



Þráðlaus fjarskipti í hröðunarmælingum í byggð: Reynsla, áskoranir og þróun

Dr. Benedikt Halldórsson

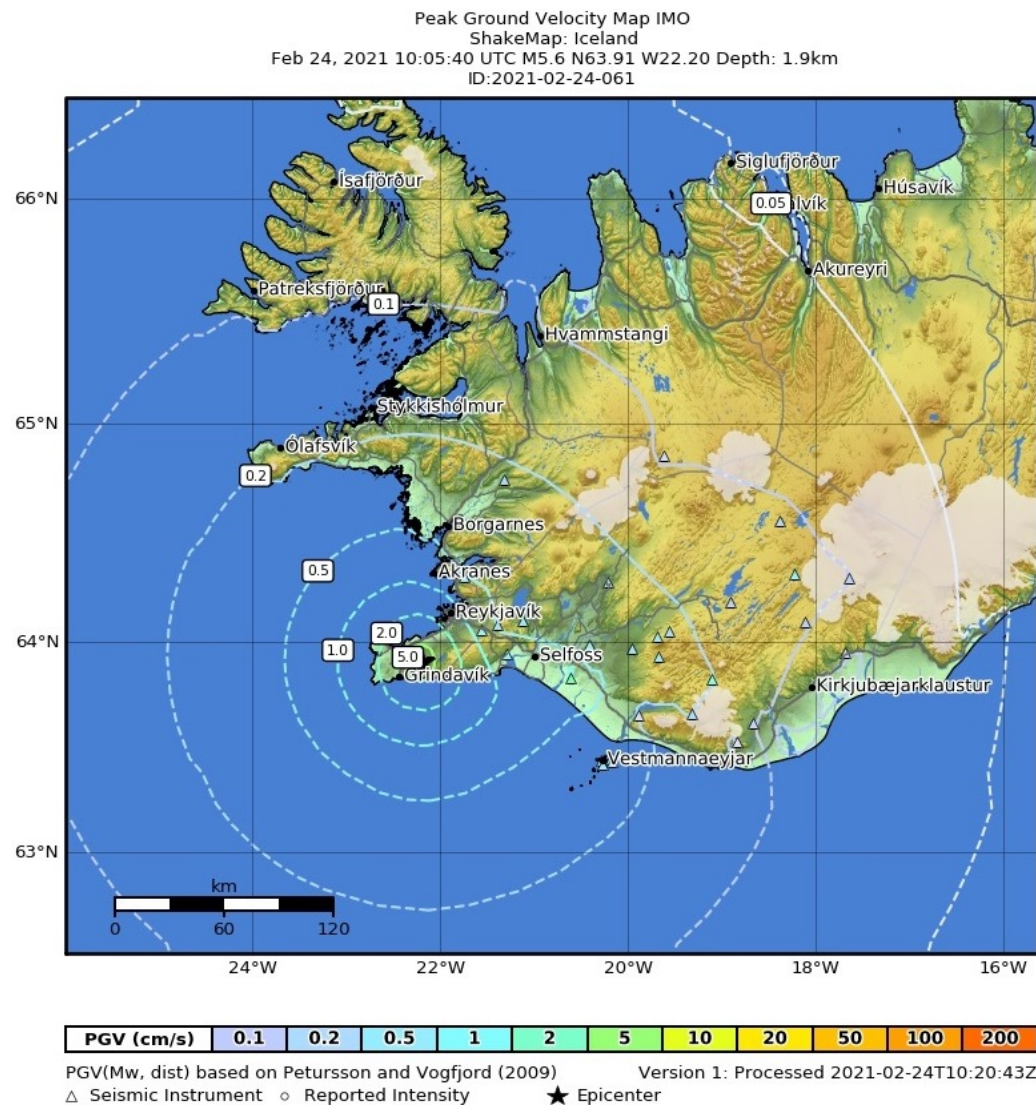
- Rannsóknarprófessor við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands
- Sérfræðingur í jarðskjálftafræði og jarðskjálftaverkfræði við Veðurstofu Íslands

HÁDEGISFUNDUR SKÝ – GRAND HOTEL, REYKJAVÍK – 23. NÓVEMBER 2023

Hvað er jarðskjálfti?

