



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Tonko Bogovac

**PROCJENA PROMJENA OBALNE LINIJE
ŠLJUNČANIH PLAŽA NA HRVATSKOM
JADRANU USLIJED PODIZANJA RAZINE
MORA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Tonko Bogovac

**PROCJENA PROMJENA OBALNE LINIJE
ŠLJUNČANIH PLAŽA NA HRVATSKOM
JADRANU USLIJED PODIZANJA RAZINE
MORA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

prof. dr. sc. Dalibor Carević
izv. prof. dr. sc. Kristina Pikelj

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Natural Sciences

Tonko Bogovac

**EVALUATION OF SHORELINE CHANGE
ON GRAVEL BEACHES ON THE
CROATIAN ADRIATIC CAUSED BY SEA
LEVEL RISE**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:

Prof. Dalibor Carević

Assoc. prof. Kristina Pikelj

Zagreb, 2025.

Ova doktorska disertacija izrađena je na interdisciplinarnom doktorskom studiju Oceanologije na Geološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakultetu Sveučilišta u Zagrebu uz mentorstvo prof. dr. sc. Dalibora Carevića i izv. prof. dr. sc. Kristine Pikelj. Istraživanje i izrada rada izvršena je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a mjerenje na plaži Ploče, Rijeka. Izrada disertacije financirana je u sklopu projekta ”**Beachex**: održiva gradnja plaža – gradnja novih i povećanje kapaciteta postojećih plaža (2019. – 2023.)” koji je prijavljen pod šifrom DOK-2021-02-9108 . Znanstveni projekt Beachex provodili su Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Lancaster Environment Centre - Lancaster University, financiran je iz Programa „Znanstvena suradnja“ Hrvatske zaklade za znanost koji je financirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda u sklopu Operativnog programa Učinkoviti ljudski potencijali 2014. - 2020.

Zahvala

Nijedna disertacija ne bi bila moguća bez podrške nebrojeno mnogo ljudi, ali neke ipak treba pobrojati.

Za početak, hvala roditeljima Ivani i Aci te sestri Hani koji su mi bili podrška. I koji su me dovoljno puno puta pitali kad ću doktorirat da sam valjda i doktorirao.

Dari, hvala ti na medvjedoј vjeri u mene uvijek, pa i onda kad je ja nisam imao.

Hvala mentorima, Daliboru i Kristini. Ništa od ovog ne bi nastalo bez vas i vašeg strpljenja, znanja, diskusije, ideja i truda. Hvala Kristini i na mjerenjima sa Sakaruna.

Suzy, hvala na gostoprimstvu, jednako tako, hvala i na crvenoj kemijskoј.

Geofizičkom odsjeku PMF-a hvala na podacima o plimnim oscilacijama u Bakru.

Dodatno hvala: Damjanu na komentarima, Filipu na mjerenjima šljunka, Franji na neprocjenjivom znanju i Tinu što je, sve što je Franjo sastavio, pomogao da bacimo u more u nadi da ćemo za par mjeseci to i pronaći.

Kolegici Ivi i njenom ramenu hvala što su me slijedili kroz više studijskih programa. Koji sljedeći studij upisujemo?

Posebnu zahvalu zasluųuje i ekipa iz Savske: Klaudija na dobrodošlici, Tin na kavama, Robert na ručku za 5, Katarina na entuzijazmu, Hanna na kiflekima i Martina na slatkišima. Bez vas nijedno podne više nije isto.

Susjedima iz Zapruđa, Rurisu, Drezgi i Gospođi, hvala na partijama Wingspana i za printer koji je radio kada je najviše trebao.

Procjena promjena obalne linije šljunčanih plaža na hrvatskom Jadranu uslijed podizanja razine mora

Tonko Bogovac

Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Plaže i obale općenito ubrzano erodiraju zahvaljujući ljudski izazvanim klimatskim promjenama i posljedičnim porastom srednje razine mora. Globalna nastojanja da se plaže sačuvaju gradnjom ili sve učestalijim dohranjivanjem rezultirala su još većom naseljenošću, turizmom i izgradnjom obalnog prostora, povećavajući budući rizik i štetu. Hrvatske plaže nisu iznimka te je kod njih praksa dohrane plaža sve učestalija. Obala se brzo gospodarski razvija, a istovremeno izostaje strategija u upravljanju obalom i plažama, registar plaža kao temeljni resurs u turizmu, ali i upotreba suvremenih alata poput numeričkih modela za donošenje odluka o upravljanju plažama. Stoga su u ovom radu za hrvatsku obalu Jadranskog mora objedinjeni podatci nekoliko izvora o plažama i njihovim svojstvima. Analizirano je dohranjivanje plaža za razdoblje 2015. - 2019., kalibriran je i validiran numerički model XBeach-Gravel za uvjete na Jadranu i potom iskorišten za prognozu promjene obalne linije džepne umjetne šljunčane plaže Ploče i prirodne plaže Sakarun pri budućem porastu srednje razine mora na Jadranu. Rezultati pokazuju da je Hrvatska izuzetno bogata uskim džepnim šljunčanim plažama a koje su među najčešće dohranjenim plažama u Europi. Dohrane se u Hrvatskoj provode pred sezonu kupanja, tj. zimi ili u rano proljeće, a koriste najmanje materijala po metru dužnom plaže u usporedbi s dohranama u ostalim europskim zemljama dok troškovi dohrane pokazuju pozitivan trend. Temeljem primjera plaža Ploče (Kantrida, Rijeka) i Sakarun (Dugi otok), širina hrvatskih plaža potencijalno će se suziti za približno trećinu zahvaljujući porastu srednje razine mora od 0,84 metra do kraja 21. stoljeća - ukoliko nemaju prostor za povlačenje prema kopnu.

