

DCS KONTROLIRANA KOPIJA

Dokument je kontrolirana kopija veljavnega dokumenta v DCS. Kontrolirane kopije so namenjene distribuciji zunanjim deležnikom.

Številka kontrolirane kopije: 2024-127

Naročnik kontrolirane kopije: Aleš Jamšek

Datum izpisa kontrolirane kopije: 24. 10. 2024

Razlog izpisa kontrolirane kopije: Objava na spletni strani JEK2.si

Prejemnik kontrolirane kopije: GORAZD SLAK, SEKTOR ZA KOMUNICIRANJE IN TRAJNOST

Način pošiljanja: Elektronsko

Naslov dokumenta: Razširjen povzetek verjetnostne analize potresne nevarnosti za lokacijo JEK2

Revizija dokumenta: 0

Id dokumenta: DCSDOC-800795744-2205

Kontrolirano kopijo odobril: Robert Bergant

Datum odobritve kontrolirane kopije: 24. 10. 2024

Naša oznaka dokumenta: PA2024-012

Razširjen povzetek verjetnostne analize potresne nevarnosti za lokacijo JEK2

Rev.0

Naročnik: GEN energija d.o.o.

Št. pogodbe: 403-2/2024-71

Ozn. dokumenta: RP-PSHA-JEK2-R0

Izvajalec: Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Enota: Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR)

Vodja IKPIRa: Prof. dr. Tatjana Isaković

Vodja projekta: Matjaž Dolšek

Izvajalci: Matjaž Dolšek

Ljubljana, 24. 10. 2024

1. Povzetek

Območje Slovenije je potresno aktivno, zato je nujno, da so jedrski objekti potresno odporni. Varnost jedrskih elektrarn se mora dokazovati tudi z analizo potresnega tveganja, ki je sestavni del preverjanja varnosti jedrskih elektrarn v smislu zanesljivosti. Ciljna zanesljivost jedrskih elektrarn je v Sloveniji predpisana z Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji ter na tej osnovi določeno Prilogo 1 Pravilnika o dejavnikih sevalne in jedrske varnosti. Da bi lahko izvedli postopke potresno odpornega projektiranja in analize potresnega tveganja jedrskih objektov, je predhodno potrebno izvesti verjetnostno analizo potresne nevarnosti (PSHA). Analiza potresne nevarnosti vključuje model potresnih izvorov, model gibanja tal in model potresnega odziva lokalnih tal. Ti modeli se povežejo z metodami verjetnostne analize, da se izračuna verjetnost ali srednja (povprečna) letna povratna doba prekoračitve intenzitete gibanja tal na lokaciji objekta, kar se v splošnem odraža s krivuljo potresne nevarnosti za različne vrste pospeškov (npr. maksimalni pospešek tal, spektralni pospešek pri izbranem nihajnem času). Pri vseh modelih je treba upoštevati vplive negotovosti, ki se ločijo na aleatorno variabilnost (naključna narava potresov) in epistemično negotovost (pomanjkanje podatkov, omejeno razumevanje problema, če ga je možno izboljšati z več raziskavami). Poenostavljeno povedano, z modelom potresnih izvorov se lahko simulira pojav potresov v smislu magnitude, epicentra in drugih lastnosti. Model gibanja tal se uporablja za napovedovanje pospeškov tal na trdnih tleh, ti pospeški pa se nato korigirajo za površje s pomočjo analize potresnega odziva lokalnih tal, pri čemer se v vseh korakih PSHA ovrednotijo vplivi aleatorne variabilnosti in epistemične negotovosti.

Rezultati verjetnostne analize potresne nevarnosti se za dokazovanje potresne varnosti jedrskih objektov v Sloveniji uporabljajo že od leta 1994 (PSHA, 1994), ko je bila pripravljena prva tovrstna študija za lokacijo Nuklearne elektrarne Krško (NEK). Trenutno veljavna PSHA za NEK (PSHA, 2004) je bila izdelana s strani treh skupin strokovnjakov iz Slovenije, Hrvaške in ZDA, ki so razvile svoje modele potresnih izvorov. Srednji maksimalni pospešek tal (PGA) za referenčna trdna tla pri srednji povratni dobi 10.000 let je znašal približno 0,48 g, z mejnima vrednostma 0,39 g in 0,59 g. Povprečna mediana PGA za referenčna trdna tla je bila 0,47 g, na površju pa 0,56 g.

Projekt PSHA za JEK2 se je začel leta 2015 (12/2024) pod okriljem GEN energije. V prvi fazi projekta sta projekt izvajala podjetje RIZZO International Inc. (RIZZO) in Geološki zavod Slovenije (GeoZS). Prva faza projekta, zaključena leta 2018, je obsegala obsežno preliminarno poročilo PSHA Rev.0, ki brez prilog šteje več kot 800 strani.

V drugi fazi projekta je potekala neodvisna revizija, ki jo je vodila Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (FGG) v sodelovanju z N. A. Abrahamsonom (NAA) iz ZDA in Agencijo Republike Slovenije za okolje (ARSO). V letu 2020 so bila pripravljena tri neodvisna poročila, ki so vsebovala predloge za 32 popravkov, predvsem v zvezi z modelom gibanja tal in potresno analizo tal.

V drugi fazi projekta, med letoma 2019 in 2021, je bil razvit in neodvisno revidiran tudi neergodičen model gibanja tal za lokacijo JEK2 (Abrahamson et al. 2021). Prednost neergodičnega modela v primerjavi s konvencionalnimi modeli gibanja tal je v tem, da neergodičen model upošteva regionalne lastnosti potresov pri modeliranju gibanja tal na izbrani lokaciji, kar je bilo upoštevano z zapisi gibanja tal lokalnih potresov na območju jugo-vzhodne Slovenije, ki jih je prispeval ARSO. Neergodičen model gibanja tal za lokacijo JEK2 bo predstavljen kot referenčni neergodičen model za lokacijo jedrskih elektrarn v tehničnem dokumentu IAEA, ki bo predvidoma javno objavljen konec leta 2024 oziroma v začetku leta 2025.

Prva in druga faza projekta sta zaključeni. Tretja faza projekta se je začela leta 2022 in je bila razdeljena v tri naloge. Prva in druga naloga tretje faze projekta sta zaključeni, tretja naloga, ki obsega pripravo poročila PSHA pa je v zaključni fazi. Novembra 2023 so izvajalci študije (RIZZO/GeoZS/NAA) izdali preliminarno poročilo PSHA Revizija 1. Rezultati analize potresne nevarnosti so bili precej podobni tistim iz leta 2004. V tretji fazi projekta se vrši tudi neodvisna revizija. Preliminarno poročilo PSHA Revizija 1 sta pregledovali dve neodvisni revizijski skupini. Obe skupini vodi FGG. Revizijska skupina FGG/ARSO je sproti preverjala izvajanje predlogov za popravke iz druge faze projekta in potrdila preliminarne izračune PSHA. Osnovno preliminarno revizijsko poročilo skupaj je skupaj s prilogami obsegalo 411 strani. Mednarodna neodvisna revizijska skupina, ki jo tvori FGG in Lettis Consultants International iz ZDA (LCI), pa je predlagala več različnih popravkov modela potresnih izvorov, kar je dokumentirala v poročilu, ki obsega 63 strani. Predlagan je bil ponovni razmislek glede modeliranja aktivnih prelomov in pripadajočih maksimalnih magnitud, še posebej tistih, ki pomembno vplivajo na potresno nevarnost lokacije. Predlagana je bila opustitev modeliranja verjetnosti obstoja aktivnih potresnih prelomov, popravek modela aseizmičnega zdrs, razmislek glede ustreznosti modela pogostosti potresov na aktivnih prelomih in ponovno ovrednotenje zdrs na letni ravni za nekatere aktivne prelome. Zaradi teh predlogov je bilo odločeno, da se pripravi nova verzija PSHA, kar je terjalo tudi nov izračun rezultatov PSHA.

Izvajalec je že predložil v pregled prva štiri poglavja od osmih poglavij preliminarne poročila PSHA Revizije 2. PSHA, Revizija 2, vključuje spremembe predvsem v modelu potresnih izvorov. Dva modela potresnih izvorov predhodne različice PSHA, ki nista vključevala aktivnih prelomov, sta bila zamenjana z modeloma, ki upoštevata morebitno prisotnost slepih prelomov, ki jih ni mogoče oceniti na podlagi površinskih geoloških struktur. Izvajalci študije so opravili tudi številne popravke pri modeliranju aktivnih prelomov. Opuščen je bil prelom Orlica 2, dodan pa je bil nov potencialni prelom. Na novo so bili zasnovani scenariji prelomov. Poleg tega so bile maksimalne magnitudo prelomnih izvorov ponovno ovrednotene in so se večinoma povečale. Povečala se je tudi letna vrednost zdrs za prelome, k čemer je prispevalo tudi zmanjšanje aseizmičnega zdrs na prelomih.

Do sedaj so bili izvedeni tudi neodvisni izračuni preliminarne PSHA Revizije 2, vendar le za referenčna trdna tla za posamezne potresne izvore petih alternativnih modelov potresnih izvorov, pri čemer so se rezultati neodvisnega izračuna dobro ujemali z rezultati izvajalca.

Končnih rezultatov verjetnostne analize potresne nevarnosti še ni, vendar se predvideva, da bo izvajalec v roku dveh mesecev poslal preostala poglavja poročila PSHA v revizijo. Sledila bo revizija preostalih poglavij ter izdelava končnih neodvisnih strokovnih mnenj in neodvisnih izračunov verjetnostne analize potresne nevarnosti za lokacijo JEK2.

Rezultati verjetnostne analize potresne nevarnosti predstavljajo vhodni podatek za nadaljnje analize, s katerimi se dokazuje varnosti konstrukcij, sistemov in komponent jedrskih elektrarn. Za izpolnitev zakonsko predpisanih zahtev za varnost jedrskih in sevalnih objektov je nujno, da so konstrukcije, sistemi in komponente skrbno projektirani ter da se njihova varnost dokazuje z analizo potresnega tveganja. Ta analiza mora vključevati tudi intenzitete gibanja tal s precej daljšimi povratnimi dobami od 10.000 let in sicer zato, da se lahko ustrezno ovrednoti ciljno zanesljivost jedrskih elektrarn.

Ker bo, ne glede na končni rezultat PSHA, potresna nevarnost na lokaciji JEK2 relativno visoka, bo za to lokacijo treba precej pozornosti posvetiti skrbnemu projektiranju konstrukcij, sistemov in komponent, pomembnih za jedrsko varnost. Še bolj pomembna pa bo analiza potresnega tveganja, ki je sestavni del zagotavljanja potresne varnosti elektrarn, saj bo PSHA za lokacijo JEK2 temeljila na sodobnem

neergodičnem modelu gibanja tal, ki na nov način ovrednoti aleatorno variabilnost in epistemično negotovost intenzitete gibanja tal, kar se mora na konsistenten način odražati tudi pri analizi potresnega tveganja.