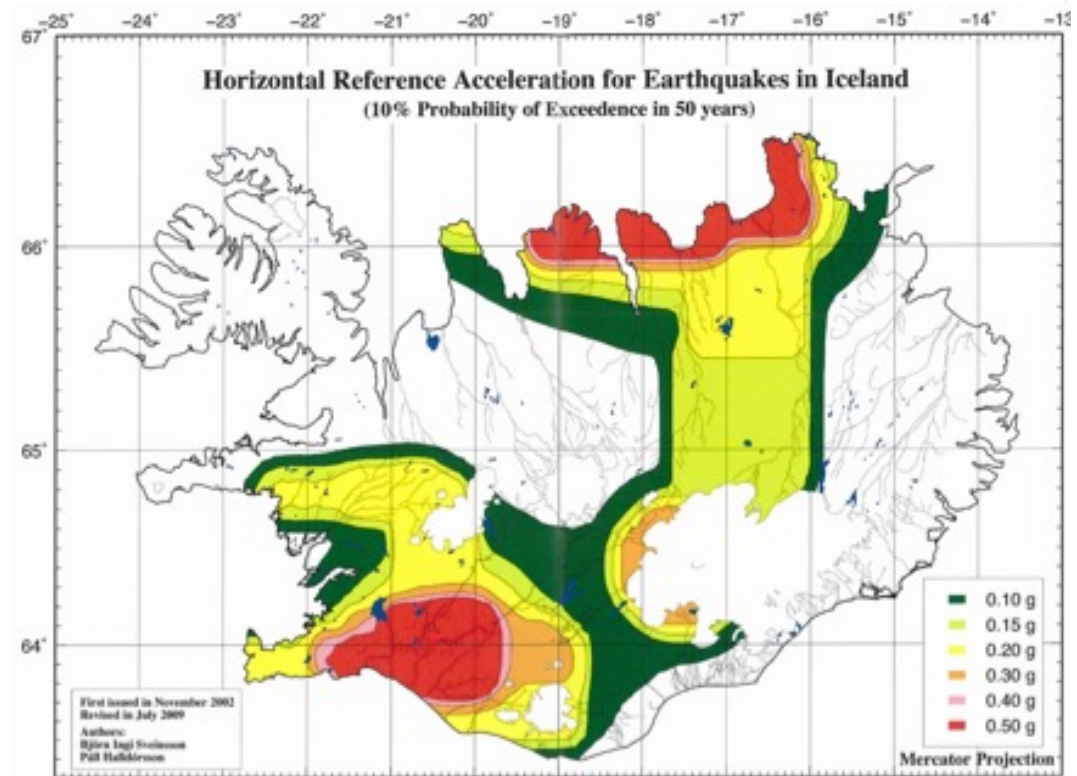
- Jarðskjálfti er það þegar þegar hluti hinnar stökku jarðskorpu hrekkur til svo skyndilega að hún býr til bylgjur sem ferðast frá upptökum jarðskjálftans
- „Jarðskjálfti“ er einnig hristingurinn sem við upplifum af þessum sökum,
 - Nánar tiltekið, þá upplifir fólk hristinginn sem er hreyfing yfirborðs jarðar vegna þess að jarðskjálftabylgjurnar fara framhjá
 - Fólk á efri hæðum í byggingum upplifir líka „jarðskjálfta“, en í raun sveiflast fólk með byggingunni
- Í grunnatriðum má lýsa hreyfingu sem
 - færslu, hraða og/eða **hröðun**, eða $u(x, t)$, $\dot{u}(x, t)$, $\ddot{u}(x, t)$
 - **Hröðun** er semsagt breyting á hraða
 - Fólk skynjar **hröðun**

Dr. Benedikt Halldórsson, 2022



Hvað eru hröðunarmælingar?

- **Hröðun** í jarðskjálftum
 - **Hröðun** yfirborðs jarðar, yfirborðshreyfing, hristingur, jarðskjálfti
 - **Hröðun** mannvirkja sem sveiflast til vegna jarðskjálfta
 - **Hröðun** í tæknibúnaði í mannvirkjum
- Jarðskjálftaverkfræðingar mæla **hröðun** því ...
 - ...hámarkskraftur sem mannvirki þarf að þola er jafn massa byggingarinnar margfölduð með hámarks**hröðun**
 - $F = m \cdot \ddot{u} \rightarrow$ kraftur er massi sinnum **hröðun** (2. lögmál Newtons)
- Íslandskort af væntanlegri hámarks**hröðun** er grunnforsenda í mannvirkjahönnun fyrir jarðskjálftaálagi
 - Þjóðarskiptal Íslands fyrir Eurocode 8



Hröðunarkort af Íslandi

Af hverju eru hröðunarmælingar í byggð?



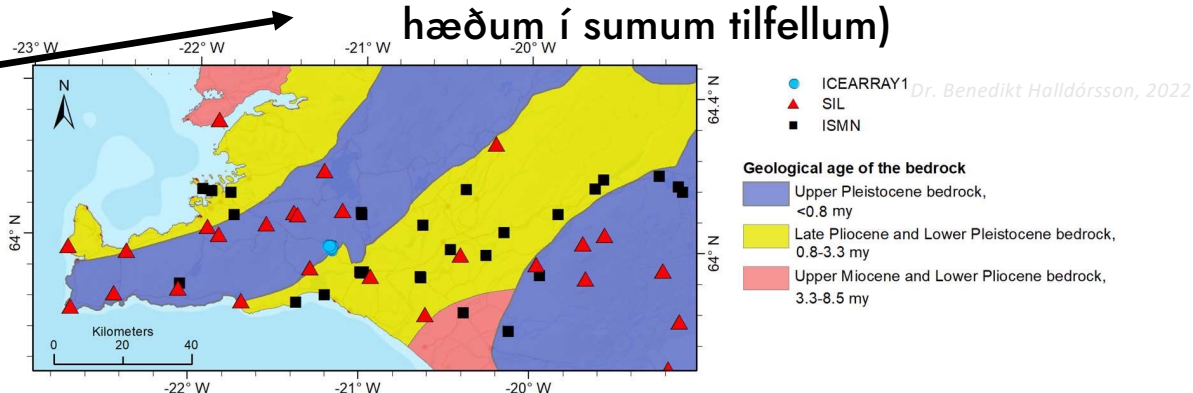
▲ Jarðskálftafræði

- Viðfangsefni er jarðskjálftinn: stærð, staðsetning og eigindir hans
- Afar næmir mælar, nema minnstu hreyfingar, en mettað við miklar hreyfingar
- Mæla yfirborðshreyfingu í formi hraða
- Mælarnir staðsettir í óbyggðum
- Fjarri manngerðum truflunum
- Grafir niður í hvelfingar til að lágmarka umhverfisáhrif
- Grafir niður í hart berg