Izvorni rad je na hrvatskom jeziku i sadrži 147 stranica, 69 slika, 19 tablica i 127 literaturnih navoda.

Ključne riječi: džepne plaže, erozija, dohrana, XBeach-Gravel

Mentori:

Prof. dr. sc. Dalibor Carević

Izv. prof. dr. sc. Kristina Pikelj

Ocjenjivači:

Prof. dr. sc. Goran Lončar

Dr. sc. Hrvoje Mihanović

Dr. sc. Suzana Ilić

Rad prihvaćen: DATUM

University of Zagreb

Faculty of Natural Sciences

Department of Geology

Doctoral dissertation

Evaluation of shoreline change on gravel beaches on the Croatian Adriatic caused by sea level rise

Tonko Bogovac Department of Water Research, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb

Beaches and the shoreline in general are eroding at an increasing rate caused by man-made climate change and the consequential mean sea level rise. Efforts to combat beach erosion by the use of hard structures and the increasingly popular beach nourishment resulted in more tourism, development and population growth at the coast, increasing risk and damages. Croatian beaches and coast are no exception, with beach nourishment becoming more frequent. Croatian coast is quickly developing while the implementation of a national beach management strategy, development of a beach registry and the use of numerical models in decision-making is still lacking. This thesis collects data on beaches and their characteristics on the Croatian coast from multiple sources. The use of beach nourishment is also analyzed for the period from 2015 until 2019. The XBeach-Gravel numerical model for the use case of the Croatian Adriatic wave-climate was also calibrated, validated and then used to evaluate the shoreline change of an artificial gravel pocket beach Ploče and a natural gravel pocket beach Sakarun at an expected future mean sea level. Results indicate Croatia has a large number of narrow pocket gravel beaches which are one of the most-often nourished beaches in Europe, but with the least amount of material used on average and with a growing trend in nourishment expenses. Successful modeling of Ploče and Sakarun beach demonstrates an expected loss of approximately one third of beach width for a mean sea level rise of 0.84 m expected at the end of the 21st century in the case of beaches being unable to move onshore.

This work contains 147 pages, 69 figures, 19 tables and 127 references. Original work written in Croatian.

Keywords: pocket beaches, erosion, beach nourishment, XBeach-Gravel

Mentors:

Prof. Dalibor Carević

Assoc. prof. Kristina Pikelj

Reviewers:

Prof. Goran Lončar

Dr. sc. Hrvoje Mihanović

Dr. sc. Suzana Ilić

Thesis accepted: DATUM

O mentorima

Prof. dr. sc. Dalibor Carević

Prof. dr. sc. Dalibor Carević zaposlen je na Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Njegovo područje interesa obuhvaća stabilnost niskofrekventnih obalnih građevina, mjerne tehnike u pomorskom inženjerstvu, mjerenja morskih struja, numeričko modeliranje interakcije mora s obalnim građevinama, kvalitetu mora u lukama te morfodinamički odazivi izgrađenih i prirodnih šljunčanih plaža s preko 50 radova i 300 citiranja te preko 20 međunarodnih izlaganja. Nositelj je 8 kolegija na svim razinama studija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu te je sudjelovao kao mentor na preko 30 diplomskih i završnih radova te tri doktorske disertacije. Vodio je projekte ECOMARINA i BEACHEX financirane od HRZZ-a te projekt „Ecosystem-based strategies for remediation of brownfield sites (2023-2024)” financiranom od Iceland Liechtenstein Norway Grants, a surađivao je i na brojnim drugim domaćim i međunarodnim projektima. Aktivno sudjeluje u radu stručnih udruženja građevinara te u izradi stručnih radova za projektiranje pomorskih konstrukcija - konceptijska i idejna rješenja, studije, razrade idejnih i glavnih projekata te prikupljanje hidrauličkih, hidroloških, meteoroloških, geodetskih i pravno-upravnih podloga. Upisan je u registar istraživača pod matičnim brojem 265192.

Izv. prof. dr. sc. Kristina Pikelj

Izv. prof. dr. sc. Kristina Pikelj zaposlena je na Geološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Njena ekspertiza obuhvaća sediment morskog dna i priobalja, njegovo porijeklo, zakonitosti raspoređivanja, interakciju sedimenta s morskim organizmima te različit utjecaj čovjeka na taložne okoliše mora i priobalja. Značajan dio njenih istraživanja obuhvaća različite aspekte erozije, geomorfologije i antropogenog utjecaja na različite obalne oblike i obalu općenito. Nositeljica je desetak kolegija iz područja geologije mora i geologije okoliša na svim razinama studija na matičnom Sveučilištu, te Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, te je voditeljica je doktorskog studija Oceanologija pri PMF-u. Sudjelovala je i sudjeluje kao suradnica i voditeljica na više od 20 znanstvenih, stručnih i edukativnih projekata, a autorica je ili koautorica na 33 znanstvena članka. Intenzivno se bavi popularizacijom znanosti i aktivna je provođenju aktivnosti cjeloživotnog obrazovanja. Suraduje s kolegama iz više znanstvenih i obrazovnih ustanova u Hrvatskoj i u Europi.

