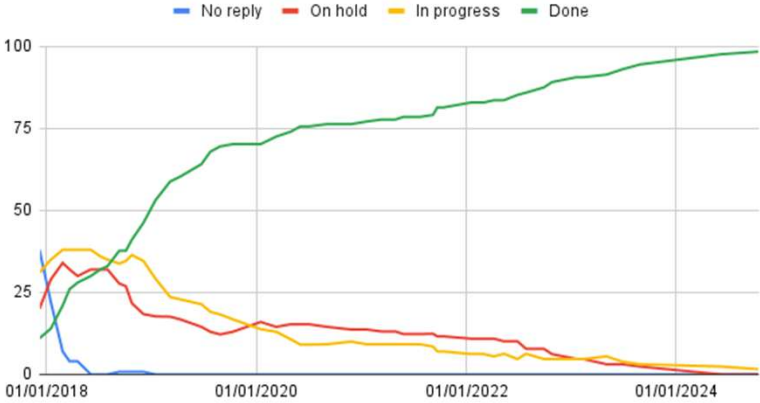
Tier-2 IPv6 deployment status [15-10-2024]



Tier-2 IPv6 deployment status [15-10-2024]

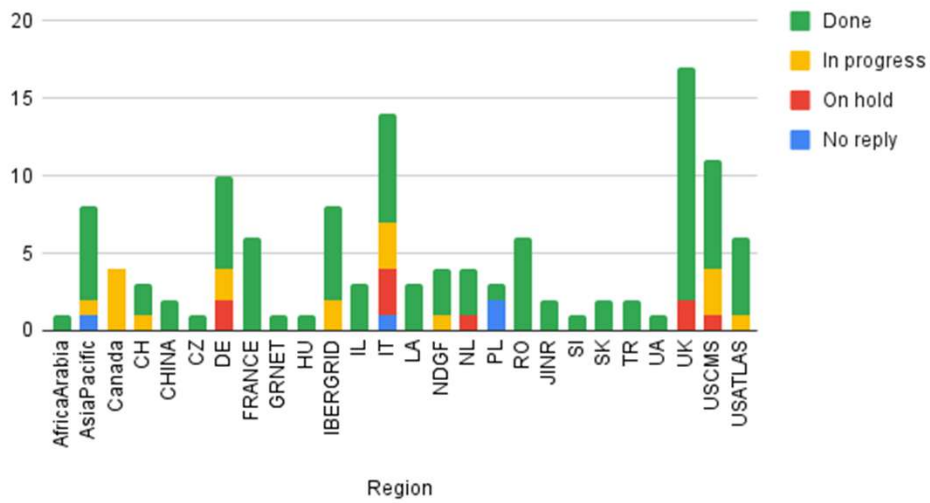


Status vs. time

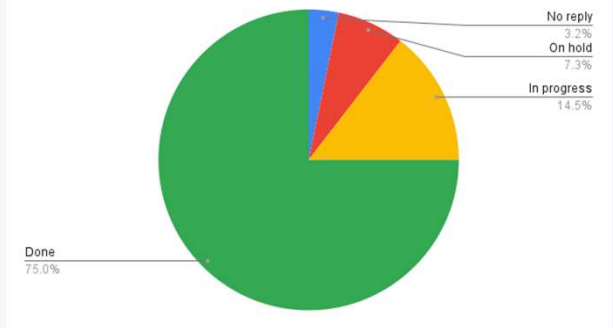


CPU

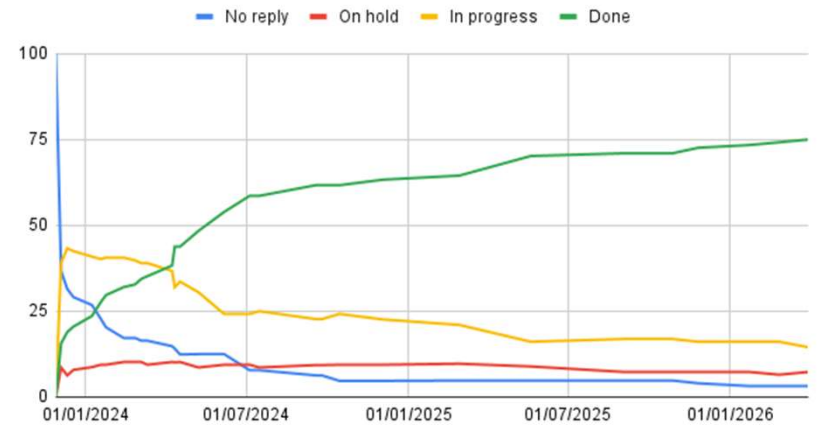
Tier-1/2 IPv6 CE/WN deployment status [31-03-2026]



Tier-1/2 IPv6 CE/WN deployment status [31-03-2026]



Tier-1/2 CE/WN IPv6 deployment status vs. time



Stav v roce 2026: dual-stack je široce nasazen

Největší pokrok je na storage a v LHCOPN. Compute vrstva je dál nejcitlivější část.

100 %

Tier-1 storage na IPv6

98 %

Tier-2 storage na IPv6

~75 %

CE + worker nodes
nasazeno do května 2026

~85 %

služeb v VO feeds
už dual-stack

Storage kampaň je v podstatě dokončena; těžiště se přesunulo na compute služby, worker nodes a zbytky IPv4 mezi dual-stack endpointy.

HEPiX zároveň zdůrazňuje, že monitoring je pro přechod klíčový – bez viditelnosti se residual IPv4 špatně dohledává.

Interpretace

WLCG už dnes umí obsloužit velkou část provozu nativně přes IPv6. Otázka už není „zda“, ale „jak rychle a s jakým rizikem“.

WAN část přechodu: LHCOPN už je skoro celé na IPv6

Klíčová změna: IPv4 se ne „zakazuje“, ale odstraňuje z preferované WAN cesty mezi WLCG lokalitami.

93–98 % WLCG WAN přenosů/LHCOPN provozu běží po IPv6