2. Uvod

V poročilu so na kratko predstavljeni verjetnostni analizi potresne nevarnosti za lokacijo Nuklearne elektrarne Krško (NEK) in projekt nove verjetnostne analize potresne nevarnosti za Jedrsko elektrarno Krško 2 (JEK2). Zaradi lažjega razumevanja in branja teksta poročila je za poimenovanje verjetnostne analize potresne nevarnosti uporabljena mednarodna uveljavljena kratica PSHA (angl. Probabilistic Seismic Hazard Analysis) ali zgolj analiza potresne nevarnosti. Verzije PSHA za NEK se ločijo po letnici, npr. PSHA 1994, PSHA 2004, preliminarne verzije nove PSHA pa z Revizijo 0, 1 in 2. Revizije poročil PSHA za JEK2 tudi niso vključene na spisek virov, saj predstavljajo zgolj vmesni rezultat študije.

V tretjem poglavju so opredeljeni pomeni pojmov potres, magnituda, model potresnih izvorov in model gibanja tal. Pojasnjene so osnovne mere za intenziteto gibanja tal, kot so maksimalni pospešek tal in spektralni (psevdo) pospeški, ki so rezultat analize potresne nevarnosti in se uporabljajo za nadaljnje analize. V poglavju so opisani tudi osnovni koraki analize potresne nevarnosti in način za ovrednotenje negotovosti. Posebej je izpostavljena razčlenitev negotovosti na aleatorno variabilnost, ki se nanaša na slučajnost potresnih pojavov in posledičnega gibanja tal, in epistemično negotovost, ki je posledica pomanjkanja podatkov ali omejenega poznavanja problematike. Pojasnjen je tudi postopek analize, ki zagotavlja kakovost rezultatov z ovrednotenjem "centra", "telesa" in "razpona" tehnično utemeljenih interpretacij. V zaključku poglavja so razloženi rezultati analize potresne nevarnosti in njihova uporaba pri potresnoodpornem projektiranju ter pri analizi potresnega tveganja za konstrukcije, sisteme in komponente jedrskih elektrarn.

Četrto poglavje je razdeljeno na tri podpoglavja. Podpoglavje 4.1 obravnava razvoj verjetnostne analize potresne nevarnosti med letoma 1994 in 2022, vse do izdaje preliminarne poročila PSHA Revizija 1. Na kratko sta predstavljeni prvi dve analizi potresne nevarnosti za NEK ter osnovni rezultati še vedno veljavne verjetnostne analize potresne nevarnosti iz leta 2004. Pojasnjen je tudi začetek nove verjetnostne analize potresne nevarnosti za JEK2, vključno z opisom prve faze projekta (2015–2018), v kateri je bila izvedena preliminarne PSHA, predstavljena v preliminarne poročilu PSHA, Revizija 0. Opisana je tudi druga faza projekta, ki je obsegala neodvisno revizijo PSHA in razvoj neergodičnega modela gibanja tal za jugovzhodno Slovenijo. Sledi še opis tretje faze projekta PSHA, predvsem naloge izvajalcev in revizijske skupine, ki so bile opravljene do izdaje poročila PSHA, Revizija 1.

Razvoj in opis nekaterih rezultatov neergodičnega modela gibanja tal so predstavljeni v podpoglavju 4.2. Ta model je nekoliko bolj podrobneje predstavljen kot ostali modeli, saj gre za prvi tovrstni model, ki je bil implementiran v analizo potresne nevarnosti za lokacijo jedrske elektrarne.

V podpoglavju 4.3 sledi predstavitev revizije preliminarne poročila PSHA, Revizija 1, v obdobju 2022–2024. Na kratko je opisana struktura preliminarne poročila PSHA, Revizije 1, ki je bilo poslano v pregled novembra 2023, ter stališča dveh neodvisnih revizijskih skupin. V letu 2023 je bila poleg obstoječe revizijske skupine, ki jo tvorita Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (FGG) in Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), formirana še neodvisna mednarodna revizijska skupina, ki jo vodi FGG v sodelovanju z Lettis Consultants International iz ZDA.

Zaradi predlogov za popravke modela potresnih izvorov je bila sprožena priprava Revizije 2 analize potresne nevarnosti, ki je še v teku, kot je pojasnjeno v poglavju 5. Na kratko so opisana obsežna tehnična usklajevanja in ključne spremembe modela potresnih izvorov. Pojasnjeno je tudi, kateri deli preliminarne poročila PSHA Revizije 2 so že bili pregledani in do kakšne stopnje je bil preverjen nov izračun. Sklep je podan v poglavju 6. Sledi mu še seznam uporabljenih virov.

3. Splošno o verjetnostni analizi potresne nevarnosti in njeni uporabi

Potres je posledica nenadnega sproščanja energije, ki se je skozi čas nakopičila v zemeljski skorji, običajno kot posledica gibanja tektonskih plošč. Narava potresov je takšna, da se šibkejši potresi pojavljajo zelo pogosto, medtem ko se njihova pogostost s povečevanjem moči potresa zmanjšuje. Moč potresov merimo z magnitudo. Obstajajo različne mere za magnitudo. Za merjenje sproščene energije močnih potresov se je uveljavila momentna magnituda (M_w), ki vključuje seizmični moment (M_0), ki je odvisen od strižne trdnosti Zemljine skorje oziroma kamenine, površine pretrga in povprečnega premika. Seizmični moment je povezan s količino sproščene energije med potresom. Če se magnituda potresa poveča za 2 (na primer med 4 in 6), pomeni, da se med potresom sprosti približno 1000-krat več energije.

Problem nastane, ker ne moremo natančno napovedati, kdaj, kje in zakaj se bo pojavil močan potres, ter kakšna bo njegova magnituda. Tudi če bi imeli te informacije, pa ne bi mogli natančno napovedati, kako se bodo gibala tla na določeni lokaciji za potres z znano magnitudo, epicentrom in vrsto preloma. Zato problem rešujemo z uporabo verjetnostnih metod. Ker se po svetu izvajajo meritve gibanja tal med potresi že več kot 100 let, imamo na voljo veliko podatkov o gibanju tal za različne vrste potresov. Za precej daljše obdobje pa imamo razvit katalog potresov, ki vsebuje podatke o magnitudah in epicentrih preteklih močnih potresov, ter metode, s katerimi se lahko oceni potresne izvore. Vsi ti podatki so potrebni, da se ovrednoti potresna nevarnost lokacije, s katero definiramo zvezo med mero za intenziteto gibanja tal in verjetnostjo prekoračitve izbrane intenzitete gibanja tal, kar predstavlja izhodiščni parameter za potresnoodporno projektiranje objektov.

Seizmologija in potresno inženirstvo sta se razvila do te mere, da potresnoodporni objekti lahko prenesejo zelo močne potrese. Kljub temu je velik delež grajenega okolja neodporen na potrese, saj je bila večina objektov zgrajena v obdobju, ko potresnoodporno projektiranje še ni bilo razvito in uveljavljeno v praksi.

Potreben pogoj za zagotavljanje potresne odpornosti oziroma potresne varnosti je nepristransko ovrednotenje potresne nevarnosti na lokaciji, kjer želimo graditi objekte. Ko govorimo o potresni nevarnosti neke lokacije, imamo v mislih ovrednotenje gibanja tal na lokaciji zaradi potencialnih potresov, pri čemer je treba modelirati pojavljanje potresov v prihodnosti in gibanje tal na lokaciji pri danem potresu. Na splošno imamo veliko podatkov o potresih, vendar potresne nevarnosti na dani lokaciji še zdaleč ne moremo zanesljivo ovrednotiti z determinističnim pristopom. Zato uporabljamo verjetnostno analizo potresne nevarnosti, ki se je razvila v 60-ih letih prejšnjega stoletja. Najbolj prepoznana pionirja na področju verjetnostne analize potresne nevarnosti sta C. A. Cornell in L. Esteva. Začetki sodobne verjetnostne analize potresne nevarnosti segajo v leto 1968 (Cornell, 1968). Cornellov verjetnostni pristop še vedno predstavlja temeljni sestavni del verjetnostnih analiz potresne nevarnosti.

Cilj verjetnostne analize potresne nevarnosti je oceniti srednjo povratno dobo ali verjetnost za prekoračitev intenzitete gibanja tal na dani lokaciji. Srednja povratna doba pomeni povprečen čas med dvema potresoma, ki povzročita prekoračitev izbrane vrednosti intenzitete gibanja tal na dani lokaciji. Običajno se govori le o povratni dobi, pri čemer se je treba zavedati, da gre za srednjo povratno dobo, ki jo za potrebe analize potresne nevarnosti izražamo v letih. Eno leto je tudi najkrajša časovna enota analize potresne nevarnosti. Ker je sprejemljiva povratna doba za prekoračitev najbolj kritičnih stanj poškodovanosti lahko precej dolga, je treba z analizo potresne nevarnosti napovedovati intenzitete gibanja tal tudi za dolge povratne dobe. Za potresnoodporno projektiranje objektov običajne pomembnosti nas zanimajo potresni dogodki s povratno dobo 475 let, medtem ko se jedrski in sevalni objekti projektirajo na potresno obtežbo z bistveno daljšo povratno dobo. V splošnem želimo oceniti zvezo med povratno dobo in intenziteto gibanja tal za celoten interval povratnih dob vsaj do 100.000 let. Zvezo med srednjo povratno dobo in mero za intenziteto gibanja tal imenujemo krivulja potresne nevarnosti. Ta krivulja predstavlja vhodni podatek za verjetnostno varnostno analizo delovanja jedrskih objektov. Krivulje potresne nevarnosti se v splošnem izračunajo za različne mere za intenziteto gibanja tal.

Zavedati se je treba, da je gibanje tal med potresom dinamičen pojav, vendar se v analizi potresne nevarnosti intenziteta gibanja tal določi s spremenljivko, ki je neodvisna od časa merjenega med potresom. Zato je običajno intenziteta gibanja tal predstavljena z le eno številčno ovrednoteno lastnostjo gibanja tal na dani lokaciji. Ker z enim parametrom ne moremo opisati vseh lastnosti dinamičnega pojava gibanja tal med potresom, običajno vpeljemo nabor mer za intenziteto gibanja tal, za katere se nato izvede PSHA. Osnovna mera za intenziteto gibanja tal je spektralni (psevdo) pospešek ($S_a(T)$), ki je odvisen od frekvence nihanja oziroma nihajnega časa in ima zanimiv fizikalni pomen. Če spektralni (psevdo) pospešek izrazimo kot delež pospeška prostega pada, le-ta predstavlja kar maksimalno potresno silo na konstrukcijo, izraženo kot delež teže. Spektralni psevdo pospešek pri nihajnem času 0 sekund je enak kar maksimalnemu pospešku tal (angl. peak ground acceleration, PGA). Pri projektiranju objektov, pomembnih za jedrsko varnost, se upoštevajo pospeški tal v vseh treh smereh, medtem ko je za objekte običajne pomembnosti praviloma sprejemljivo, da se jih analizira zgolj na pospeške v obeh horizontalnih smereh objekta. Za lažjo fizikalno predstavo učinkov spektralnih pospeškov, pospeške normiramo na težnostni pospešek, tj. $9,81 \text{ m/s}^2$ oziroma 1 g, saj ta pospešek stalno čutimo v smislu naše teže. Na sliki 1 vidimo, da se potresna nevarnost, ovrednotena z maksimalnim pospeškom tal za povratno dobo 475 let, po območju Slovenije spreminja, saj slednji znaša od 0,1 g do 0,325 g (ARSO, 2021). Najmanjše vrednosti pričakujemo za Primorsko in Štajersko s Prekmurjem, tj. $\text{PGA} = 0,1 \text{ g}$.