Extended abstract in English

Croatia's numerous beaches are responsible for a fifth of the nation's GDP (Orsini et al., 2018) while also being under intense environmental pressure. Beach erosion, driven by mean sea level rise (MSLR and SLR for short), increasing storm intensity and human activity, threatens these natural coastlines both in Croatia but also in Europe. Globally, beach erosion is a widespread issue, with a quarter of the world's shorelines eroding at an average rate of 0.5 meter annually (Luijendijk et al., 2018). Mitigation efforts, such as beach nourishment, are common but only provide temporary relief, as they do not address the root causes of erosion and can potentially worsen it (Phillips et al., 2006; Speybroeck et al., 2006). Currently, most European countries nourish sandy coastlines every 4 to 30 years with anywhere from 5 to 40 m^3 of sand nourished per meter length of beach yearly in average (Hanson et al., 2002). Adequate climate adaptation measures, such as nourishment, could provide a theoretical ninefold reduction in future damages (Hinkel et al., 2010). However, Croatia's decentralized management of its beaches complicates efforts to protect them, with each municipality lacking the necessary resources and knowledge for implementing long-term solutions, while nourishment is being used unsparingly. Although Croatia's economy heavily relies on tourism which is significantly tied to the beaches, no comprehensive data exists on the number of beaches nor on erosion or nourishment efforts, raising concerns about their future.

Additionally, gravel beaches like those in Croatia are under-researched compared to sandy beaches (Jennings et al., 2002; Nel et al., 2014), limiting the ability to predict their future under increasing environmental pressures. The use of numerical models is prevalent in modelling of sandy shores, however scarce measurements due to harsh wave conditions and a smaller proportion of gravel beaches in total resulted in a lack of numerical models for gravel beaches (Pedrozo-Acuña et al., 2006; Masselink et al., 2014; Orford et al., 2011). The model available for simulating impacts of storm waves on gravel beaches, XBeach-Gravel (XBG for short), is effective in high energy conditions (significant wave height H_s from 6 to 10 m, T_p from 6 to 10 s (McCall et al., 2015)) but lacks validation and use in mild wave conditions common to Croatia's Adriatic coast. Adding to this problem, as climate change causes MSLR, beaches are put under additional stress (Hinkel et al., 2010). With an increase in mean sea level, the extreme sea level (ESL for short) also increases which in turn increases the rate of erosion (Jiménez et al., 2012). Today's once-in-a-century ESL event will become tomorrow's yearly event by increasing between 0.5 to 0.8 meters (Vousdoukas et al., 2017). Such an increase will expose

about 5 million people in Europe to 100-year return period ESL events - yearly (Vousdoukas et al., 2017). Without adaptation about 5% of the global population will be exposed to coastal flooding events yearly (Hinkel et al., 2014). Pocket beaches, including gravel beaches in Croatia, are extremely vulnerable to MSLR and ESL due to their short width (Monioudi et al., 2017). Numerical models have been used to evaluate the impact of MSLR on sandy pocket beaches, including the use of the XBeach model. In the Aegean sea, an increase in MSL of 0.6 m will cause the loss of 30% up to 90% of sandy pocket beaches (Monioudi et al., 2017), while similar results show a loss for Mallorca (Enriquez et al., 2017) and Cyprus (Monioudi et al., 2023). As climate change worsens, it remains uncertain whether Croatia's gravel pocket beaches will face a similar fate.

This thesis sets out to provide answers to 3 key research questions. First, to make an inventory of Croatian beaches and nourishment practices, so that nourishment practices in Croatia can be compared to the ones in the rest of Europe. For that purpose, data on 1904 Croatian beaches was collected with additional data on beach nourishment for 256 beaches for the period between 2015-2019. Data on beaches includes their length, area and sediment composition, providing the conclusion that Croatia indeed is rich with many pocket (around 200 m) gravel and rock beaches. This data was collected from previous national efforts for developing a beach registry, but the results of which have been published only in segments per each onshore county and never unified or observed nationally (Institut za turizam, 2015; Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija, 2015; Razvojna agencija Ličko-senjske županije – LIRA, 2017; Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija, 2014; IGH Urbanizam and Horwath & Horwath Consulting, 2015; SAFEGE, 2015; Trames Consultants, 2015). Additionally, data on beach nourishment was obtained through a questionnaire from 89 out of 130 municipalities and cities onshore who's responsibility is beach management as beaches in Croatia are almost entirely publicly owned. The questionnaire collected data on the amount of sediment, sediment size and price as well as beach location for the period from 2015 until 2019. Both sets of data (beach registry and the questionnaire data) were then used to determine general properties of beaches in Croatia and to repeat the analysis on beach nourishment by the authors Hanson et al., 2002. This provided a clear comparison of Croatian beach nourishment to other EU countries and USA. The number of beaches in Croatia determined through this method is 1904, in line with previous estimates of around 2000 (Favro et al., 2013). Most of the beaches are made of predominantly gravel, their median length is 200 m with a width of 7.3 m. This result clearly shows that Croatia is a country of pocket gravel beaches, and not of long sandy shores as it likes to be portrayed and marketed. In Croatia the cost of nourishment is showing a positive trend, with more than 828 nourishments being performed in the 5-year period (2015-2019) and growing. In comparison to EU data from Hanson et al., 2002, Croatia largely deviates from European practices since it nourishes beaches biannually with around 0.55 m³ of sediment per meter of shoreline per year, while other countries nourish once per 5 years or less and with an order of magnitude larger amounts of sediment. This finding supports the conclusion that

Croatia's beach nourishment practice is different from the nourishment performed in the rest of Europe. This could be because of the low erosion rates on the eastern Adriatic in combination with the pressure of the local tourism-dependent communities that advocate for yearly nourishment to provide a comfortable experience to visitors. However, the data obtained from both municipalities and previous research efforts varies in use of measurement methods while the observed period for nourishment is rather short. So further research is required, but the results are indicative of a significant difference in practice between Croatia and the rest of Europe.