Fagsviðið Engineering
Seismology sameinar þessi svið
(tæknileg jarðskálftafræði /
jarðskjálftasinnuð verkfræði)

■ Jarðskjálftaverkfræði

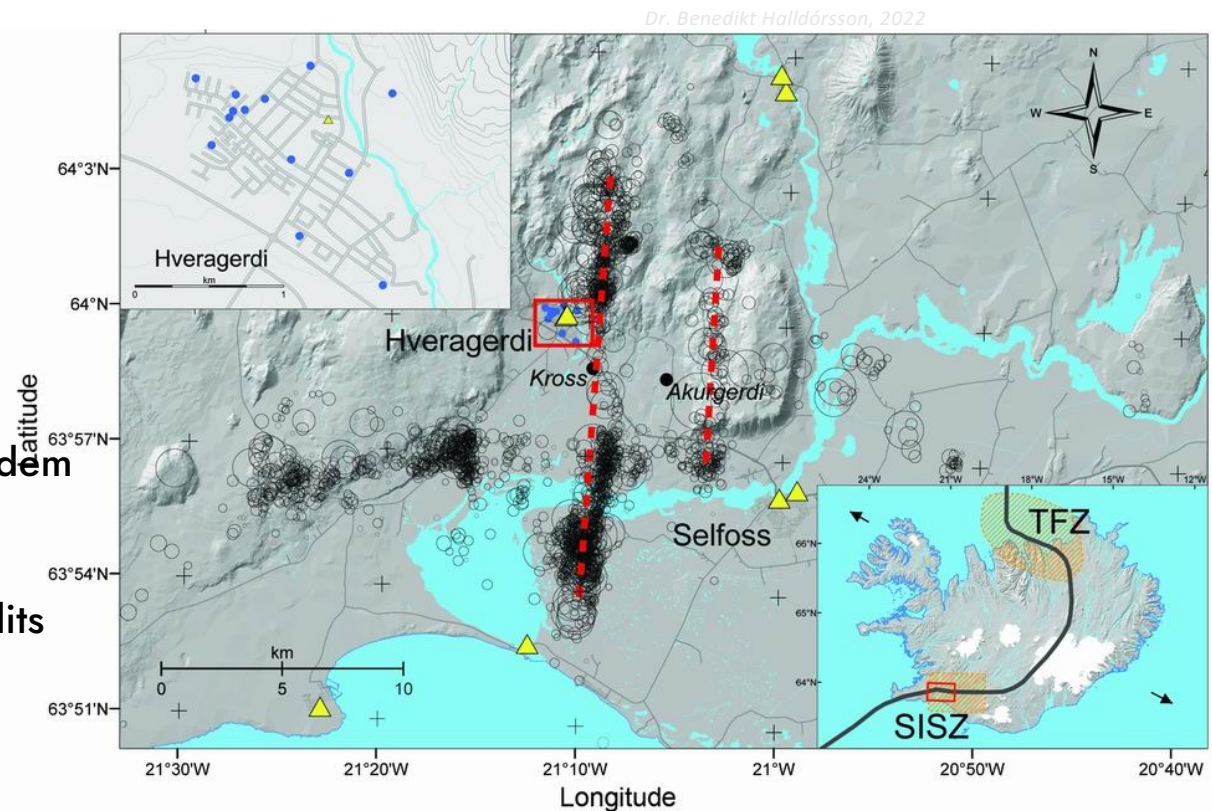
- Viðfangsefni er hristingurinn: stærð og eigindir yfirborðshreyfingar undir mannvirkjum
- Ónæmir mælar fyrir litlum hreyfingum, en mæla allar stórar hreyfingar
- Mæla yfirborðshreyfingu í formi hröðunar
- Mælarnir staðsettir í byggingum m.ö.o., þar sem fólk býr
- Mælar í kjöllum húsa (einnig á efstu hæðum í sumum tilfellum)



ICEARRAY 1 í Hveragerði – fyrsta mælafylki í byggð á Íslandi



- Uppsetning vorið 2007 (Evrópuverkefni)
- Tilgangur
 - Meta jarðskjálftahreyfingar í byggð
 - Meta eigindir jarðskjálftanna sjálfra
- 12 hröðunarmælar á 1.23 km² svæði innan Hveragerðis
 - Í kyndiklefum bygginganna(!)
- Mælar með LAN tenglum og útvær 2G módem veittu fjaraðgengi að mælunum
 - Nýlunda þá að hafa fullt aðgengi að mælunum yfir netið til stillinga og eftirlits
 - Stýring mæla á sér stað á farsímum og spjaldtölvum jafnt sem borðtölvum



Afstöðumynd af upptakasprungum jarðskjálftans í Ölfusi, 29. maí 2008 (rauðar stríkalínur). Hringirnir sýna staðsetningar og afstæðan stærðarmun eftirskjálfta. Gulir þríhyrningar, og bláir punktar sýna staðsetningar mælistöðva.