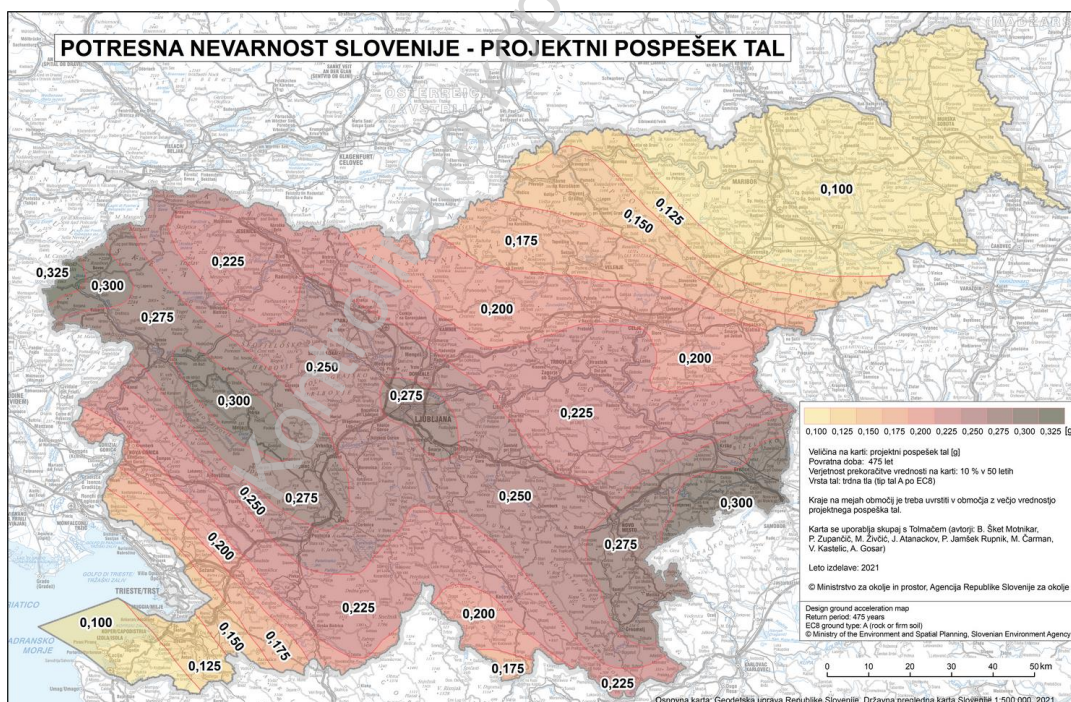
Spektralne pospeške za različne nihajne čase običajno povežemo v krivuljo, ki jo imenujemo spekter (psevdo) pospeškov in predstavlja osnovni vhodni podatek za analize potresnega odziva objektov, s katerimi računsko dokazujemo potresno odpornost objekta. Kot je že bilo omenjeno, je spektralni pospešek boljša mera kot maksimalni pospešek tal, saj je neposredno povezan s potresnimi silami. Če rečemo, da spektralni pospešek pri osnovnem nihajnem času objekta znaša $S_a(T)=0,3 \text{ g}$, to pomeni, da bi bila maksimalna horizontalna potresna sila, če bi jo bila konstrukcija zmožna prenesti brez poškodb, približno 30 % njene teže. Takšna interpretacija potresnih sil na objekt ni možna, če za mero za intenziteto gibanja tal uporabimo maksimalni pospešek tal, ki je odvisen zgolj od nihanja oziroma gibanja tal med potresom, medtem ko so potresne sile odvisne tudi od nihajnega časa objekta.

Zvezo med povratno dobo in intenziteto gibanja tal je praktično nemogoče neposredno izračunati. Zato problem razdelimo na več korakov oziroma dogodkov, pri čemer izračunamo verjetnosti posameznih dogodkov ob pogoju drugih dogodkov. Iskano verjetnost oziroma srednjo povratno dobo dogodka (tj.

prekoračitev dane vrednosti intenzitete gibanja tal) nato izračunamo z uporabo teorema o popolni verjetnosti dogodka.

Verjetnostna analiza potresne nevarnosti se zato razčleni na naslednje osnovne korake:

1. Identifikacija vseh potresnih virov. Potresni izvori so običajno ploskovni ali linijski. Slednji se nanašajo na identificirane aktivne prelome, medtem ko se ploskovni potresni izvori ovrednotijo z upoštevanjem preteklih potresov in geoloških pojavov.
2. Opredelitev zveze med magnitudo potresa in pogostostjo pojava ter ocena maksimalnih magnitud potresov za identificirane potresne izvire.
3. Opredelitev zveze med lokacijo epicentra potresa in lokacijo objekta v verjetnostnem smislu. Običajno se predpostavi, da je epicenter potresa za dani potresni vir enak verjeten po celotni površini ali liniji potresnega izvira.
4. Določitev intenzitete gibanja tal za primer trdnih tal na lokaciji objekta pri dani magnitudi in epicentru potresa, z upoštevanjem dodatnih parametrov potresa.
5. Izračun zveze med povratno dobo in intenziteto gibanja tal za trdna tla z uporabo teorema o popolni verjetnosti.
6. Analiza potresnega gibanja tal z upoštevanjem lokalnih lastnosti tal.
7. Izračun zveze med povratno dobo in intenziteto gibanja tal na površju terena ali na globini temeljev objekta.



Slika 1: Karta projektnega pospeška tal za Slovenijo za trdna tla in povratno dobo 475 let (ARSO, 2021).

Vhodni podatki in rezultati vsakega koraka analize so negotovi. Prednost verjetnostne analize potresne nevarnosti v primerjavi z deterministično analizo potresne nevarnosti je v tem, da PSHA omogoča ovrednotenje teh negotovosti. Ločimo med aleatornimi in epistemskimi negotovostmi. Aleatorne negotovost (tudi aleatorna variabilnost) je posledica slučajnosti pojava. Smatra se, da aleatorne variabilnosti ne moremo bistveno zmanjšati. Epistemске negotovosti so povezane s premajhno količino podatkov ali pomanjkanjem poznavanja problema. Razčlenitev negotovosti med aleatorno

variabilnost in epistemične negotovosti ni trivialna. Aleatorna variabilnost ima neposreden vpliv na potresno nevarnost na lokaciji, vpliv epistemičnih negotovosti pa se običajno ovrednotiti z logičnimi drevesi, kar pomeni, da za vsako vejo logičnega drevesa izračunamo rezultat analize potresne nevarnosti in zato v končni fazi dobimo cel nabor rezultatov PSHA. Torej, v samem postopku računa je krivulj potresne nevarnosti za dano mero intenzitete gibanja tal toliko, kot je vej logičnega drevesa, s katerimi modeliramo vplive negotovosti. Iz množice rezultatov se nato izračuna srednjo (povprečno) krivuljo potresne nevarnosti in percentilne krivulje potresne nevarnosti, s katerimi lahko ocenimo interval zaupanja v rezultate analize. Za nadaljnje izračune se običajno upošteva srednja (povprečna) krivulja potrese nevarnosti, ki se določi za nabor mer za intenziteto gibanja tal, tj. spektralnih pospeškov za različne nihajne čase.

Da bi bila verjetnostna analiza potresne nevarnosti izvedena čimbolj nepristransko, so bile razvite smernice SSHAC (angl. Senior Seismic Hazard Analysis Committee) (npr. USNRC, 2018), ki v organizacijskem in tehničnem smislu obravnavajo kompleksnost problema analize potresne nevarnosti. Cilj procesa SSHAC je izvesti verjetnostno analizo potresne nevarnosti, ki zajema "center", "telo" in "razpon" tehnično utemeljenih interpretacij. Center predstavlja najboljšo oceno vhodnega parametra posamezne spremenljivke oziroma vhodnega podatka, telo opisuje obliko porazdelitve parametra glede na možne vrednosti parametra, medtem ko razpon zajema zgornjo in spodnjo mejo interpretacije. Proces SSHAC je razdeljen na dve fazi: v prvi fazi ekipe ocenjujejo razpoložljive podatke, modele in metode, ki so lahko pomembne za izvedbo analize potresne nevarnosti, v drugi fazi pa se ti podatki, modeli in metode integrirajo v modele, s katerimi se modelira center, telo in razpon tehnično utemeljenih interpretacij. Poleg izvajalcev študije pa proces SSHAC predvideva tudi pregled vseh korakov izvedbe analize potresne nevarnosti s strani neodvisnih strokovnjakov.

Iz zgoraj navedenih korakov analize potresne nevarnosti se običajno tvorijo naslednji modeli: model potresnih virov (točke 1, 2 in 3), model gibanja (trdnih) tal (točka 4) ter model potresnega odziva lokalnih tal (točka 6), medtem ko točki 5 in 7 vključujeta matematične izračune, ki povezujejo modele tako, da izračunamo zvezo med povratno dobo in intenziteto gibanja tal, tj. krivulje potresne nevarnosti za spektralne psevdo pospeške pri različnih frekvencah, kar je osnovni rezultat analize potresne nevarnosti.

Rezultati analize potresne nevarnosti se uporabijo kot osnova za določitev projektne potresne obtežbe za potrebe potresnoodpornega projektiranja konstrukcij, sistemov in komponent sevalnih in jedrskih objektov, prav tako pa tudi v analizi potresnega tveganja, s katero se dokazuje potresna varnost jedrskih elektrarn.

V splošnem je razvoj in implementacija verjetnostne analize potresne nevarnosti na lokaciji jedrske elektrarne kompleksen in dolgoročen proces. Cilj je, da se določi potresno nevarnost lokacije čimbolj nepristransko, saj predstavlja vhodni podatek za nadaljnje postopke dokazovanja varnosti jedrskih in sevalnih objektov. Zato je potrebno v takšne študije vključiti tudi najnovejša znanstvena spoznanja.

Za jedrske in sevalne objekte se smatra, da so varni, če se dokaže, da je verjetnost prekoračitve predpisanih mejnih stanj jedrskih in sevalnih objektov nižja od ciljne vrednosti, kar države običajno uredijo z različnimi pravnimi akti. V Sloveniji je ciljna zanesljivost oziroma varnost jedrskih elektrarn predpisana z Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji, ter na tej osnovi določenim Pravilnikom o dejavnih sevalne in jedrske varnosti. Varnost jedrskih elektrarn se dokazuje v postopku projektiranja in nato tudi v času obratovanja jedrske elektrarne, saj je treba varnosti jedrske elektrarne dokazovati periodično, običajno na vsakih deset let.