USA Tier-1 odstranila IPv4 z LHCOPN linek už v roce 2025 bez významného dopadu; obdobné kroky následovaly i jinde.

Zbytkový IPv4 může při testech spadnout na LHCONe nebo obecné R&E cesty – proto jsou blackout testy tak cenné.

Krátkodobý cíl: odstranit IPv4 z LHCOPN do konce roku 2026, tedy před DC27.



Data Challenge 2024 (DC24)

DC24 byla důležitá i pro síť: ukázala, že páteřní síť nebyla hlavní bottleneck, ale slabší místa byla jinde.

25 %

cílového HL-LHC provozu

1.2 Tb/s

minimal model

2.4 Tb/s

flexible model



hlavní cíl splněn

DC24 dosáhla plného throughputu minimal modelu a tlačila flexible target ve druhém týdnu challenge. Backbone síť obecně nebyla považována za limitaci; challenge naopak odhalila limity v FTS, konfiguraci lokalit, middleware a monitoringu.

Vedlejším přínosem bylo ověření nových technologií – tokenů, SciTags, lepšího network monitoringu a dalších mini-testů.

Roadmapa k DC27: proč je IPv6 součástí přípravy

DC27 má být už 50% rehearsal na HL-LHC a bude mít výrazně ambicióznější síťové i provozní cíle.

22. 2. – 5. 3. 2027

Cíl challenge: 50 % HL-LHC target, pokud to dovolí hardware a připravenost lokalit.

Plánované testy: FTS4, tokens-only bez x509 fallbacku, tape tests, file-size effects, monitoring a mini-DCs.

Síťové mini-DC cíle: většina dat přes IPv6, několik IPv6-only lokalit pro každý experiment, ≥ 80 % provozu identifikováno přes SciTags.