ICEARRAY 1 hröðunarmælar

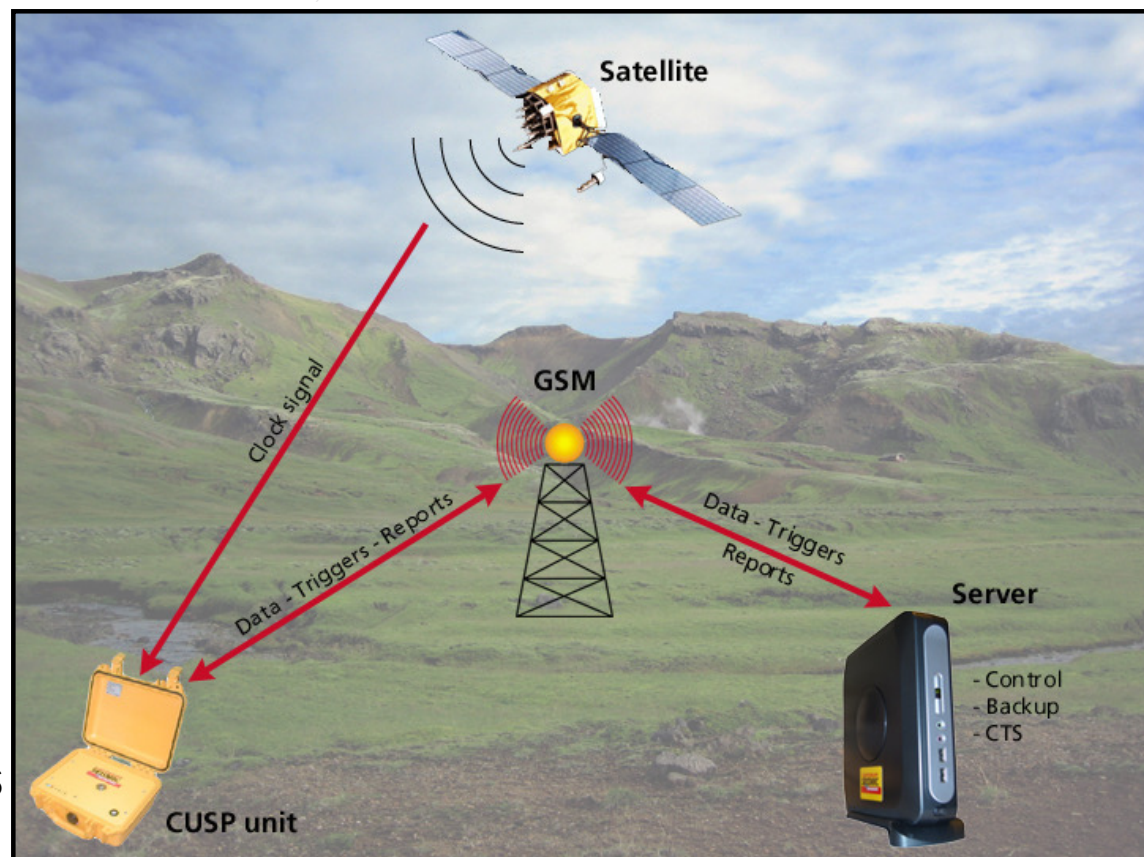
- CUSP-3C1p strong-motion accelerograph
 - Canterbury Seismic Instruments Ltd., New Zealand
 - Ný tækni (þá): micro-electro-mechanical (MEM) hröðunarnemar
 - Þrír þverstæðir og næmir nemar ($\sim 70 \mu\text{g rms}$) en með hátt mælisvið ($\pm 2.5 \text{ g}$)
 - Yfirfærslufallið er flatt yfir stórt tíðnisvið (0–80 Hz, 200 Hz söfnunartíðni)
 - Nákvæm samfelld tímamæling (GPS)
 - Með buffer sem metur langtímameðalútslag ($\sim 10\text{--}60 \text{ s}$) vs. skammtímaútslag ($\sim 1\text{--}2 \text{ s}$). Vistar mælingu á SD kort fari hlutfallið yfir ákv. gildi
 - Low-power, en í sambandi við 240 V með varaafli (40 Ah rafgeymi)