4. Povzetek verjetnostne analize potresne nevarnosti za JEK2

4.1 Razvoj verjetnostne analize potresne nevarnosti za obdobje 1994–2022

Trenutno veljavna verjetnostna analiza potresne nevarnosti za NEK (PSHA, 2004) je rezultat pregleda prve verjetnostne analize potresne nevarnosti za NEK iz leta 1994 (PSHA, 1994). Verjetnostno analizo potresne nevarnosti iz leta 2004 so neodvisno izvajale tri skupine strokovnjakov, in sicer iz Slovenije, Hrvaške in ZDA. Vsaka skupina je razvila model potresnih izvorov. V okviru analize je bil revidiran katalog potresov iz leta 1994. Uporabljeni so bili trije modeli gibanja tal, pri čemer je imel največjo utež model Sabetta in Pugliese (1996).

Poleg izračuna potresne nevarnosti za trdna tla je bil ovrednoten tudi vpliv lokalnih tal z upoštevanjem osnovnega profila tal na lokaciji NEK, ki sega do globine 80 m. Analiza potresnega odziva tal je bila izvedena z ekvivalentno linearno 1D analizo. V analizi je bilo uporabljenih šest zabeleženih akcelerogramov in dva materialna modela tal. Na podlagi potresne analize tal so bili izračunani faktorji tal, ki so bili uporabljeni za pretvorbo intenzitete gibanja tal na trdnih tleh v intenziteto gibanja tal na različnih kontrolnih točkah.

Srednji (povprečen) maksimalni pospeška tal (PGA) za referenčna trdna tla in za srednjo povratno dobo 10.000 let je znašal približno 0,48 g, s spodnjo mejo približno 0,39 g in zgornjo mejo 0,59 g. Povprečna vrednost mediane PGA glede na rezultate treh skupin, pri srednji povratni dobi 10.000 let, je znašala 0,47 g za referenčna trdna tla, na površju pa 0,56 g.

Po letu 2004 so bile izvedene obsežne geotehnične, geološke in seizmološke raziskave za namen JEK2 ter za odlagališče nizko- in srednje-radioaktivnih odpadkov. Podatki, zbrani med temi raziskavami, so bili vključeni v novo PSHA.

Novi projekt verjetnostne analize potresne nevarnosti se je začel leta 2015 za namen projektiranja JEK2 pod okriljem GEN energije (GEN). Projekt je v prvi fazi vodilo podjetje RIZZO International v sodelovanju z Geološkim zavodom Slovenije. Prva faza novega projekta PSHA je bila zaključena leta 2018. Preliminarno poročilo PSHA Rev.0 je obsegalo več kot 800 strani in množico dodatkov. Projekt je vključeval razvoj modela potresnih izvorov, model gibanja tal in potresno analizo tal. Ker je bila PSHA izvedena po postopku SSHAC, je bilo potrebno upoštevati vse razpoložljive merodajne informacije, ki so jih skrbno interpretirale tehnične integracijske skupine izvajalcev študije.

Sestavljen in analiziran je bil katalog potresov. Končni katalog je vseboval 2.109 potresov. Model potresnih izvorov je pripravila tehnična integracijska skupina glede na smernice SSHAC. Skupina je razvila pet modelov potresnih izvorov. Dva modela sta upoštevala ploskovne potresne izvore, dva modela pa sta poleg ploskovnih potresnih izvorov vključevala še 12 aktivnih prelomov. Aktivni prelomi so bili določeni z njihovo tridimenzionalno lokacijo, modelom pogostosti magnitud in vrednostmi parametrov (hitrost zdrsa, b-vrednost), največjo magnitudo in verjetnostjo, povezano z aktivnostjo preloma. Peti model potresnih izvorov je temeljil zgolj na pretekli seizmičnosti, kot izhaja iz kataloga potresov. Vpliv epistemične negotovosti je bil ovrednoten s šest- in osem-vozljišnim logičnim drevesom, in sicer za ploskovne in prelomne potresne izvore.

Poleg modela potresnih izvorov je bil razvit model gibanja tal za lokacijo JEK2. Tehnična integracijska skupina za razvoj modela gibanja tal se je odločila, da se uporabi pristop temeljnega modela gibanja tal (ti. "backbone model"). Kot temeljni model gibanja tal je bil izbran model Chiou in Youngs (2014),

tj. CY14. Aleatorična variabilnost intenzitete gibanja tal je bila modelirana z uporabo pristopa ene postaje (angl. Single-Station Sigma). Epistemične negotovosti so bile upoštevane z devetimi vejami logičnega drevesa za model mediane gibanja tal in s tremi vejami za aleatorno variabilnost.

Druga faza projekta se je začela z neodvisnim pregledom poročila PSHA Revizija 0. Ta del projekta je vodila Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Inštitut za konstrukcije in potresno inženirstvo v sodelovanju z N. A. Abrahamsonom iz ZDA in Agencije Republike Slovenije za okolje, ARSO. Pripravljena so bila tri neodvisna poročila v skupnem obsegu 102 strani, ki so predlagala 32 posameznih popravkov modela gibanja tal, metodologije za izračun potresne nevarnosti na trdnih tleh in metodologije za ovrednotenje vpliva lokalnih tal. Poleg tega je bil vzporedno razvit nov neergodičen model gibanja tal ter opravljen neodvisen izračun analize potresne nevarnosti za trdna tla. V nadaljevanju (poglavje 4.2) je nekoliko bolj podrobno predstavljen neergodičen model gibanja tal. Druga faza projekta je bila zaključena leta 2021.

Tretja faza projekta se je začela 2022. Izvajalcem verjetnostne analize potresne nevarnosti se je pridružil N. A. Abrahamson, ki je postal zadolžen za implementacijo novega neergodičnega modela gibanja tal v verjetnostno analizo potresne nevarnosti. Tretja faza projekta je bila razdeljena na tri naloge. Prva naloga je obsegala pripravo odzivov na tri revizijska mnenja in usklajevanje z revidenti glede upoštevanja predlogov za izboljšave PSHA Revizija 0. Druga naloga je vključevala pripravo dokumenta vhodnih podatkov za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v PSHA ter pripravo navodil za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v PSHA s testnimi primeri. Tretja naloga pa je obsegala posodobitev verjetnostne analize potresne nevarnosti in izdajo nove verzije preliminarne poročila PSHA, Revizija 1.

Vzporedno s tretjo fazo projekta začela delovati neodvisna revizijska skupina s ciljem preverjanja skladnosti nadgradnje verjetnostne analize potresne nevarnosti s priporočili druge faze in izvedbe neodvisnih izračunov. To je bil svojevrsten izziv, saj gre za prvo implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v analizo potresne nevarnosti za jedrsko elektrarno. To revizijsko skupino vodi Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani v sodelovanju z Agencijo Republike Slovenije za okolje. Delno so sodelovali tudi razvijalci programa OpenQuake, saj je bilo treba program do neke mere nadgraditi, da se ga je lahko uporabilo za neodvisen izračun PSHA. OpenQuake je bil nadgrajen v ta namen tudi v okviru evropskega projekta METIS.

V letu 2022 je bilo izvedenih več aktivnosti. Izvajalec študije je delal na Nalogi 1 tretje faze analize potresne nevarnosti, neodvisna revizijska skupina pa je pregledovala njihove predloge. Izdelanih je bilo 12 različnih revizijskih mnenj s poudarkom na petih revizijah dokumenta vhodnih podatkov za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v PSHA in več revizijah poročila o Nalogi 1 tretje faze analize potresne nevarnosti. Za celovito implementacijo neergodičnega modela gibanja tal je bilo treba implementirati logično drevo s tremi vejami aleatorne variabilnosti pospeškov, pri čemer je bilo zahtevano, da najnižje vrednosti ne smejo biti nižje od neergodične aleatorne variabilnosti iz literature. Zahtevali smo, da se zaradi vpliva negotovosti neergodičnega modela gibanja tal upošteva še alternativni neergodičen model gibanja tal, ki temelji na bazi pospeškov za potrese z magnitudo $M_L > 3$. Ker se je popravil način izvedbe analize gibanja tal, je bilo treba popraviti tudi konstantni člen oziroma regionalno konstanto modela gibanja tal, tako da se je modeliral zgolj raztros v regionalni konstanti zaradi epistemičnih negotovosti, kar je v delno neergodičnem modelu simulirano z devetimi modeli oziroma vejami logičnega drevesa.

Vzporedno so se izvajali testni izračuni za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal, in sicer za točkovni potresni izvor, ploskovni potresni izvor in prelomni izvor. Ta proces je bil zelo zahteven. Izvedenih je bilo več kot deset tehničnih sestankov na temo neodvisnih izračunov, dokler ni bilo dokazano, da so rezultati neodvisnih izračunov z obema uporabljenima programskima orodjema skladni. V ta namen smo dvakrat revidirali tudi posebno poročilo izvajalca, v katerem je izvajalec dokumentiral rezultate testnih izračunov.

Rezultat drugega pregleda dokumenta vhodnih podatkov za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v PSHA je bil opredeljen kot pogojno sprejemljiv, saj so se za točkovni izvor pokazale razlike v rezultatih. Kasneje se je ta problem rešil, poleg tega pa se je odpravila tudi napaka v programu RIZZO-HAZARD pri pretvorbi koordinat iz GPS v WGS84. Tako dokument z vhodnimi podatki kot tudi navodila za implementacijo neergodičnega modela gibanja tal v PSHA sta se uskladila z revidenti kasneje, v letu 2023, uradno pa sta bila izdana leta 2024. Bolj podroben opis teh poročil presega okvir tega povzetka.

4.2 Razvoj neergodičnega modela gibanja tal za območje JV Slovenije v obdobju 2019-2021

Neergodičen modela gibanja tal je bil razvit v drugi fazi projekta, v obdobju 2019–2021. Model gibanja tal je ključen model verjetnostne analize potresne nevarnosti. Z njim se določi intenziteto gibanja tal pri dani magnitudi in lokaciji potresa ter ostalimi parametri potresa in lokacije. Da bi lahko bil model gibanja tal iz leta 2004 zastarel, je ugotovil ARSO na osnovi študije, ki jo je izvedel za potrebe odlagališča NSRAO (ARSO, 2015). Avtorji študije so ugotovili, da je model gibanja tal, ki je bil z največjo utežjo uporabljen v analizi potresne nevarnosti iz leta 2004 (Sabetta in Pugliese, 1996), zastarel, saj se je izkazalo, da ima bistveno nižjo aleatorno variabilnost pospeškov pri dani magnitudi in razdalji med epicentrom in lokacijo potresa, kot je bila vgrajena v novejše ergodične modele gibanja tal.