The second hypothesis focused on the calibration of the numerical model XBG for testing if the model could be used to predict the impact of mild wave conditions typical of the Croatian Adriatic on a constructed beach Ploče, near the city of Rijeka. The model showed good results for the case of H_s around 6 to 10 m (McCall et al., 2015), however conditions on the Croatian Adriatic shore are rather mild with H_s rarely reaching 4 m due to a large number of islands reducing wind fetch. The model was first calibrated for the data obtained in the wave canal in Hannover where mild wave conditions were tested (H_s up to 1.2 m) (López de San Román-Blanco et al., 2006). By using a set of simulations with different hydraulic conductivity k_x and transport coefficient γ values, the best performing parameter combination was selected based on Brier skill score values (Van Rijn et al., 2003). The model demonstrated a high BSS of up to 0.9 out of 1 which is regarded as excellent in predicting profile change in the wave canal for mild wave conditions. However, the used transport coefficient γ value of 3 indicating that the gravel used in the canal was more mobile than expected, possibly due to fluvial gravel being used (López de San Román-Blanco et al., 2006).

The same procedure was then used to calibrate the model for Ploče beach based on topographic measurements of profile change caused by mild storm waves measured on the hydrographic buoy 2.5 km southeast of the beach (Tadić et al., 2022). Additionally, the Ploče beach was covered with a camera that allowed for a determination of wave runup on the beach during daytime (Bujak et al., 2023). The topographic, wave and runup measurements were performed through 2020, with the first topographic following immediately after beach nourishment. Topographic measurements were performed with a pilotless drone usually after strong wave conditions and when the sea was clear and calm, allowing for resolution of up to ± 5 cm at 5 meters of depth (Tadić et al., 2022). Using the yearly topographic measurements, the westmost beach profile was selected to observe wave induced sediment changes. This selection was made because the profile showed the least of longshore sediment transport after initial storms, making it suitable for XBG which can only account for cross-shore profile change (Tadić et al., 2022). Additionally, Ploče beach blueprints were used to determine the position of a non-erodible layer which was also accounted in the model. The wave buoy provided 30-minute averages of wave conditions, significant wave height and wind direction. Sea level oscillation data for Ploče beach was obtained from the mareograph in Bakar, about 20 km southeast from Ploče. Access to sea level oscillation data was made possible by the generous help from the Geophysics department of the Faculty of science, University of Zagreb. Two wind events were selected for calibration

of the model: first with a maximum and average H_s of 0.72 m and 0.47 m lasting for 18.5 hours and a second event with a maximum and average H_s of 0.9 and 1.28 m and lasting for 25 hours. The simulations were performed using the entire wave record of both events. A total of 30 simulations included combinations of $k_x = 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$ and $0.5 \frac{m}{s}$ and $\gamma = 0.25; 0.5; 1; 1.5$ and 3 . The model reached BSS values greater than 0.9 (labelled as excellent) for hydraulic conductivity $k_x = 0.3 \frac{m}{s}$ and the transport coefficient γ of 0.25. This result was then validated on the strongest storm of the season with H_s reaching 2.4 m, again resulting in an excellent Brier skill score. In all 3 modelled storm events, wave runup and R2% was accounted by the model after wave setup was introduced. This was a significant improvement from the results of McCall et al., 2015 where the model obtained a median BSS value of 0.54 (fair) for berm formation at mild wave conditions. So, it was concluded that XBG could model the changes on the profile caused by wave conditions considered mild and typical of the Adriatic sea. Therefore, the XBG model can be used to inform decisions in beach management and construction in Croatia. The limitation of this approach was in the use of data only for beach Ploče, as well as in selecting profiles for modelling where the longshore transport was considered minimal but was not in fact zero.

The final hypothesis in this thesis was that the shoreline on Ploče and Sakarun beach will retreat due to the impact of storm waves at the future MSL. In contrast to the constructed Ploče beach, Sakarun beach is a naturally formed gravel pocket beach located on the western shore of Dugi Otok. Today, Sakarun is a gravel beach due to the removal of *Posidonia Oceanica* banquetts which protected the sand component (Pikelj et al., 2022a). Topographic measurements on Sakarun were performed between September of 2020 and May of 2021 using a precise GPS positioning method VRS RTK and a CROPOS VPPS correction (Pikelj et al., 2022a). For both Ploče and Sakarun an effective doubling of extreme sea level will occur: 1.51 m for Sakarun and 1.67 m for Ploče while the return period of such events stays the same at about 5 years (Lončar et al., 2022). This is due to the MSL increasing by 0.84 m on the Adriatic at the end of the 21st century (Vilibić et al., 2000; IPCC, 2022) and an increase in extreme sea level (ESL for short) of the same magnitude (Marcos et al., 2009; Lionello et al., 2012). This presents a significant increase in risk of beach erosion and coastal flooding, even though the no changes are expected in storm intensity (Belušić Vozila et al., 2021), wave height (Bonaldo et al., 2020) or storm surges (Međugorac et al., 2021). Such ESL in combination with the current wave conditions was expected to push sediment higher up the beach and therefore cause shoreline retreat. For both beaches H_s of 1, 2 and 3 m was used (Korres et al., 2021; Lončar et al., 2014) with wave steepness of 0.01, 0.02, 0.03 and 0.04 for Sakarun and 0.03, 0.04 and 0.05 for Ploče. Previously calibrated coefficients for hydraulic conductivity and transport coefficient for Ploče beach were used for both Ploče and Sakarun, as no wave measurements were available for Sakarun. The conditions were forced constantly for 8 hours at current (0 m) and 3 future MSL: 0.2 (RCP4.5 and 8.5 in 2050), 0.55 (RCP4.5 in 2100) and 0.84 m (RCP8.5 in 2100) (IPCC, 2022). XBG simulations showed an average shoreline retreat between 5 to 6 meters on both