ICEARRAY 1 í Hveragerði

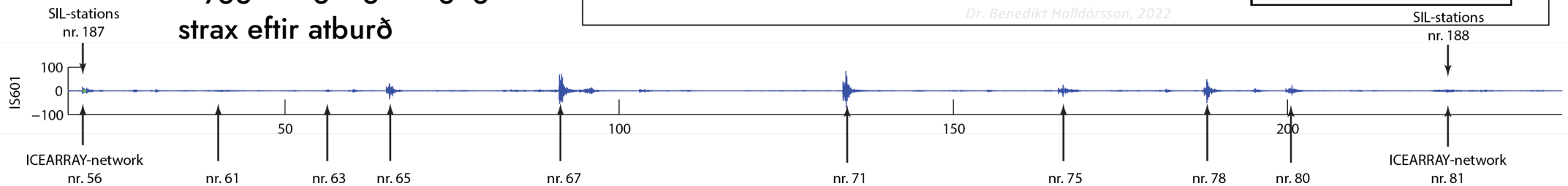
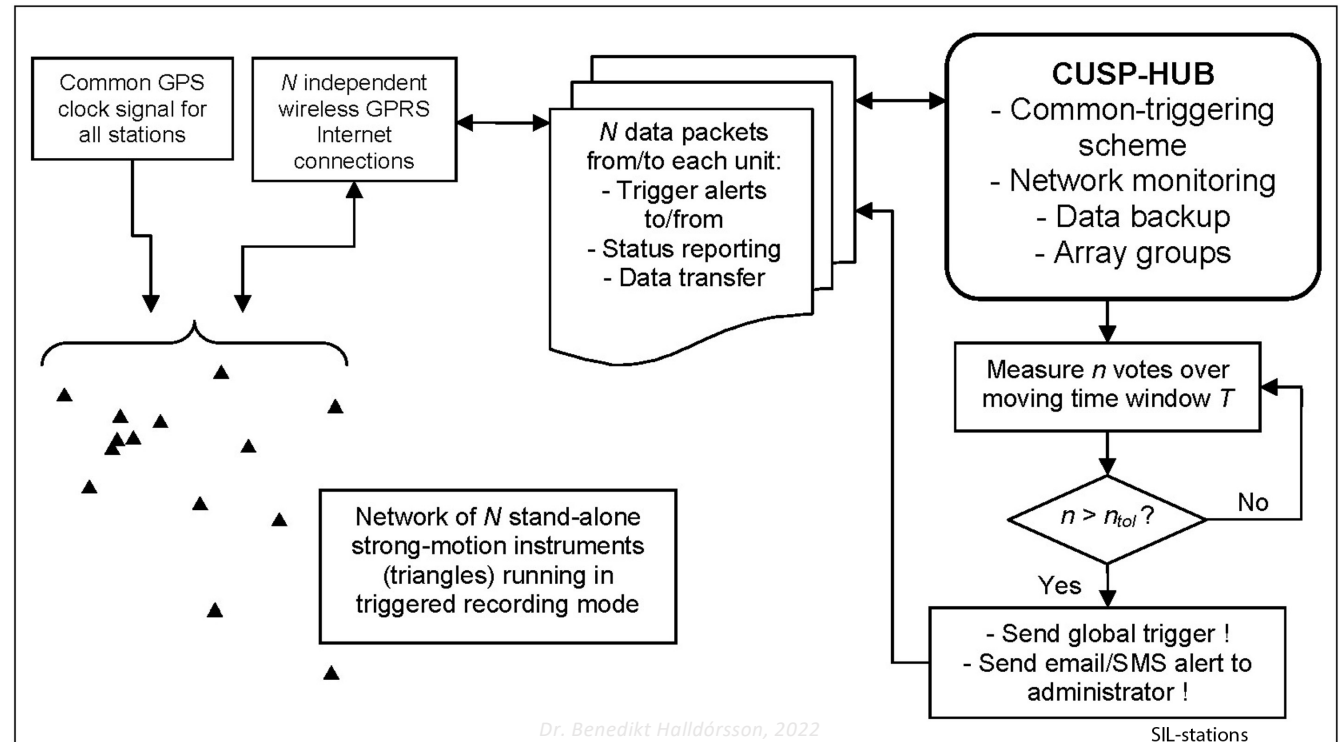
- Áskorun:
 - Manngerður umgangur misjafn innan bæjarins eftir staðsetningu og tíma dags
 - Smáskjálftar (M2-3) á svæðinu skráðust ekki á allar stöðvar innan Hveragerðis(!)
- Markmið: Fá mælingu í smáskjálftum á allar mælistöðvar innan Hveragerðis
 - Allir mælar innan Hveragerðis stilltir eins
- Lausnin: Common Triggering Scheme (CTS)
 - Prótótýpa af CTS server búin til í samstarfi HÍ og Nýsjálendinga
 - Byggir á samfelldri nettengingu
 - Virkaði vel, þrátt fyrir bara 2G/GPRS

Dr. Benedikt Halldórsson, 2022



ICEARRAY 1 - Common Triggering Scheme

- Þegar 2+ mælar "vakna" og skrá mælingu, þá eru allir mælar "vaktir" – til öryggis
- Þegar mælingu er lokið, eru gögnin send yfir á CTS serverinn
- Kostir
 - Hámarkar nýtingu mæla
 - Lágmarkar yfirferð sérfræðings í hvert sinn
 - Tryggir skráningu yfirborðshreyfingarinnar yfir allt svæðið
 - Tryggir aðgengi að gögnum strax eftir atburð



ICEARRAY 1 í Hveragerði

- Common Triggering Scheme krafðist uppsetningar á nýju Access Protocol Network: earthquake.hi.is, hjá Símanum, árið 2007
- Sérstakur samningur um þráðlaus fjarskipti í jarðskjálftamælingum gerður árið 2007 á milli jarðskjálftamiðstöðvar Háskólans og Símans
 - Öll SIM kort með fasta IP-tolu
 - Mánaðarlegt gjald fyrir gagnamagn og SIM kort
- 2G/GPRS fjarsímakerfið í upphafi
 - Gagnamagnið var að hámarki 15 MB/mán/kort
 - Stöðvar sendu afrit af hverri mælingu á CTS serverinn
 - Sumar stöðvar fóru oft mikið yfir þetta hámark
- 3G/4G fjarsímakerfið tók síðar við
 - Gagnamagnið jókst sjálfkrafa í 500 MB/mán/kort
 - Ekki þörf fyrir þetta gagnamagn alla jafna, nema um jarðskjálftahrinur væri að ræða
 - Gagnamagnið fór þá jafnan yfir lágmarkið
- Síðar tóku "gagnafötur" við í stað gagnamagns per kort, sem var mikill kostur