Modeli gibanja tal, razviti od leta 2004, so večinoma privedli do povečanja intenzitete gibanja tal, kar se je odražalo v povečanju potresne nevarnosti na dani lokaciji. To je bila predvsem posledica večanja baze zapisov močnih potresov. Uporaba takratnih modelov gibanja tal bi posledično povečala potresno nevarnost na dani lokaciji.

Po drugi strani se je krepilo zavedanje, da ti modeli vendarle temeljijo na ergodični predpostavki (Anderson in Brune, 1999), saj baza zapisov gibanja tal vključuje zapise gibanja tal za dano tektonsko kategorijo s celega sveta. S temi modeli se zato napoveduje enako mediano in aleatorno variabilnost gibanja tal za vse lokacije znotraj iste tektonske kategorije, ne glede na lokacijo. Izvedenih je bilo več študij, ki so razkrile, da je za specifične lokacije in lokalizirane potrese aleatorna variabilnost gibanja tal veliko manjša, kot so jo napovedali ergodični modeli gibanja tal (npr. Anderson in Uchiyama 2011, Atkinson 2006, Lin et al. 2011). Posledično se je krepilo spoznanje, da ergodični modeli gibanja tal niso dovolj natančni pri razčlenitvi negotovosti na aleatorni in epistemični del. Ta pomanjkljivost je lahko še posebej pomembna, ko se ergodični modeli gibanja tal uporabijo v verjetnostni analizi potresne nevarnosti za lokacije jedrskih elektrarn, saj ima aleatorna variabilnost neposreden in vpliv na potresno nevarnost, ki je pomemben predvsem za zelo dolge povratne dobe.

V zadnjih letih je rast števila zapisov gibanja tal na določenih območjih po svetu omogočila opustitev ergodične predpostavke pri razvoju modela gibanja tal. Ker ARSO v Sloveniji sistematično meri potresno gibanje tal že več kot 20 let, imamo na voljo dovolj zapisov za potrese z majhno magnitudo, kar je odprlo možnost za razvoj neergodičnega modela gibanja tal za lokacijo JEK2.

Na podlagi novih spoznanj je GEN energija (GEN) leta 2019 podprla vključitev razvoja neergodičnega modela gibanja tal za območje Krškega v okvir druge faze verjetnostne analize gibanja tal pod okriljem večjega mednarodnega projekta, ki ga je vodila Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in se je izvajal skupaj z raziskovalci iz Francije (EDF R&D) in ZDA (N. A. Abrahamson). Projekt je obsegal več nalog. Razvoj neergodičnega modela je vodil prof. Abrahamson iz Univerze v Berkeleyju v Kaliforniji. Prvo poročilo o neergodičnem modelu gibanja tal je bilo GEN-u predloženo konec leta 2020 in je bilo pregledano s strani mednarodne skupine neodvisnih strokovnjakov. Postopek pregleda se je začel januarja 2021 in končal aprila 2021, ko je bilo izdano poročilo Rev. 1 (Abrahamson et al., 2021). Kot del mednarodnega pregleda verjetnostne analize potresne nevarnosti je bila 14. marca 2024 izdana Revizija 2 poročila o neergodičnem modelu gibanja tal za območje Krškega (Abrahamson et al. 2024), ki pa ni zahtevala popravkov modela, temveč zgolj dodatno razlago in odpravo nekaterih tipkarskih napak.

Nov neergodičen model gibanja tal (NGMM) izpolnjuje zahteve za razvoj modelov gibanja tal, kot jih opredeljujejo varnostne smernice IAEA (IAEA-SSG-9, 2022). Model bo predstavljen tudi v tehničnem dokumentu IAEA na temo neergodičnih modelov gibanja tal, ki bo predvidoma javno objavljen konec leta 2024 oziroma v začetku leta 2025.

Neergodičen model gibanja tal je razvit z upoštevanjem razpoložljivih lokalnih podatkov o gibanju tal, ki jih je zagotovil ARSO (ARSO, 2020). Podatki so vključevali zapise potresnih gibanj tal od leta 1996 do 2020. Ker pri verjetnostni analizi potresne nevarnosti za lokacijo JEK2 prevladujejo potresi na razdaljah približno 25 km od lokacije, so bili izbrani zapisi gibanja tal z omejitvijo razdalj med epicentrom potresa, lokacijo JEK2 in lokacijami merilnih postaj. Pri potresih manjših magnitud (tj. $3 > M_L > 2$) so bili upoštevani le zapisi, ki so od lokacije oddaljeni največ 50 km, medtem ko so bili za močnejše potrese z magnitudo $M_L > 3$ v bazo podatkov za razvoj NGMM vključeni vsi zapisi na razdalji do 100 km od lokacije. Nato je bila izbrana podskupina zapisov gibanja tal tako, da so bili izbrani le tisti zapisi, za katere so bili na voljo vsaj štiri zapisi na postajo in najmanj štiri zapisi na potres. Upoštevani so bili le zapisi za referenčne pogoje trdnih tal. Tako določena baza zapisov gibanja tal obsega skupno 1078 zapisov iz 130 potresov. Epicentri obravnavanih potresov, lokacije postaj za merjenje gibanja tal, lokacija JEK2 in obris potresnega izvora B-12 so predstavljeni na sliki 2, povzeti iz (Abrahamson et al., 2021).

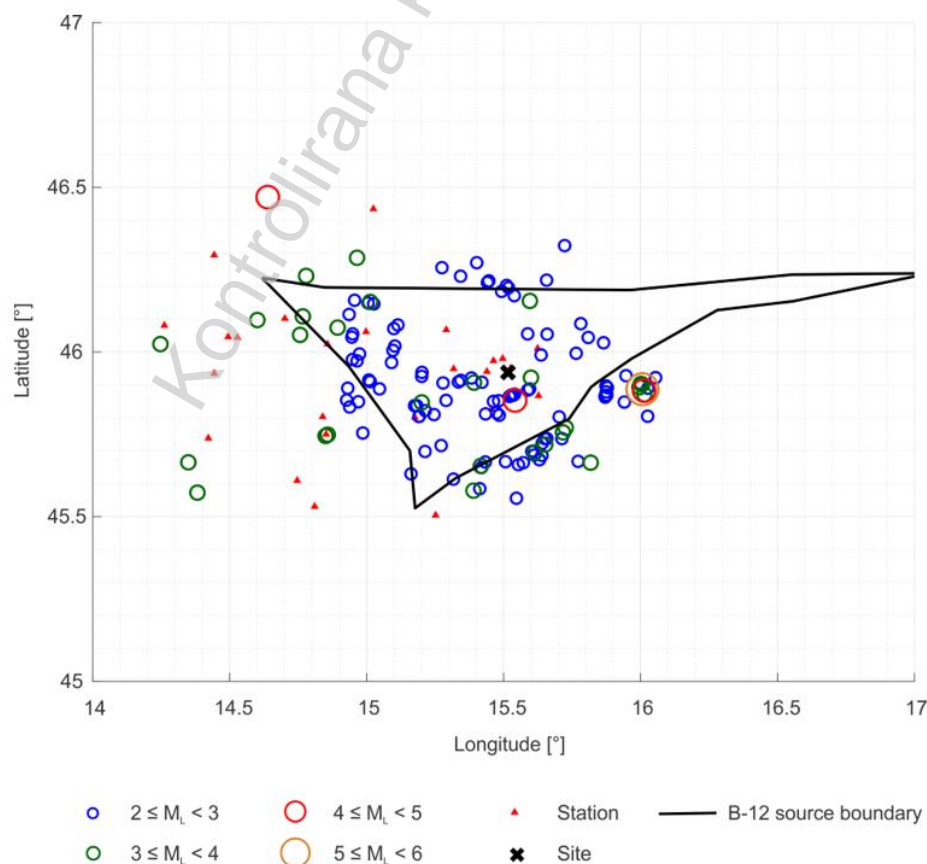
Glavni vhodni podatek za neergodičen model gibanja tal je lokalna baza zapisov gibanja tal. Ker ta baza vključuje zgolj zapise gibanja majhnih magnitud potresov, se predpostavi, da lahko o sistematičnih učinkih gibanja tal pri velikih magnitudah sklepamo iz tistih pri manjših magnitudah. Ta predpostavka velja le, če so sistematični učinki gibanja tal neodvisni od magnitude. Na primer, spekter pospeškov je odvisen od magnitude zaradi svoje nelinearne narave, medtem ko zglajen povprečni Fourierjev amplitudni spekter (EAS) ne kaže te odvisnosti. Tako se sklepa, da se lahko neergodični členi, ocenjeni iz potresov manjših magnitud, neposredno uporabijo za večje magnitude, pri čemer se je treba neergodičen model osnovati na osnovnem ergodičnem EAS modelu, za kar je bil uporabljen model BA19 (Bayless in Abrahamson, 2019). Poleg osnovnega modela za EAS je treba uporabiti tudi osnovni ergodični model za spektralni pospešek, saj je treba EAS pretvoriti v končni fazi v spektralni pospešek. V ta namen je bil uporabljen model CY14 (Chiou in Youngs, 2014).

Neergodičen model za EAS vključuje regionalno konstantno, ki je bila za območje JV Slovenije negativna, ter neergodične prilagoditvene člene potresnega izvora, lokacije in poti gibanja tal, ki zajamejo vpliv lokacije oziroma epicentra potresa. Primer srednje vrednosti neergodičnega prilagoditvenega člena potresnega izvora v odvisnosti od lokacije epicentra potresa in za okolico JEK2 je prikazan na sliki 3. Iz slike je razvidno da se vpliv potresnega izvora na gibanje tal na lokaciji JEK2