IPv4 blackout

rozšířit ověřené scénáře z LHCOPN/LHCONE

SciTags + perfSONAR

lepší viditelnost toku a aktivní hledání anomálií

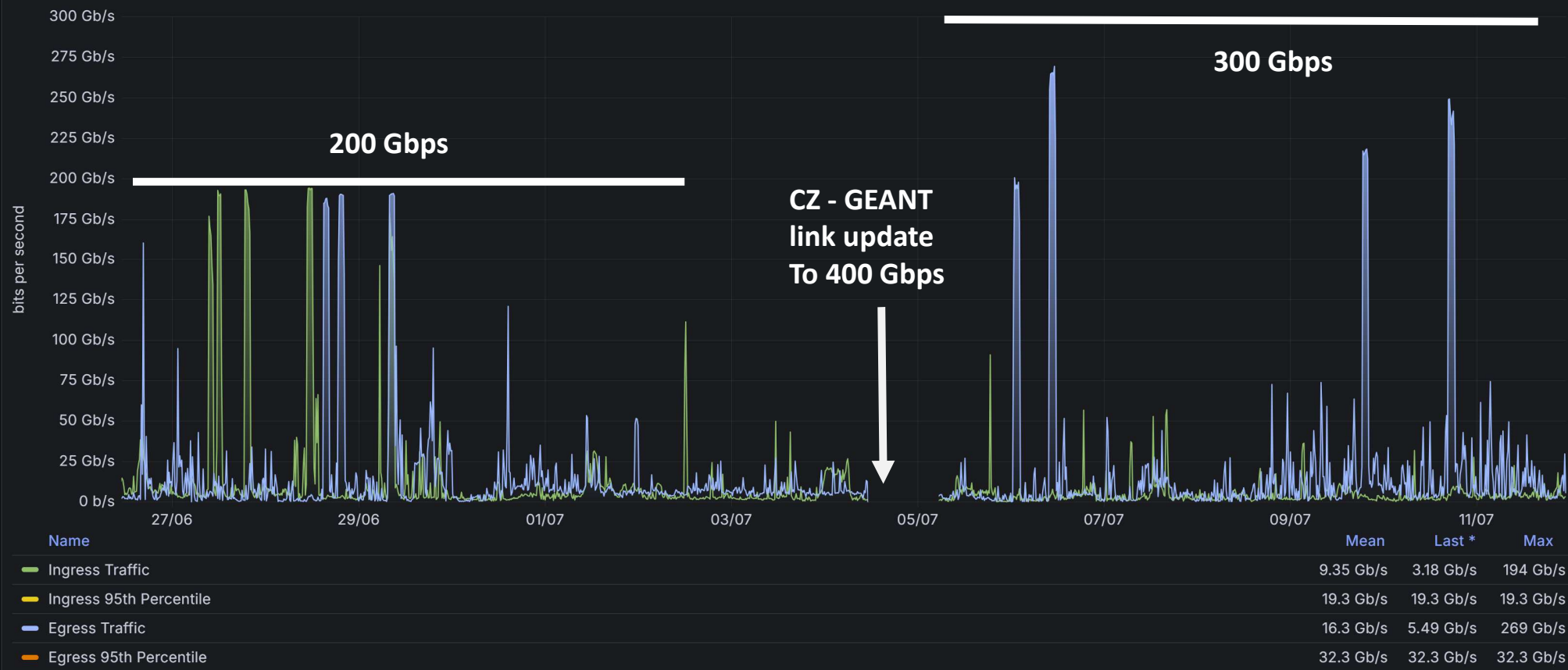
Pásky (tapes)