beaches for the worst-case ESL scenario expected in RCP8.5. Such a shoreline retreat would be devastating for about half of the beaches in Croatia due to the previously determined median width of 7.3 m. The results also indicate that lower wave steepness of 0.01 for Sakarun will move the sediment further onshore, as also pointed out by previous research (Masselink et al., 2010). Considering that the Sakarun and Ploče beach width is less than 20 m, with 20 m being the national average, this means a reduction in beach width of around 36%. This result is in-line with the similar research for beaches in Mallorca (Enríquez et al., 2017) and Aegean Sea (Monioudi et al., 2017), where an even higher retreat is expected on sandy beaches. Considering that many beaches near urban areas, the ones most relied on by Croatia's tourism industry, have no available space to migrate onshore due to existing infrastructure, coastal squeeze should be expected. Such is the case of Ploče beach due to the pool complex directly behind the beach. The limitation of the approach used here is in the use of XBG, the only one-dimensional gravel numerical model available at the time - which in turn excludes longshore sediment transport. Also, the shoreline is presented by a single point on the middle of the beach, which means that the observed shoreline displacement may not be representative of the entire beach. However, the agreement with previous research efforts on sandy beaches in the Mediterranean certainly indicate a worrisome retreat of the shoreline.

In conclusion, this thesis provided data on Croatian beaches by merging multiple existing sources and, for the first time, collecting data on beach nourishment being performed in Croatia. These practices are largely unregulated and follow "intuition" from local authorities rather than scientific consensus or European best practices. This in turn sparked interest to see if XBG could be used as a tool to inform local policy and construction practices, as well as to model shoreline change due to an increase in MSL. Calibration and validation performed showed XBG could be used for Croatian gravel beaches exposed to mild wind waves, if adequate data on topographic changes and wave conditions are provided. Using the XBG model, the impact of storm waves on shoreline position was tested at the expected future ESL values caused by the increase in MSL. The results are a cause for concern as a shoreline retreat and beach migration onshore can be expected, putting infrastructure and tourism at risk.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Plaže i dohrana plaža u Hrvatskoj	9
2.1. Metodologija prikupljanja i obrade podataka o plažama i dohrani plaža	9
2.2. Rezultati i diskusija o plažama i dohrani u Hrvatskoj	16
3. Kalibracija numeričkog modela XBeach-Gravel	33
3.1. Uvodno o kalibraciji modela XBeach-Gravel	33
3.2. Metodologija kalibracije modela	34
3.2.1. Opis numeričkog modela XBeach-Gravel	34
3.2.2. Brierova ocjena prognoze modela	38
3.2.3. Opis eksperimentalnog postava u Hannoveru i postupka kalibracije	39
3.2.4. Opis plaže Ploče i provedena mjerenja	40
3.2.5. Postupak kalibracije XBeach-Gravel modela za plažu Ploče	57
3.3. Rezultati kalibracije i diskusija	60
3.3.1. Rezultati kalibracije za laboratorijske uvjete u Hannoveru	60
3.3.2. Rezultati kalibracije za plažu Ploče	64
3.3.3. Validacija kalibriranog modela za valni događaj G17 G18 K3	68
3.3.4. Verifikacija kalibriranog modela za segment valnog događaja G17 G18 K3	71
3.3.5. Pregled kalibriranih parametara i diskusija	74
4. Pomak obalne linije na plažama Ploče i Sakarun	77
4.1. Metodologija određivanja pomaka obalne linije na plažama Ploče i Sakarun	77
4.1.1. Postav modela XBeach-Gravel za procjenu pomaka obalne linije na plaži Ploče	77
4.1.2. Opis plaže Sakarun i postav modela XBeach-Gravel za procjenu pomaka obalne linije	87
4.1.3. Izmjereni i modelirani valni uvjeti na plaži Sakarun korišteni za predviđanje pomaka obalne linije	91
4.1.4. O određivanju dugoročnog, kratkoročnog i ukupnog pomaka obalne linije	99
4.2. Rezultati procjene pomaka obalne linije i rasprava	101
5. Zaključak	123

Bibliografija	125
Dodatak A. Parametri modela korišteni pri kalibraciji	136
Dodatak B. Parametri modela korišteni pri procjeni pomaka obalne linije	139
Dodatak C. Osjetljivost modela na nagib profila i kut unutarnjeg trenja	141
Životopis	147

1. *Uvod*

Hrvatska obala Jadranskoga mora bogata je brojnim plažama, pretežito šljunčanima i džepnima, koje su pod ugrozom zbog klimatskih promjena i turizma. Međutim, to je i globalni problem jer oko 30 % svjetske obale čine plaže (Bird, 1996). Iz satelitskih slika procjenjuje se da je oko 31 % svjetske obale pješčano i/ili šljunčano, a oko 25 % tih plaža ostvaruje gubitke erozijom intenzitetom od 0,5 m/godišnje ili više, posebno u zaštićenim morskim područjima (Luijendijk i dr., 2018). Europa također bilježi eroziju 27 % (Niesing, 2005) pješčanih obala. Glavni faktor koji doprinosi eroziji plaža i obale ljudsko je uplitanje u budžet sedimenta (Van Rijn, 2011). Ljudsko djelovanje pri tome ne mora aktivno dovoditi do gubitka plaža (npr. kao kod "rudarenja" plaža), već gubitak nastaje i kao pasivna ili neizravna posljedica klimatskih promjena, odnosno emisija stakleničkih plinova uzrokovanih čovjekovim spaljivanjem fosilnih goriva (Pilkey i dr., 2014). Klimatske promjene odražavaju se: kao porast srednje razine mora (skraćeno SRM), jačanje olujnih događaja, povećanje intenziteta erozije na obalama, povećanje ekstremnih razina mora, učestalije plavljenje obalnoga područja itd. (Phillips i dr., 2006), a što sve za posljedicu dovodi i do gubitka plaža.