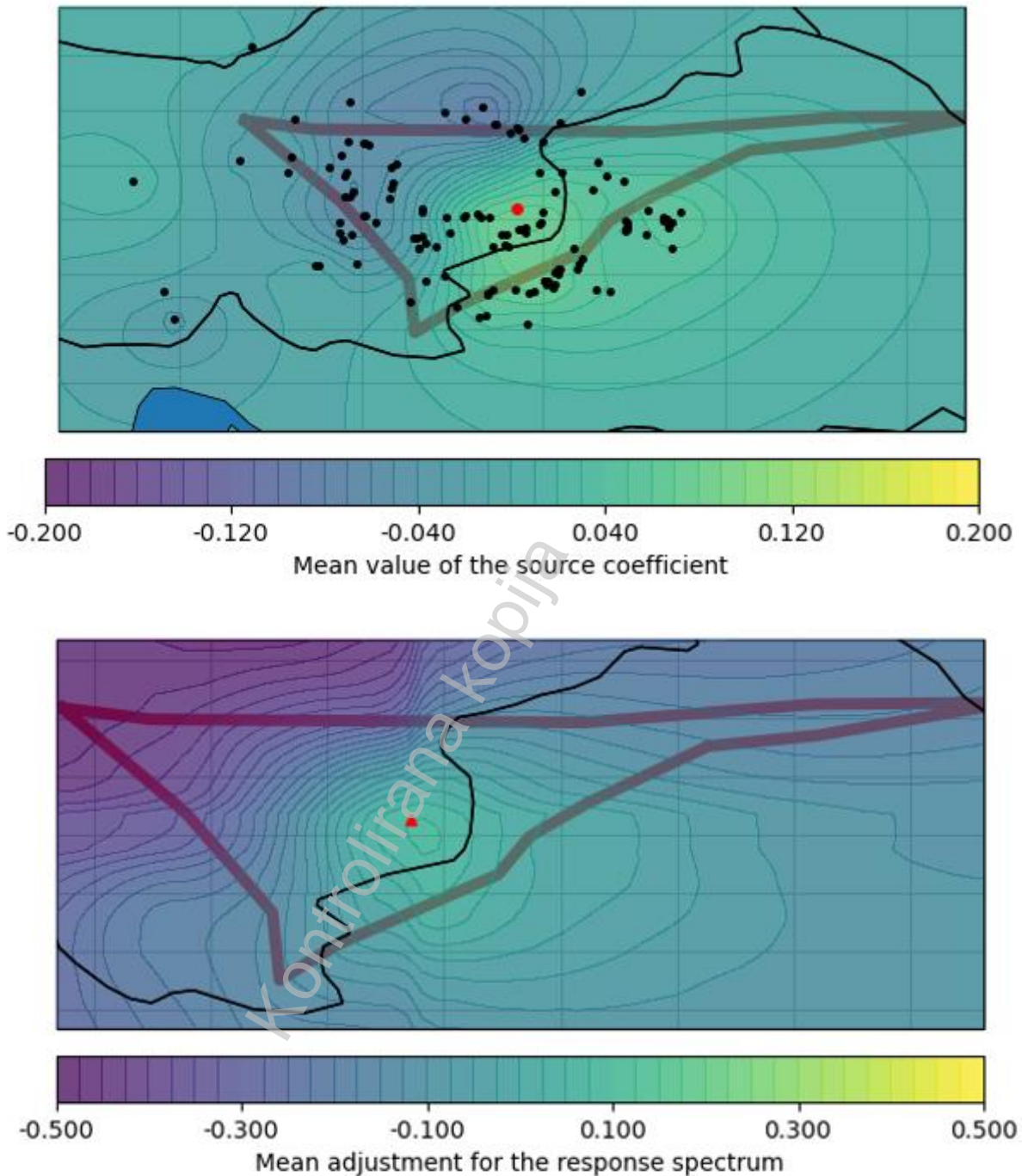
spreminja s koordinato potresnega izvora. Ob potresu severno od lokacije JEK2 v povprečju pričakujemo nižjo vrednost EAS na lokaciji JEK2, kot pa če bi se potres z enako magnitudo in enako oddaljenostjo zgodil vzhodno ali južno od lokacije JEK2.

Model za EAS je stohastičen in ga ne moremo neposredno uporabiti v analizi potresne nevarnosti. Da bi dobili vrednosti modela EAS, ga je treba realizirati. Vrednosti modela so bile realizirane približno 100-krat in nato pretvorjene v spektralne pospeške. Obravnavano geografsko območje je bilo razdeljeno na več kot 4.000 celic. Vrednosti modela so se realizirale za vsako celico, in sicer za EAS pri različnih frekvencah. Pretvorba v spektralne pospeške je bila izvedena s pomočjo teorije slučajnih vibracij (angl. Random Vibration Theory, RVT) z upoštevanjem vpliva magnitude. Zemljevid srednjih vrednosti skupnega neergodičnega prilagoditvenega člena za spektralni pospešek pri 5 Hz in $M_w=6$ je prikazan na sliki 3 spodaj. Tudi v tem primeru se vidi podobna porazdelitev vrednosti, kot v predhodnem primeru.

Poleg prikazanih srednjih vrednosti členov neergodičnega modela gibanja tal je bilo treba razviti tudi model neergodične aleatorne variabilnosti, s katerim smo ocenili nižje vrednosti, kot so vrednosti ergodičnega modela CY14. Podobno je bilo ugotovljeno za neergodičen model v Kaliforniji in Franciji. Ker se srednje vrednosti neergodičnega modela gibanja tal niso zelo razlikovale od vrednosti ergodičnega modela, aleatorna variabilnost pa se je zmanjšala, kar je konceptualna lastnost neergodičnega modela gibanja tal, je bilo pričakovati, da se bo to odrazilo tudi v revidirani analizi potresne nevarnosti za JEK2, tj. v preliminarnem poročilu PSHA Revizija 1 iz novembra 2023.



Slika 2. Lokacije epicentrov potresov z označeno lokalno magnitudo, lokacije postaj, lokacija JEK2 in meja potresnega izvora B-12 (povzeto po Abrahamson et al. (2021)).



Slika 3. Srednja vrednosti neergodičnega prilagoditvenega člena potresnega izvora za InEAS pri 5 Hz v odvisnosti koordinat epicentra potresa za lokacijo JEK2 (slika zgoraj) in srednja vrednost celotnega neergodičnega prilagoditvenega člena za spektralni pospešek pri 5Hz in $M_w=6$ (povzeto po Abrahamson et al., 2021).

4.3 Neodvisni strokovni pregled preliminarne poročila PSHA Revizije 1

Poročilo PSHA Revizija 1 so izdelovalci študije predali v pregled novembra 2023. Poleg neodvisne revizijske skupine (FGG/ARSO), ki je začela z delom v letu 2022, je bila vzpostavljena še neodvisna

mednarodna revizijska skupina (FGG/LCI), ki jo prav tako vodi UL FGG v sodelovanju s podjetjem Lettis Consultants International Inc. iz ZDA. Druga revizijska skupina je bila ustanovljena septembra 2023.

V nadaljevanju je podan kratek opis preliminarnega poročila PSHA Revizije 1 in revizijskega mnenja, ki je deloma povzet po neodvisnem strokovnem mnenju mednarodne revizijske skupine (KRS001-PIER-R0, 2024), dodana pa so tudi nekatera dodatna pojasnila. Revidenti so podali 192 komentarjev za popravke, ki so se večinoma nanašali na model potresnih izvorov.

Poglavje 2 preliminarnega poročila PSHA Revizije 1 opisuje postopek sestavljanja in razvijanja posodobljenega kataloga preteklih potresov iz prve faze analize potresne nevarnosti za območje s polmerom 200 km okoli lokacije Krškega, ki vključuje Slovenijo in bližnjo okolico. Iz revizijskega poročila sledi, da je bil katalog potresov že večkrat pregledan. Postopek sestavljanja kataloga je skladen z IAEA SSG-9, Rev. 1 (IAEA, 2022). Katalog zajema časovno obdobje od leta 456 do 2013, prag magnitude pa je bil določen pri $M_w=3,5$. Podvojeni zapisi potresnih dogodkov in nepravilni zapisi so bili odstranjeni iz katalogov. Negotovosti glede epicentralnih in hipocentralnih lokacij v katalogih so velike, saj, kot je bilo omenjeno zgoraj, temelji 60 % kataloga samo na makroseizmičnih podatkih in ne na instrumentalno določenih lokacijah. Končni katalog vsebuje skupno 2.109 dogodkov. Revizijska skupina ni imela kritičnih pripomb glede kataloga potresov.

Ključni predlogi za popravke so se nanašali na model potresnih izvorov, ki je opisan v poglavju 3 preliminarnega poročila PSHA Revizije 1. Razvoj modela se začne z opredelitvijo seizmotektonike območja, na osnovi katerega so bili identificirani potresni izvori, vključno s ploskovnimi izvori in aktivnimi prelomi. Izvedene so bile občutljivostne analize za prepoznavanje tistih izvorov, ki bistveno prispevajo k potresni nevarnosti na obravnavani lokaciji.

S tehničnega vidika je model potresnih izvorov zagotavljal splošno sprejemljivo oceno ploskovnih izvorov, vendar so bili revidenti mnenja, da je model pomanjkljiv pri obravnavi aktivnih prelomov, še posebej tistih v bližini obravnavane lokacije, ki bi bili pomembni za potresno nevarnost. Na primer, model potresnih izvorov je bil sestavljen iz šestih alternativnih modelov, od katerih so zgolj trije modeli vključevali tudi aktivne prelome. V poročilu niso bile predstavljene nobene ustrezne utemeljitve ali rezultati občutljivostnih analiz, ki bi podpirali odločitev za izključitev aktivnih prelomov iz treh od šestih modelov, kljub zelo prepričljivim informacijam v poročilu o obstoju aktivnih prelomov v regiji. Vzroki za izključitev aktivnih prelomov, kot so upoštevanje negotovosti z verjetnostjo obstoja ($P[e]$) in/ali aktivnosti ($P[a]$), niso bili predstavljeni. Kritike so se nanašale tudi na pretirano zmanjšanje aktivnosti prelomov zaradi aseizmičnega zdrsa in na model pogostosti potresov za aktivne prelome. Revizijska skupina je naslovila tudi vprašanja v zvezi s segmentacijo prelomov, prenizko epistemično negotovostjo pri določitvi maksimalnih magnitud aktivnih prelomov in neustreznimi modeli pogostosti potresov za aktivne prelome.

Poglavje 4 preliminarnega poročila PSHA Revizije 1 predstavlja dva modela gibanja tal, in sicer neergodičen model gibanja tal (poglavje 4.2) in delno neergodičen model gibanja tal, ki predstavlja posodobljeno različico delno neergodičnega modela gibanja tal iz preliminarnega poročila PSHA Revizije 0, pri čemer so upoštevana predlogi, priporočila in zahteve iz druge faze projekta analize potresne nevarnosti. Zaradi novega načina izračuna faktorjev tal oba modela tal definirata gibanje tal v smislu spektralnih pospeškov za referenčna trdna tla, katerim ustreza srednja hitrost strižnega valovanja 760 m/s. Referenčnim trdnim tlem pripada srednji profil tal modela CY14, ki je referenčni model gibanja tal tako za delno neergodičen kot tudi za ergodični model gibanja tal. Oba uporabljena modela gibanja tal napovedujeta gibanje tal na referenčnih trdnih tleh glede na referenčni profil tal

modela CY14. Specifični odziv lokacije je kasneje vključen z uporabo tako imenovanega enostopenjskega pristopa analize vpliva tal (Rodriguez-Marek et al., 2021).

Delno neergodičen model gibanja tal vključuje aleatorno variabilnost brez upoštevanja variabilnosti med lokacijami (ti. Single-Station Sigma). Upoštevajo se tri veje aleatorne variabilnosti intenzitete gibanja tal, s čimer se zajame epistemično negotovost pri ovrednotenju aleatorne variabilnosti. Vpliv epistemične negotovosti mediane intenzitete gibanja tal je modeliran z devetimi vejami, kar je delno upoštevano tudi v neergodičnem modelu gibanja tal. Pristop, uporabljen pri razvoju delno neergodičnega modela tal, je skladen z napredno prakso verjetnostnih analiz potresne nevarnosti. Delno neergodičen model gibanja tal se uporablja za občutljivostno analizo, medtem ko se neergodičen model gibanja tal uporabi za končno analizo potresne nevarnosti. Ker se poročilo analize potresne nevarnosti sklicuje na poročilo neergodičnega modela gibanja tal (Abrahamson et al., 2021), se je Lettis Consultants International odločil, da bo neodvisno revidiral tudi to poročilo, pri čemer se je Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo izločila iz revizijskega postopka. Sledilo je več tehničnih sestankov, izdana pa je bila tudi Revizija 2 poročila o neergodičnem modelu gibanja tal, ki pa ni vplivala na sam model. Odpravljenih je bilo več tipkarskih napak, poročilo pa je bilo razširjeno z dodatnimi razlagami, kar se je upoštevalo tudi v ločenem poročilu, ki opisuje dodatne komponente neergodičnega modela tal za potrebe implementacije v analizo potresne nevarnosti.