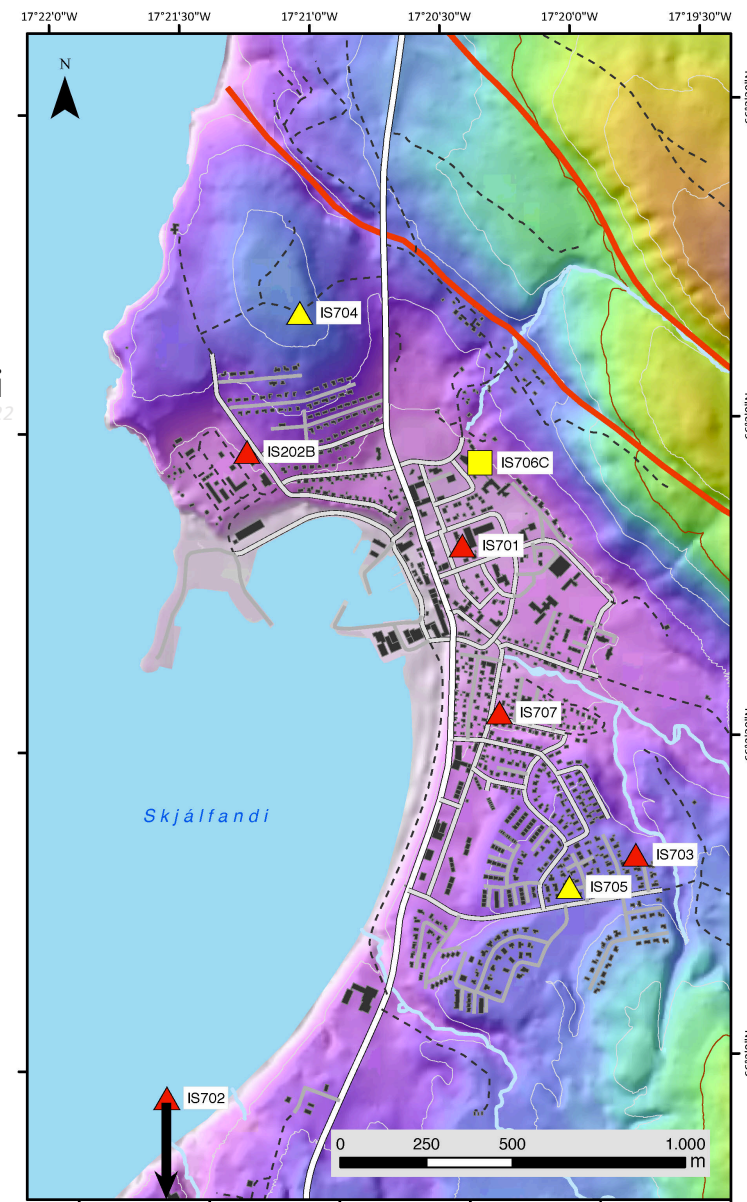


Dr. Benedikt Halldórsson, 2022

ICEARRAY 2 á Húsavík

- CUSP-3X MEM hröðunarmælar – ný kynslóð mæla
- Settir upp 2011-2012
 - Veturinn á eftir varð stærsta jarðskjálftahrina úti fyrir Norðurlandi síðan frá Kröflueldum 1975-1984
- Sjö hröðunarmælar í kjöllum bygginga
- GPS mælir á þremur þessara mælistaða
- Þrír mælar í sjúkrahúsinu á Húsavík (kjallari, og 2x á efstu hæð)
- Fjarskipti:
 - Mælar í sjúkrahúsinu tengdir við LAN hússins
 - Aðrir á 3G módemum, síðar á 4G módemum endurræstir daglega
- Mælafylkið vaktað af CTS-server
- Áskoranir:
 - Óstöðugt fjarskiptasamband (nema yfir LAN)
 - Mikil deyfing á merkinu inn í húsin, sérstaklega kjallara
 - Að koma loftneti út er erfitt, mikið rask og meiri deyfing í löngum kapli