Samo porast srednje razine mora do kraja stoljeća, neovisno o klimatskim scenarijima, uzrokovat će preko 17×10^9 \$ štete na obalama Europe (Hinkel i dr., 2010). Za očekivati je da će i 5 % svjetske populacije biti izloženo poplavama obale svake godine, sa štetom u iznosima i do 10 % BDP zahvaljujući porastu srednje razine mora i do 125 cm, ukoliko se ne primijene adekvatne mjere prilagodbe (Hinkel i dr., 2014). Dio razloga za ovakove procjene leži u gustoći naseljenosti obalnog područja koja je i tri puta veća od globalnog prosjeka (Small i dr., 2003). Do polovice 21. stoljeća može se očekivati porast populacije od 122 % u obalnom području niske nadmorske visine (LECZ, engl. *low elevation coastal zone*), pretežito u zemljama Azije i Afrike gdje već postoji značajan rizik od poplava obale (Neumann i dr., 2015). Porast srednje razine mora intenzivirat će postojeću eroziju na obali. Na području Španjolske tijekom posljednjih 50 godina uočen je porast troškova sanacije štete primarno zbog intenzivnog razvoja prostora uz obalu i njegovog utjecaja na plaže, ponegdje i u eksponencijalnoj ovisnosti (Jiménez i dr., 2012). To dodatno komplicira problem očuvanja plaža i obala jer su plaže izuzetno snažan motor ekonomskog razvoja (Pilkey i dr., 2014) te su ujedno sinonim za turizam (Phillips i dr., 2006). Iz oba navedena razloga, obalni prostor koji se nalazi neposredno uz plaže podložan je intenzivnom razvoju i gradnji, posebice na Sredozemlju i posebice zahvaljujući turizmu, što ponovno zadire u budžet sedimenta tih plaža (Anthony i dr., 2014).

Sagledavajući ekonomsku računicu, mjere prilagodbe na plažama i obali općenito mogu smanjiti prognoziranu štetu za 7 - 9 puta i time se višestruko isplatiti (Hinkel i dr., 2010). Odabir adekvatnih mjera prilagodbe ključan je, ali ne i jednostavan. Mjere se dijele na čvrste, koje zadiru u prirodni procese izgradnjom građevina (obalni zidovi, morski pragovi, pera okomita na obale, itd.); i na meke mjere, koje djeluju u skladu s prirodnim procesima (dohrana plaža ili obale, kontrolirano povlačenje, pošumljavanje obale, itd.) (Hamm i dr., 2002; Phillips i dr., 2006). Do 1990-ih prevladavala je upotreba čvrstih mjera od kada se više pažnje počelo obraćati na održivost primijenjenih mjera (Hamilton i dr., 2005). Pokazalo se da upotreba čvrstih mjera na jednom dijelu obale dovodi do nepredviđenih i najčešće negativnih posljedica na drugim dijelovima obale. Na primjer, na Floridi je zabilježen veći intenzitet povlačenja plaža ispred obalnih zidova kao i nizvodno od dijelova obale koji su stabilizirani perima (Finkl, 1996; Pilkey i dr., 2014). Učinkovitost čvrstih mjera nije jedini faktor koji je u učestalu upotrebu stavio meke mjere - ispostavilo se da je za zaštitu jednog kilometra plaže čvrstim mjerama ponekad potrebno izgraditi i nekoliko kilometara građevina (Phillips i dr., 2006) što je dodatno potaknulo upotrebu mekih mjera.

Danas globalno dominira upotreba dohrane plaža kao općeprihvaćena meka mjera (National Research Council, 1995; Greene, 2002; Hanson i dr., 2002; Hamilton i dr., 2005; Coburn, 2012; Pilkey i dr., 2014) s malim učinkom na okoliš ukoliko se izvede ispravno (Speybroeck i dr., 2006). Dohrana se definira kao postupak dodavanja materijala na obalu s ciljem nadoknade materijala ranije izgubljenog zbog djelovanja erozije, ali u skladu s ranije postojećom obalnom linijom (Speybroeck i dr., 2006). Masovno korištenje dohranjivanja plaža započinje još 1960-ih kada se vrši prva dohrana na Coney Islandu (Finkl, 1996). Posebno se ističe primjer dohrane plaže Miami, koja je 1970-ih gotovo u potpunosti nestala da bi zahvaljujući 20 godina dohranjivanja ostvarivala prihod oko 4,2 milijarde dolara godišnje, odnosno, tvrdi se da je 1 dolar uloženi u dohranu plaže tamo rezultirao s preko 500 dolara u povratnoj investiciji (Phillips i dr., 2006). Poznati su i negativni primjeri, kao u slučaju Marina di Massa u Italiji, gdje je upotreba presitnog sedimenta u odnosu na prirodan rezultirala gubitkom cijele plaže u vremenu od 2 do 3 godine od dohrane (Phillips i dr., 2006). Dohranjivanje plaža sa sobom nosi i druge posljedice. Ono nije trajna mjera, već ju redovito treba ponavljati ovisno o dinamici erozija na tom dijelu obale, a koja će se očekivati povećavati porastom SRM (Jiménez i dr., 2012). Međutim, učinak dohrane nije samo očuvanje plaža i obale koji se dohranjuju, već je jedna od njenih potencijalno neželjenih posljedica i intenzifikacija gradnje u okolnom obalnom području (Coburn, 2012; Pilkey i dr., 2014). Pronađena je značajna korelacija troškova investicije dohrane s izgradnjom obalnog područja (Armstrong i dr., 2016). Stoga se cijeli problem "vrti u krug" - ljudsko djelovanje indirektno uzrokuje eroziju obale koju potom nastoji spriječiti, zatim investicije u stabilizaciju obale i plaža potiču dodatan razvoj i izgradnju uz tu obalu, time onda raste i rizik od štete koja na toj obali može nastati od erozije i poplava što potom potiče dodatno investiranje u mjere zaštite obale. Dok je ekonomska opravdanost zaštite obale u npr. Miamiju visoka, većina naseljenih mjesta uz obalu na brojnim drugim dijelovima svijeta dugoročno teško mogu ostvariti takav povratak