Poglavje 5 poročila Revizije 1 analize potresne nevarnosti opisuje izračun potresne nevarnosti za referenčna trdna tla, modele za izračun odziva tal (tj. geotehnične profile in lastnosti referenčnih tal modela CY14 ter specifičnih tal na lokaciji kotline na območju Krškega), analizo potresnega odziva tal ter izračun potresne nevarnosti za tri kontrolne točke, tj. tri različne globine, vključno s površjem. Analiza potresne nevarnosti za referenčna trdna tla je izvedena v skladu s splošno uveljavljenimi praksami in priporočili (IAEA-SSG-9, 2022). Izračun potresne nevarnosti poteka tako, da se izbere spektralni pospešek pri dani frekvenci, nato pa se za izbrane vrednosti pospeškov določijo srednje letne frekvence za vsak posamezen izvor izbranega modela potresnih izvorov. Izračun se izvede za vse potresne izvore znotraj enega modela, postopek se ponovi za naslednji izvor, dokler se ne izračuna prispevkov vseh potresnih izvorov in vseh modelov potresnih izvorov. Srednja vrednost potresne nevarnosti se izračuna kot uteženo povprečje prispevkov posameznih potresnih izvorov, medtem ko se percentilne vrednosti (npr. mediano) izračuna s postopkom konvolucije. Za nadaljnji izračun potresne nevarnosti za tri kontrolne točke na izbrani lokaciji, se upošteva 100 percentilnih krivulj potresne nevarnosti za referenčna trdna tla.

Model potresnega odziva tal je robusten in temelji na novi metodologiji enostopenjskega pristopa, ki upošteva razlike v globokem profilu tal, ki sega do 6 km, in vpliv lokalnih (plitvih) tal na površju, pri čemer se upošteva možnost nelinearnega odziva, ki se simulira z ekvivalentno linearno analizo. Razvit je bil referenčni profil za CY14 model ter profil tal na izbrani lokaciji. Vplivi negotovosti se upošteva z dvema metodama analize tal (ekvivalentna linearna analiza in korigirana ekvivalentna linearna analiza), pri čemer slednja upošteva tri različne veje. Vpliv plitvih tal se upošteva na podlagi lastnosti tal na osmih profilih, kot so bile ugotovljene z meritvami v vrtnah. Dodatno se upoštevajo še trije različice globokega profila tal, pet vej visoko-frekvenčnega dušenja gibanja tal (tj. parameter Kappa) in dva materialna modela tal. Vpliv epistemičnih negotovosti je posledično modeliran z 960 vejami logičnega drevesa.

Izračun faktorjev tal se izvaja tako, da se iz spektrov kontrolnih potresov za referenčni CY14 profil, za katerega je izvedena analiza potresne nevarnosti za referenčna tla, izračuna ekvivalentna potresna obtežba na globini 6 km. Nato se tako določena potresna obtežba uporabi za potresni odziv na 960

vejah modela tal na izbrani lokaciji. Razmerje spektralnih pospeškov za kontrolno točko na lokaciji objekta in spektralnih pospeškov za kontrolno točko na referenčnem profilu tal modela CY14 predstavlja faktor tal. Ker se potresna obtežba določa s spektri pospeškov, se za izračun uporablja teorija slučajnih vibracij. Aleatorna variabilnost se upošteva tako, da se za vsako vejo logičnega drevesa izvede še dodatnih 30 simulacij potresnega odziva. Porazdelitev faktorjev tal se modelira s sedem-točkovnim modelom, ki predstavlja diskretizacijo porazdelitve faktorjev tal pri dani intenziteti gibanja tal in izbrani frekvenci.

Za vsak model faktorjev tal in za vsako percentilno krivuljo potresne nevarnosti za referenčna trdna tla se nato izračuna krivulja potresne nevarnosti za kontrolno točko na izbrani lokaciji. Rezultat predstavlja 700 krivulj potresne nevarnosti za vsako kontrolno točko, ki se nato uporabijo za izračun srednje krivulje in percentilnih krivulj potresne nevarnosti ter pripadajočih spektrov enotne potresne nevarnosti.

V poglavju 6 preliminarne poročila PSHA, Revizije 1, je podan kratek povzetek občutljivostnih analiz. Vključitev tega poglavja je bila predlagana s strani revidentov, saj omogoča dodaten vpogled v rezultate analize potresne nevarnosti. Poglavje vsebuje pomembne informacije glede vpliva različnih parametrov na analizo potresne nevarnosti. Izkaže se, da je vpliv epistemičnih negotovosti predvsem posledica negotovosti pri modelu gibanja tal. To se bo verjetno deloma spremenilo v Reviziji 2 poročila analize potresne nevarnosti, saj je bila zahtevana bolj striktna implementacija negotovosti za model potresnih izvorov.

Zaključki študije so podani v poglavju 7, ki je razdeljeno na dva dela: prikaz rezultatov študije in primerjava z rezultati analize potresne nevarnosti iz leta 2004. Edina tehnična pripomba na ta del je bila, da primerjava spektrov enotne potresne nevarnosti za referenčna trdna tla iz trenutne analize s tistimi iz leta 2004 ni primerna, saj se zaradi uporabe enostopenjskega postopka za račun faktorjev tal spektri enotne potresne nevarnosti za referenčna trdna tla ne nanašajo na lokacijo Krškega. Rezultati analize potresne nevarnosti za površje so bili primerljivi s tistimi iz leta 2004.

Revizija 1 verjetnostne analize potresne nevarnosti za izbrano lokacijo je vključevala bolj napreden model gibanja tal in bolj napredno ovrednotenje vpliva tal na lokacijah Krškega na rezultate PSHA. Zaradi tega na ta dva dela dokumenta ni bilo kritičnih pripomb s strani revidentov. Največ pripomb mednarodne revizijske skupine se je nanašalo na poglavje 3, kar je terjalo izvedbo nove revizije PSHA in izdajo novega poročila PSHA, Revizija 2. Mednarodna revizijska skupina je podala in utemeljila 192 predlogov za izboljšave. Večina teh predlogov je bila bolj uredniške narave, medtem ko je bilo veliko predlogov oz. zahtev za izboljšanje modela potresnih izvorov, kar je dokumentirano v revizijskem poročilu, ki obsega 63 strani (KRS001-PIER-R0, 2024).

Dodatno je bila izvedena še revizija implementacije predlogov za popravke analize potresne nevarnosti iz druge faze projekta ter neodvisni izračun skoraj vseh korakov analize. To delo je opravila revizijska skupina FGG/ARSO. Podanih je bilo 11 predlogov za izboljšave, medtem ko so bili rezultati neodvisnega izračuna potresne nevarnosti skladni z rezultati preliminarne poročila PSHA Revizije 1 v okviru dogovorjene tolerance. Izsledki te revizije, skupaj s prikazom rezultatov neodvisnega izračuna, so prikazani v poročilu (J2N-PSHA-V-R1, 2024), ki, skupaj z 11 prilogami, obsega 411 strani. Tako obsežen neodvisni izračun PSHA ni predviden niti s smernicami SSHAC.

5. Opis izdelave in neodvisnega pregleda preliminarne poročila PSHA Revizija 2

Prvi odziv na neodvisna revizijska mnenja, ki so bila izdana v začetku leta na podlagi pregleda preliminarne poročila PSHA Revizija 1, je izvajalec študije pripravil 15. in 20. februarja 2024. Sledilo je 7 tehničnih sestankov, in sicer 13. 3., 14. 3., 28. 3., 4. 4., 11. 4., 18. 4. in 19. 4. 2024. Nato je sledila delavnica 23. 4. in 24. 4., katere cilj je bil razrešitev najbolj kritičnih komentarjev v zvezi z modelom potresnih izvorov. V nadaljevanju, do izdaje tega poročila, je potekalo še 21 tehničnih sestankov: 29. 4., 2. 5., 6. 5., 9. 5., 16. 5., 22. 5., 30. 5., 6. 6., 13. 6., 20. 6., 27. 6., 11. 7., 18. 7., 25. 7., 1. 8., 8. 8., 14. 8., 22. 8., 27. 8., 5. 9., 18. 9., 26. 9., 3. 10. in 17. 10. 2024.

Na delavnici in tehničnih sestankih so bile usklajene rešitve za predloge popravkov PSHA iz revizijskih mnenj. Dogovorjeno je bilo, da bodo izvajalci analize potresne nevarnosti v revizijo pošiljali posamezna poglavja poročila. Do sedaj so bila poslana in pregledana poglavja od 1 do 4 preliminarne poročila PSHA Revizije 2. Za ta poglavja so bili razrešeni praktično vsi tehnični komentarji iz revizije. V nekaterih primerih je bila zahtevana zgolj dodatna razlaga (npr. bolj natančna opredelitve modela aseizmičnega zdrsa).

Največje spremembe PSHA Revizije 2 se odražajo v modelu potresnih izvorov, ki obsega modele Af, Bf, Ef, Ff in Df. Modela A in B potresnih izvorov, ki nista vključevala aktivnih prelomov, sta bila zamenjana z modeloma Ef in Ff, ki sta bila razvita z namenom upoštevanja morebitne prisotnosti slepih prelomov, ki jih ni možno oceniti glede na geološke strukture na površju. Več popravkov je bilo narejenih pri modeliranju aktivnih prelomov. Opuščen je bil prelom Orlica 2, modeliranih pa je več alternativnih scenarijev prelomov, dodan je nov potencialni prelom. Maksimalne magnitude prelomnih izvorov so bile na novo ovrednotene in so se v večini primerov povečale, na novo pa je bila ovrednotena tudi letna vrednost zdrsa na prelomih, ki se je prav tako večinoma povečal tudi zaradi bolj strogega kriterija za aseizmični zdrs.

Končnih rezultatov PSHA, Revizija2, še ni. Vmesni preliminarni rezultati se že preverjajo z neodvisnimi izračuni. Delni rezultati so nakazali, da ni velikih razlik v potresni nevarnosti med posameznimi modeli potresnih izvorov, kar pomeni, da so posamezni modeli potresnih izvorov PSHA Revizije 2 med seboj primerljivi. Do te faze so bili izvedeni neodvisni izračuni za posamezne potresne izvore PSHA na referenčni trdnih tleh, in sicer za vsak alternativni model potresnih izvorov. Rezultati so v mejah toleranc za vse potresne izvore.