nejen disk-to-disk, ale i reálná archivní vrstva

IPv6-only sites

ověření, že produkční workflows už na IPv4 nezávisí

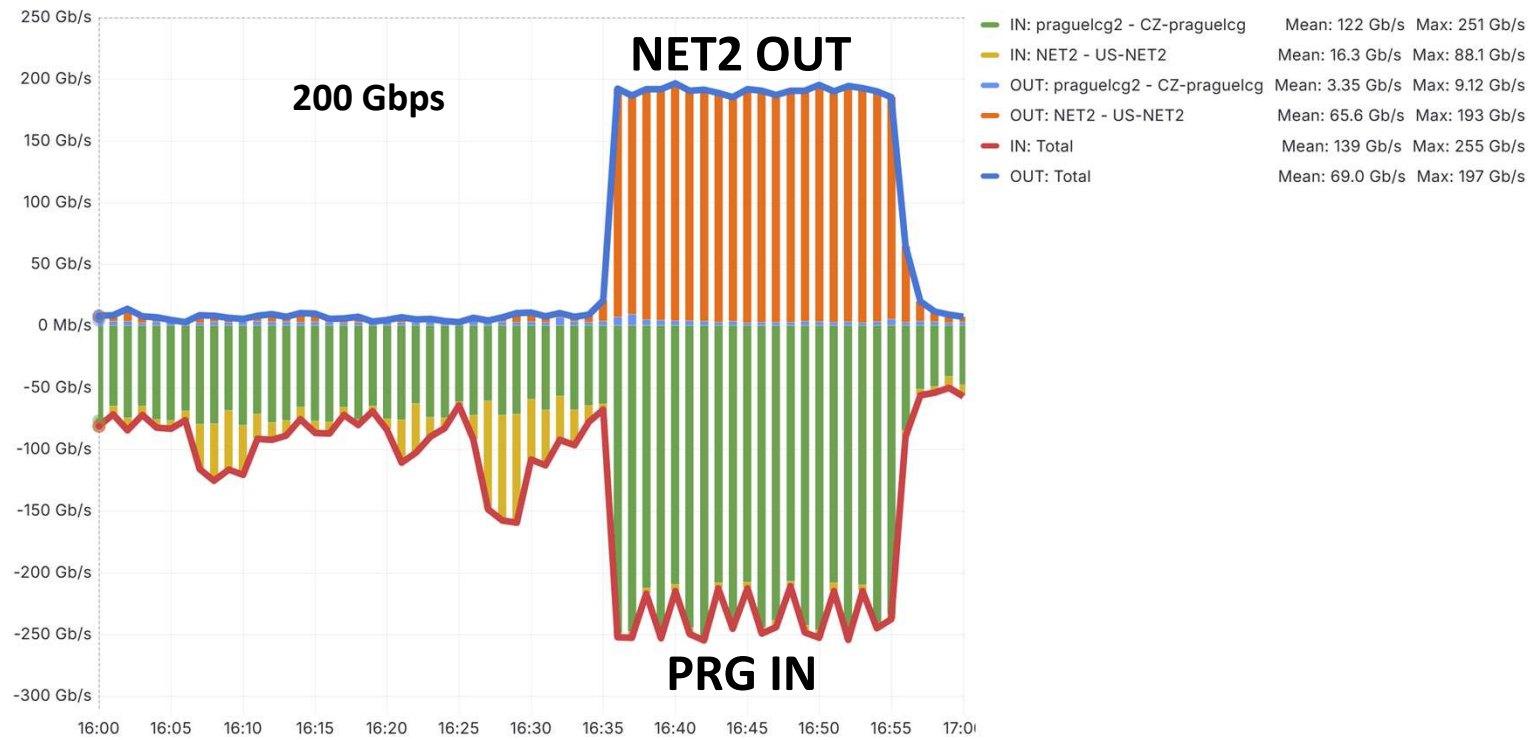
rt0.pra.cz - traffic - lag-20.111 - CESNET-AP1-LHCONE (GS-00813)