investicije od dohrane plaža i obale. U tim slučajevima bilo bi opravdano razmotriti povlačenje infrastrukture s obale i uspostavljanje zaštitnog pojasa od 100 m uz obalu, u skladu s Protokolom o integralnom upravljanju obalnim područjem Sredozemlja (NN 8/2012). Nažalost, upravo je na brojnim plažama ekonomski pritisak turizma i gospodarskog razvoja obalnog područja puno veći prioritet od dugoročnog očuvanja obale u skladu s klimatskim promjenama (Pilkey i dr., 2014). Štoviše, prognozira se da će, zbog rasta populacije i porasta ekonomske moći, turizam još daleko u budućnosti nastavljati rasti. Tako će rasti i negativni učinci klimatskih promjena, a time i pritisak za stabilizacijom obale kao i razvojem i izgradnjom obalnog područja (Hamilton i dr., 2005). Stoga je problem očuvanja obale i plaža ususret nadolazećim posljedicama klimatskih promjena kompleksno isprepleten s turizmom, gospodarskim razvojem i prostornim planiranjem pojedinog područja. Kao posljedica snažnog pritiska turizma na europske obale godišnje se dohrani oko 17% plaža i do 2002. zabilježen je utrošak od preko 300 milijuna m³ pijeska i šljunka u postupcima dohrane (Hanson i dr., 2002).

Uvažavajući ovaj globalni kontekst, opravdano je pitati se kakva je budućnost plaža na hrvatskom Jadranu. Hrvatska obala Jadrana bogata je brojnim plažama nastalim kao posljedica geoloških procesa koji su se odvijali nad područjem Jadrana. Dok je talijanska obala Jadrana oblikovana dugotrajnom sedimentacijom materijala donesenoga rijekama tijekom kvartara, istočna, pretežito hrvatska obala, stjenovita je i razvedena zahvaljujući porastu srednje razine mora krajem pleistocena i ranog holocena. Prethodna intenzivna tektonika, naročito nakon razdoblja krede, uzdigla je današnji obalni prostor Hrvatske (Dinaride) koji je nastao na području plitkomorske karbonatne sedimentacije. Posljedica takve dugotrajne sedimentacije su karbonatne naslage debljine i do 8 km (Vlahović i dr., 2002; Vlahović i dr., 2005). Nakon izdizanja Dinarida nastupa okršavanje koje traje i danas. Posljednjim značajnim porastom razine mora početkom holocena tektonski stiješnjen i okršen prostor je potopljen te tako od uzvišenja nastaju otoci i uvale, a od dolina kanali i zaljevi (Surić i dr., 2005; Pikelj i dr., 2013). Zahvaljujući ovakvom razvoju hrvatski dio Jadrana broji 1246 otoka (Duplančić-Leder i dr., 2010). To ujedno doprinosi i visokom koeficijentu razvedenosti obale koji iznosi približno 11 (HIJRM, 1955). Otoci na istočnom Jadranu ublažavaju valnu klimu jer se međusobno štite od razvijanja previsokih valova, a isto tako štite i kopno. Djelovanjem valova oblikovan je dio plaža, a naročito one izložene na južnim stranama kopna i otoka gdje su valovi trošili oslabljene karbonatne stijene. Takav slučaj je i plaža Sakarun na Dugom otoku (Pikelj i dr., 2013; Pikelj i dr., 2022a). Drugi tip plaža na krškoj obali su također šljunčane plaže, ali nastale erozijom i akumulacijom koju je prouzrokovao tok rijeka kada je razina mora bila značajno niža (Juračić i dr., 2009; Anthony i dr., 2014). Oba tipa plaža i danas se donekle održavaju stabilnima doprinosom materijala prilikom bujičnih tokova kod intenzivne oborine (Pranzini i dr., 2013) i opisuju se kao džepne plaže. Džepna plaža je plaža omeđena strukturom geološkog ili ljudskog podrijetla koja sprječava uzdužobalni transport. U pravilu su duljine od nekoliko desetaka do par stotina metara i najčešće se nalaze uz stjenovite ili planinske obale te nerijetko dolaze u nizovima, međusobno odvojene po nekoliko stotina metara (Pranzini i dr., 2013). Pri tome valja dodati da, iako je Sredozem-