Predvidevamo, da bo izvajalec analize potresne nevarnosti preostala poglavja Revizije 2 analize potresne nevarnosti poslal v pregled v roku dveh mesecev. Sledila bo revizija preostalih poglavij in izdelava končnih neodvisnih strokovnih mnenj ter neodvisni izračun PSHA Revizije 2 za JEK2.

6. Sklep

Projekt verjetnostne analize potresne nevarnosti za lokacijo JEK2 je v zaključni fazi. Rezultat prve faze projekta (2015–2018) je bil predstavljen v preliminarne poročilu PSHA Revizija 0 (RIZZO/GeoZS). Druga faza projekta (2019–2021) je obsegala neodvisno revizijo (FGG/NAA/ARSO) in razvoj neergodičnega modela gibanja tal za lokacijo Krškega oziroma jugovzhodne Slovenije (NAA/FGG). Tretja faza projekta se je začela leta 2022 in je bila razdeljena v tri naloge. Prva in druga naloga sta že zaključena, tretja naloga, ki obsega pripravo končnega poročila PSHA, pa je v zaključni fazi. Novembra

2023 je že bilo izdano preliminarno poročilo PSHA, Revizija 1 (RIZZO/NAA/GeoZS). Rezultati analize potresne nevarnosti so bili precej podobni tistim iz leta 2004.

Tretja faza projekta vključuje tudi neodvisno revizijo. Upoštevanje predlogov revidentov iz druge faze projekta PSHA pri pripravi preliminarne poročila PSHA, Revizija 1, je preverjala neodvisna revizijska skupina FGG/ARSO, ki je preverila tudi izračun PSHA. V letu 2023 pa se je tvorila še neodvisna mednarodna revizijska skupina, ki jo prav tako vodi FGG v sodelovanju z Lettis Consultants International iz ZDA (LCI). Izsledki te revizije so pokazali, da so bili izračuni narejeni pravilno in da so bile vključene vse ključne zahteve revidentov iz 2. faze projekta. Mednarodna neodvisna revizijska skupina pa je predlagala več različnih popravkov modela potresnih izvorov. Predlagan je bil ponovni razmislek glede modeliranja aktivnih prelomov in pripadajočih maksimalnih magnitud, še posebej tistih, ki imajo pomemben vpliv na potresno nevarnost. Predlagana je bila opustitev modeliranja verjetnosti obstoja za aktivne potresne prelome, popravek modela aseizmičnega zdrsa, razmislek glede ustreznosti modela pogostosti potresov na aktivnih prelomih in ponovno ovrednotenje zdrsa na letni ravni za nekatere aktivne prelome. Predlogi za popravke preliminarne poročila PSHA Revizij 1 so že bili usklajeni. V teku je priprava preliminarne poročila PSHA, Revizija 2.

Izvajalec je že predložil v pregled prva štiri poglavja od osmih poglavji preliminarne poročila PSHA Revizije 2. PSHA, Revizija 2, vključuje spremembe predvsem v modelu potresnih izvorov. Dva modela potresnih izvorov predhodne različice PSHA, ki nista vključevala aktivnih prelomov, sta bila zamenjana z modeloma, ki upoštevata morebitno prisotnost slepih prelomov, ki jih ni mogoče oceniti na podlagi površinskih geoloških struktur. Izvajalci študije so opravili tudi številne popravke pri modeliranju aktivnih prelomov. Opuščen je bil prelom Orlica 2, dodan pa je bil nov potencialni prelom. Na novo so bili zasnovani scenariji prelomov. Poleg tega so bile maksimalne magnitudo prelomnih izvorov ponovno ovrednotene in so se večinoma povečale. Povečala se je tudi letna vrednost zdrsa za prelome, k čemer je prispevalo tudi zmanjšanje aseizmičnega zdrsa na prelomih.

Do sedaj so bili izvedeni tudi neodvisni izračuni PSHA, Revizija 2, vendar le za referenčna trdna tla za posamezne potresne izvore petih alternativnih modelov potresnih izvorov, pri čemer so se rezultati neodvisnega izračuna dobro ujemali z preliminarnimi rezultati PSHA.

Končnih rezultatov PSHA, Revizija 2, še ni, vendar se predvideva, da bo izvajalec v naslednjih mesecih pripravil končno poročilo. Sledila bo revizija preostalih poglavij ter izdelava končnih neodvisnih strokovnih mnenj in neodvisnih izračunov verjetnostne analize potresne nevarnosti za lokacijo JEK2.

Rezultati verjetnostne analize potresne nevarnosti predstavljajo vhodni podatek za nadaljnje analize, s katerimi se dokazuje varnosti konstrukcij, sistemov in komponent jedrskih elektrarn. Za izpolnitev zakonsko predpisanih zahtev za varnost jedrskih in sevalnih objektov je nujno, da so konstrukcije, sistemi in komponente skrbno projektirani ter da se njihova varnost dokazuje z analizo potresnega tveganja. Ta analiza mora vključevati tudi intenzitete gibanja tal s precej daljšimi povratnimi dobami od 10.000 let in sicer zato, da se lahko ustrezno ovrednoti ciljno zanesljivost jedrskih elektrarn.

Ker bo, ne glede na končni rezultat PSHA, potresna nevarnost na lokaciji JEK2 relativno visoka, bo za to lokacijo treba precej pozornosti posvetiti skrbnemu projektiranju konstrukcij, sistemov in komponent, pomembnih za jedrsko varnost. Še bolj pomembna pa bo analiza potresnega tveganja, ki je sestavni del zagotavljanja potresne varnosti elektrarn, saj bo PSHA za lokacijo JEK2 temeljila na sodobnem neergodičnem modelu gibanja tal, ki na nov način ovrednoti aleatorno variabilnost in epistemično

negotovost intenzitete gibanja tal, kar se mora na konsistenten način odražati tudi pri analizi potresnega tveganja.

7. Viri

Abrahamson, N.A., Babič, A., Dolšek, M. (2021). Evaluation of Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Engineering Solutions for Building New NPP JEK 2: Task 1D - Non-Ergodic Ground-Motion Model for JEK 2. Final Report, Revision 1, 30th April 2021.

Abrahamson, N.A., Babič, A., Dolšek, M. (2024). Evaluation of Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Engineering Solutions for Building New NPP JEK 2: Task 1D - Non-Ergodic Ground-Motion Model for JEK 2. Final Report, Revision 2, 14th March 2024.

Anderson, J.G., Uchiyama Y. (2011). A Methodology to Improve Ground-Motion Prediction Equations by Including Path Corrections. Bull. Seismol. Soc. Am. 101(4), 1822-1846. doi: 10.1785/0120090359.

Anderson, J.G. Brune, J.N. (1999). Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption. Seismol. Res. Lett. 70(1), 19-28. doi: 10.1785/gssrl.70.1.19.

ARSO (2015). Izdelava projektne in druge dokumentacije za odlagališče NSRAO Vrbina v občini Krško: Izvedba seizmološke analize lokacije (seizmološki del) za objekt odlagališče NSRAO Vrbina, Rev.1, ARSO, marec 2015.

ARSO (2018). Izvedba seizmološke analize lokacije (seizmološki del) za objekt odlagališče NSRAO Vrbina, Rev. 1, Avtorji: Živčič, M., Šket Motnikar, B, Gosar, A, Urad za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje, marec 2015.

ARSO (2020). Živčič, M., Čarman, M., Zupančič, P., Ložar Stopar, M., Seismic records from ARSO waveform database, Slovenian Environment Agency (ARSO), Ljubljana, 2020.

ARSO (2021). Potresna nevarnost Slovenije – projektni pospešek tal. Karta: http://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/Karta_potresne_nevarnosti_2021.jpg (20. 4. 2022), Tolmač karte: http://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/Tolmac_karte_potresne_nevarnosti_2021.pdf (24. 4. 2023) in pregledovalnik: <https://gis.arso.gov.si/portal/apps/opdashboard/index.html#/48ad6a51977c4ee886722a3c09c4f470?locale=s>

Atkinson, G.M. (2006). Single-Station Sigma. Bull. Seismol. Soc. Am. 96(2), 446-455. doi: 10.1785/0120050137.

Baker, J. W., Bradley, B. A., and Stafford, P. J. (2021). Seismic Hazard and Risk Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, England .

Bayless, J. and N. Abrahamson (2019). Summary of the BA18 Ground-Motion Model for Fourier Amplitude Spectra for Crustal Earthquakes in California, Bulletin of the Seismological Society of America, October 2019, Volume. 109, pp. 2088–2105, doi: 10.1785/0120190077.

- Chiou, B. S.-J., & Youngs R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30:3, pp. 1117.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
- IAEA-SSG-9 (2022). Seismic hazards in site evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-9, Rev.1, Vienna, Januar 2022.
- J2N-PSHA-V-R1 (2024). Preliminary independent review of the PSHA implementation in accordance with Phase 2 and verification of the PSHA calculations for JEK2 and NEK sites, Preliminary report, Revision 1, J2N-PSHA-V-R1, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT (IKPIR), Republic of Slovenia, Ministry of Natural Resources and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency (ARSO) (Authors: Dolšek M, Babič A, Fazarinc N, Šket-Motnikar B, Rajh G, Zupančič P, Kuhar P), 2 Februar 2024.
- KRS001-PIER-R0 (2024). Review of Probabilistic Seismic Hazard Analysis for JEK 2 and NEK sites Preliminary Independent E.valuation Report, Revision 0, 5 January 2024, FGG-IKPIR (Dolšek M.), LCI (Seifried A.E., Toro A.E., Wong I.G., Lettis W.R.).
- Lin P.-S., Chiou B., Abrahamson N., Walling M., Lee C.-T., Cheng C.-T. (2011). Repeatable Source, Site, and Path Effects on the Standard Deviation for Empirical Ground-Motion Prediction Models. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101(5), 2281-2295. doi: 10.1785/0120090312.
- PSHA (1994). Fajfar, P., Lapajne, J., Aljinović, B., Breška, Z., Logar, J., Matičec, D., Poljak, M., Prelogovič, E., Premru, U., Ribarič, V., Sočan, S., Vidic, T., Živčič, M., Jevšenak, B., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. Probabilistic assessment of seismic hazard at Krško nuclear power plant, Revision 1. Ljubljana: University of Ljubljana, Department of Civil Engineering, Institute of Structural and Earthquake Engineering.
- PSHA (2004). PSR NEK-2.7.2-Rev.1 2002-2004. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT (with subcontractors) (Eds: Fajfar P in Lapajne J).
- Rodriguez-Marek, A., E. Rathje, J. Ake, C. Munson, S. Stovall, T. Weaver, K. Ulmer, and M. Juckett (2021). Documentation Report for SSHAC Level 2: Site Response, Research Information Letter RIL2021-15, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA.
- Sabetta, F., Pugliese A. (1996), Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, No. 2, 337-352.
- USNRC (2018). Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies. US NRC, NUREG-2213, October 2018.