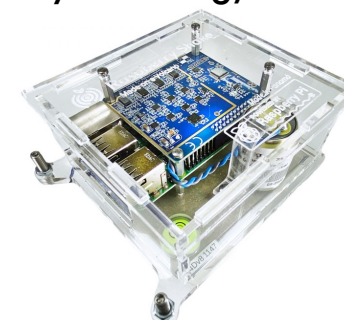
Dr. Benedikt Halldórsson, 2022



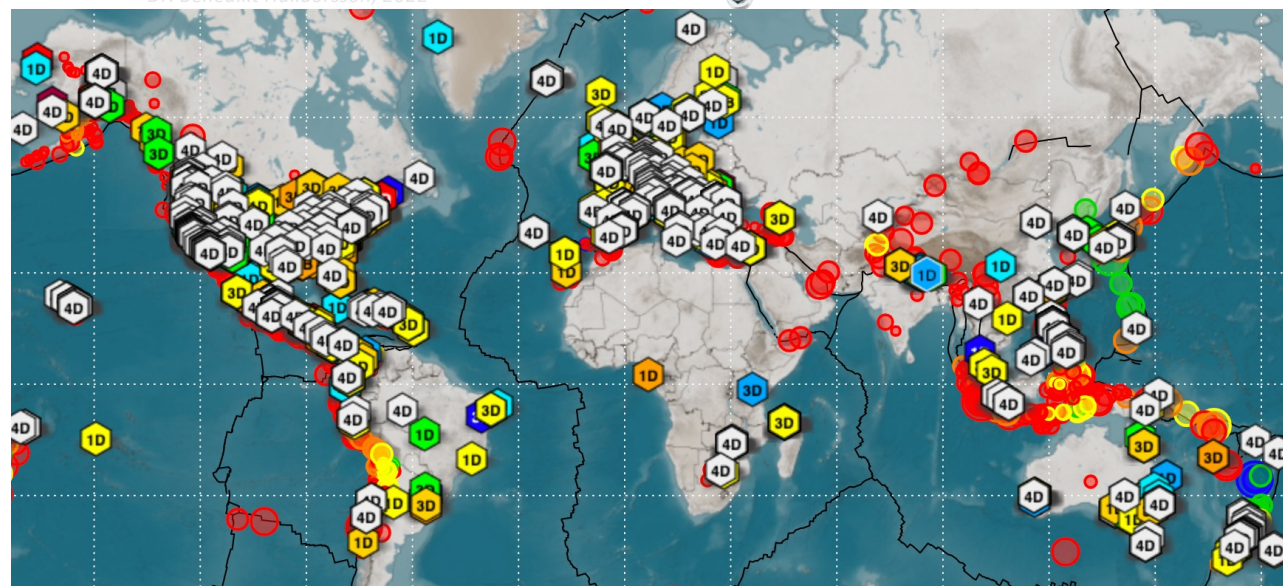
TURNkey Evrópuverkefnið 2019-2022



- Ný kynslóð hröðunarmæla, MEM-nemar á Raspberry Pi smátölvum (raspberrysake.org)
 - Raspberry Shake RS4D = bæði hraða- (1x) og hröðunarmælir (3x)
 - Í raun “Engineering Seismology Instrument”
 - Tengist yfir WiFi eða LAN
 - Crowd sourcing af yfirborðshreyfingum í passive mode: Streymir strax gögnum frá sér eftir tengingu
 - <https://shakenet.raspberrysake.org/>
- Active Mode, streymir gögnum til notanda
 - Í okkar tilfelli notum við SeisComP kerfið
 - Mest notaða umsýslu- og greiningarkerfi jarðskjálfta-gagna í heiminum
- Uppsetning mæla á Íslandi 2020-2021 var samvinnu-verkefni Háskóla Íslands, Símans, og Veðurstofu Íslands



Dr. Benedikt Halldórsson, 2022



RS4D hröðunar- og hraðamælanet á skjálftabeltum Íslands

- Kostir við RS4D Raspberry Shake mæla
 - Ódýrir, ca. \$500-800 stykkið (ca. 5-10x ódýrari en gömlu mælarnir voru)
 - Lágspenna (5 V, 2.4 A)
 - Lítil orkunotkun (2.4 W)
 - Uppsetning innandyra er afar einföld
 - Ekki utandyra, en lausnir vel þekktar
 - Mælir afar stóran hluta bylgjusviðs jarðskjálfta
 - 1x hraðamælir, afar næmur
 - 3x hröðunarmælar, mæla allar stærstu hreyfingar
 - Í TURNkey verkefninu var RS4D stýrikerfið uppfært til að leyfa tengingar annarra mæla við RS4D (s.s., GPS mæli) → fjölmælitæki
- Aðalbreytingin var að fara úr *stopulum skráningum gagna og þráðlausum flutiningi þeirra*, yfir í samfellda skráningu og streymi gagna!
- Með nýjum aðferðum og nýjum tækjum fylgja alltaf áskoranir



Dr. Benedikt Halldórsson, 2022



Fjarskiptalausnir Símans í TURNkey

Dr. Benedikt Halldórsson, 2022

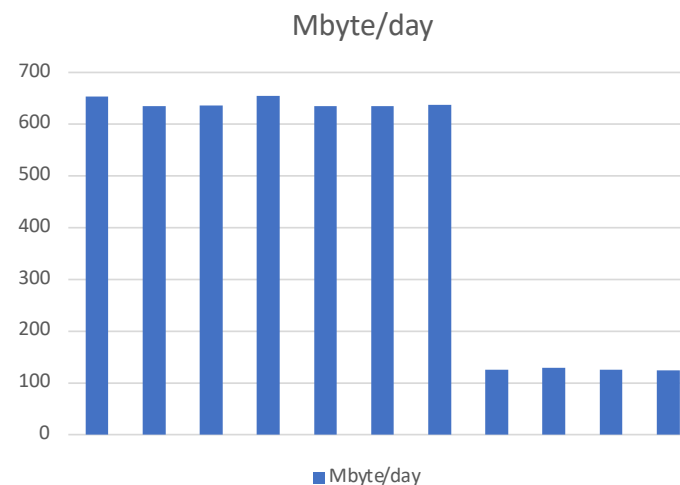
- Þráðlaus fjarskipti eru forsenda nútíma eftirlits með jarðskjálftahreyfingum
 - Áreiðanleiki og bandbreidd eru lykilatriði
 - Hraði gagnaflutnings og lágmarks latency einnig
- ➔ Síminn var þátttakandi í TURNkey verkefninu frá upphafi
 - 4G og LTE-M uppfylltu allar kröfur fyrir bandbreidd, latency
- Áreiðanleiki og töf í gagnaflutningi þráðlausra fjarskipta
 - Nýtt fjarskiptaloftnet sett upp á Suðurlandi til að bæta dreifikerfið
 - 4G, LTE-M og IoT staðlar
 - Nýr 4G búnaður á fimm stöðum á Suðurlandi
 - Áreiðanleikinn kemur betur í ljós í næsta stórskjálfta



Fjarskiptalausnir Símans í TURNkey



- Áskorun: Aukning í gagnamagni
 - Mælingar Símans sýndu að einn mælir þurfti ~20 GB/mán m.v. 100 Hz söfnunartíðni
 - Í TURNkey var stýrikerfi RS4D mælanna uppfært og Common Acquisition Protocol System var innleitt
 - Leiddi til 4-5x minni þörf á gagnamagni!
- Áskorun: Deyfing merkis á mælum í kjöllum í byggð
 - Mælar í kjöllum erfiðir í rekstri
 - Prófanir Símans á ýmsum búnaði leiddu til kaupa á breiðbands routerum fyrir mælana
 - Síminn stillti sendi á Húsavík til að nota einnig 700 MHz tíðni á LTE-M staðli
 - Mun meiri stöðugleiki í uptime mæla á erfiðum stöðum í byggingum!