GEANT monitoring, červen – červenec 2025

NET2 -> PRG

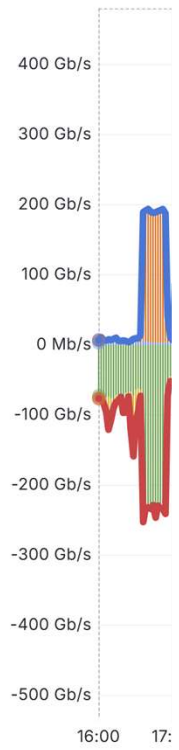
WLCG Site Network Input/Output



NET2 -> PRG

WLCG Site Network Input/Output

200 Gbps



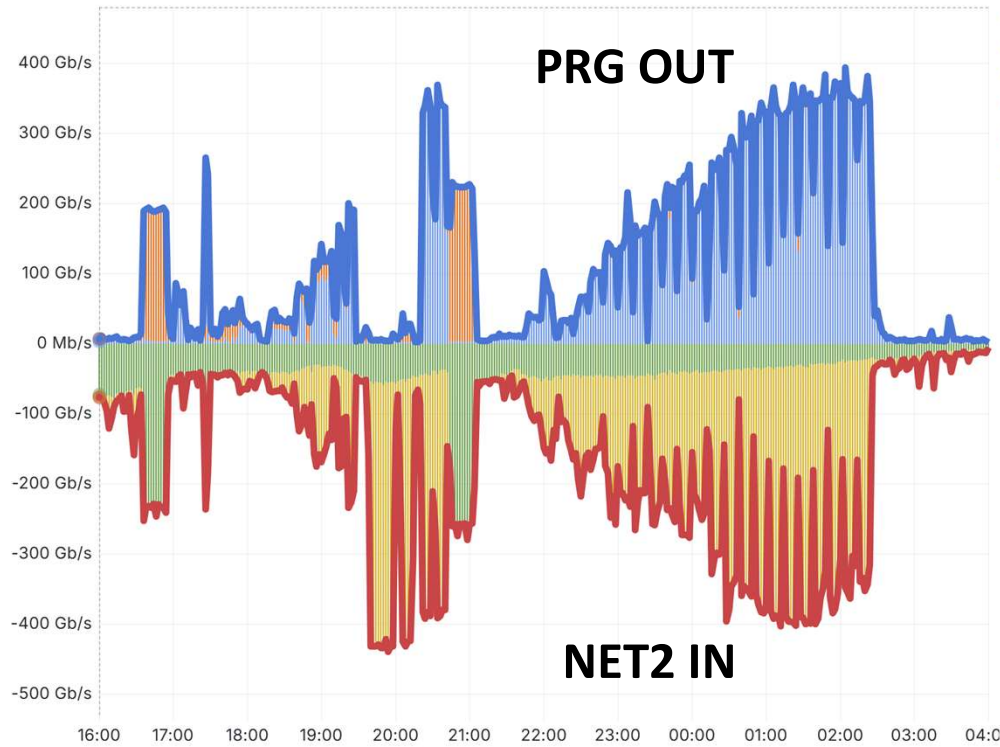
PRG -> NET2

WLCG Site Network Input/Output



400 Gbps

200 Gbps



IN: prague1cg2 - CZ-prague1cg	Mean: 52.0 Gb/s	Max: 278 Gb/s
IN: NET2 - US-NET2	Mean: 120 Gb/s	Max: 384 Gb/s
OUT: prague1cg2 - CZ-prague1cg	Mean: 95.1 Gb/s	Max: 390 Gb/s
OUT: NET2 - US-NET2	Mean: 20.3 Gb/s	Max: 260 Gb/s
IN: Total	Mean: 172 Gb/s	Max: 440 Gb/s
OUT: Total	Mean: 115 Gb/s	Max: 394 Gb/s

390 Gbps

Otevřené problémy a závěry

IPv6 migrace ve WLCG je dobrá případová studie pro každou velkou distribuovanou infrastrukturu.

Legacy software (implicitně očekává IPv4).
HPC a specializovaný hardware bez plné IPv6 podpory (např. některé gateway / storage cesty).
Residual IPv4 mezi dual-stack endpointy – bez monitoringu se špatně vysvětluje.

Dual-stack je mezikrok, ne cílový stav.
Nejdřív je potřeba viditelnost: monitoring, blackout testy, packet marking.
Nejde jen o síť: změna zasahuje storage, middleware, authn/authz i provozní procesy.

Take-away

LS3 je příležitost pro radikálnější změny