Fjölmargar áskoranir, t.d. mikil þörf á gagnamagni í upphafi

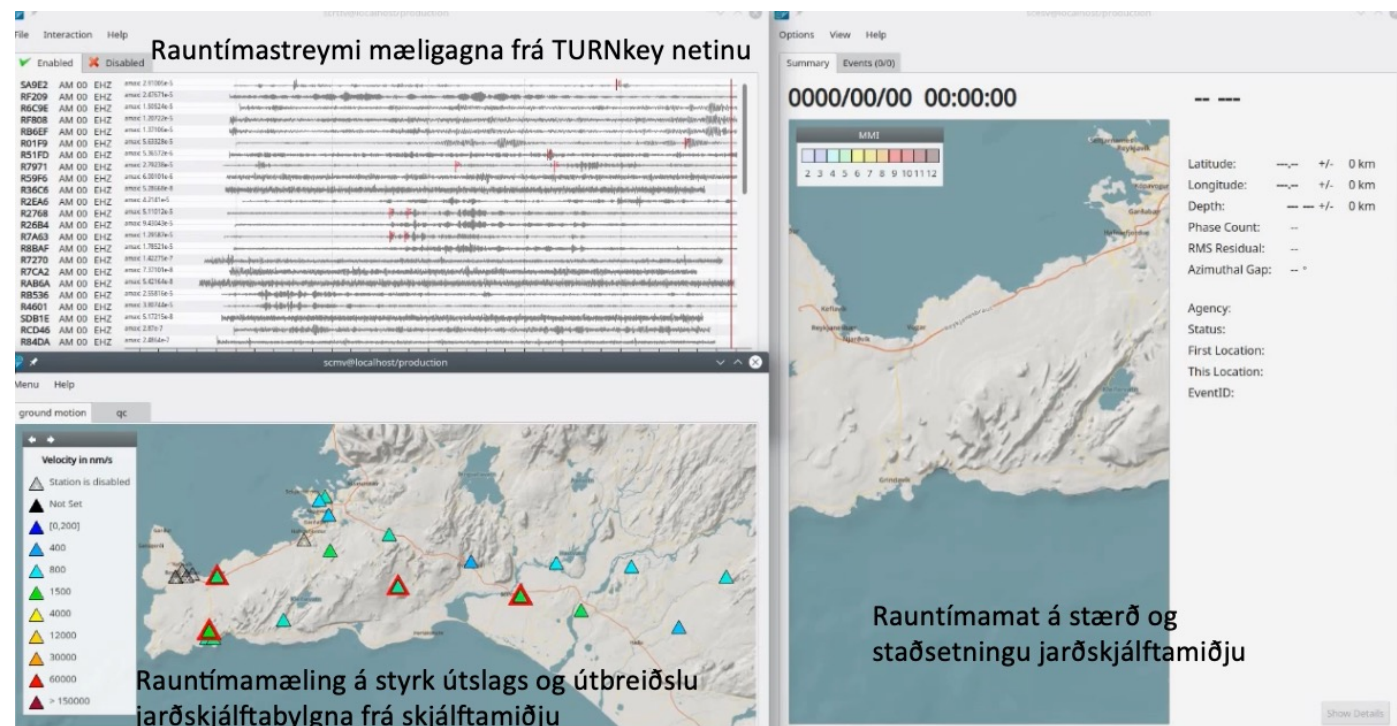
Dr. Benedikt Halldórsson, 2022

- Heildstæð samtenging:

1. Nýrrar kynslóðar mælitækni með samfelldri skráningu
2. Skilvirkra þráðlausra fjarskipta, samskiptastaðla og gagnaflutnings
3. Skilvirks gagnageymslu-, úrvinnslukerfi og greiningarkerfis

- Með þessu færst afar hröð greining á jarðskjálftanum sjálfum og væntanlegum áhrifum hans

SeisComP-sýn á M_w 5.4 jarðskjálftann þann 14/3/2021@14:15, 6 km frá Grindavík
– síðasti miðlungsstóri skjálftinn fyrir gosið í Fagradalsfjalli



Samantekt

- Mat á áhrifum jarðskjálfta á samfélagið og hið manngerða umhverfi byggist á hröðunarmælingum
- Áreiðanleg og hröð þráðlaus fjarskipti eru forsenda rauntímamats á eigindum jarðskjálfta og áhrifum þeirra
- Nýjasta þróunarverkefnið hefur litið heildstætt á alla grunnþættina:
 - Ný tegund mælitækni og samfelld skráning yfirborðshreyfinga
 - Áreiðanlegur og þráðlaus rauntímaflutningur mælinga
 - Rauntímagreining á mælingu og mat á áhrifum
 - Rauntímaskil á upplýsingum
- Lykilatriði að vera í samstarfi við fjarskiptafyrirtæki
- Næstu skref:
 - Koma ofangreindu ferli á viðvarandi rekstrarform
 - Fjölga mælafylkjum í mörkinni
 - Fjölga hröðunarmælum í byggð og einfalda uppsetningu þeirra
 - Frumgerð nýrra mæla er í prófun – samstarf með OSOP í Panama (Raspberry Shake) og Gempa í Þýskalandi (SeisComP)