lje (a posebice i Jadransko more) izuzetno pogodno za nastanak džepnih šljunčanih plaža zbog uzdignutog reljefa neposredno uz obalu (Anthony i dr., 2014), nisu sve plaže prirodne jer je čovjek kroz povijest gradio i umjetne džepne šljunčane plaže, kao što je plaža Ploče (Bertoni i dr., 2011; Anthony i dr., 2014; Bogovac i dr., 2023b). Šljunčane plaže puno su strmije od pješčanih te je nagib (omjer engl. *depth of closure* i horizontalne udaljenosti od obale) stjenovite obale sa šljunčanim plažama između 0,017 i 0,019, a za pješčane obale od 0,007 do 0,01 (Athanasίου i dr., 2019). Posljedica visoke strmosti i malih širina džepnih šljunčanih plaža je izrazita ranjivost na porast srednje razine mora (Monioudi i dr., 2017). Tako je prognozirano da će između 30 i 90% džepnih šljunčanih plaža Egejskog mora erodirati ili bar privremeno biti u cijelosti potopljene do kraja stoljeća i pri porastu SRM od 0,6 metara (Monioudi i dr., 2017). Pri izradi navedenih prognoza bilo je potrebno istražiti svojstva preko 3200 plaža na Egejskom moru, što je postignuto zahvaljujući satelitskim fotografijama i računalnom analizom. Sličan set podataka o plažama u Hrvatskoj za sada još uvijek izostaje.

Iako je poznato da je područje Hrvatske bogato brojnim šljunčanim i džepnim plažama, ne postoje pouzdani relevantni podatci o njihovom broju, dužini, širini, površini, položaju, orijentaciji, sastavu sedimenta i slično. Plaže u Hrvatskoj čine temelj turističke ponude zahvaljujući kojoj turizam zauzima 19 % BDP u gospodarstvu Republike Hrvatske (Orsini i dr., 2018; Žaja, 2023) i time nedvojbeno utječe na način upravljanja plažama. Istovremeno ne postoji nacionalna strategija upravljanja obalnim prostorom i plažama čiji bi zadatak, između ostalog, bio objedinjavanje i prikupljanje relevantnih podataka. Nedostatak takve strategije posljedica je razdijeljenih ovlasti nad obalnim područjem. U Hrvatskoj ingerenciju nad plažama imaju Zakon o prostornom planiranju, Zakon o zaštiti okoliša, Zakon o otocima, Zakon o pomorskom dobru te druge različite strategije i regionalni planovi (Kovačić i dr., 2010). Nastojanja za izradom nacionalnog katastra plaža protežu se već dulje od desetljeća, a za sada se pretpostavlja da Hrvatska broji oko 2000 plaža (Favro i dr., 2013). Zakon o pomorskom dobru i lukama (NN 83/2023) plažu definira kao prirodni ili izgrađeni i uređeni kopneni i pripadajući morski prostor pomorskog dobra koji služi za boravak, rekreaciju i kupanje te s tim povezane aktivnosti. U geološkom smislu plaža je naziv za obalni oblik, odnosno sedimentno tijelo od rastresitog materijala koji se od supratajdala i u skladu s nagibom obale prostire do dubine u moru na kojoj postaje nepomičan. Plaže imaju itekako vrijednu ulogu i izvan zakonske definicije: služe kao staništa, štite kopno od erozije i olujnog djelovanja, ali čine i resurs u turizmu (Favro i dr., 2013; Nel i dr., 2014). To uzrokuje značajan pritisak da se plažni prostor oblikuje potrebama u turizmu, a posljedično se održava i na pristup upravljanja plažama i obalnom prostoru. Ranije je navedeno da je taj pritisak i globalno prisutan. Jednako tako kako je dohrana plaža dominantna globalna praksa, tako je i u velikoj mjeri prisutna i u Hrvatskoj.

Formalno, Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama (NN 83/2023) definira dohranjivanje plaže kao dopremanje i razastiranje kamenog materijala i morskog biljnog materijala (lažine), pijeska ili šljunka na površinu žala, bez prisustva veće količine praha i/ili gline, sa svrhom nadomještanja materijala koji je trajno izgubljen zbog prirodnih procesa. U ovom radu autor se

koristi izrazom *dohrana* (glagolska imenica izvedena od svršenog oblika glagola *dohraniti*) kako bi oslovio jedan postupak *dohranjivanja* koji je definiran Zakonom o pomorskom dobru i lukama (NN 83/2023), dok *dohranjivanje* (glagolska imenica izvedena od nesvršenog oblika glagola *dohranjivati*) koristi za slučaj kada je potrebno naglasiti da se radi o nizu dohrana provedenom kroz neko vremensko razdoblje ili ukoliko je riječ o postupku dohrane koji obuhvaća planiranje, monitoringe učinaka i evaluaciju pojedinačnog ili niza postupaka dohrane kakav predlažu Hamm i dr. (2002). Valja naglasiti da bi među ovim pojmovima svakako trebalo napraviti jasniju granicu i uspostaviti jasnije definicije. Ovaj Zakon, na snazi od srpnja 2023. godine, propisuje i maksimalnu godišnju količinu materijala za dohranu u iznosu od $0,35\text{ m}^3$ po metru dužnom obale plaže, ali uz uvjet da općine i gradovi (njih 130) moraju ishoditi suglasnost nadležne regionalne samouprave (sedam županija). Zakon također uvjetuje i obvezu donošenja petogodišnjih planova upravljanja pomorskim dobrom koji moraju predvidjeti provedbu dohrana. To prethodno nije bio slučaj te su općine i gradovi dohranu vršili temeljem godišnjih planova. Istovremeno, Zakon donesen 2023. godine uvjetuje upotrebu isključivo pijeska ili šljunka, radeći razliku od npr. zemljanog materijala, odnosno neprikladnog materijala, koji može dovesti do brzog gubitka plaže ili do značajne štete za okoliš ukoliko dođe do njegovog ispiranja (Speybroeck i dr., 2006; Phillips i dr., 2006; Kružić i dr., 2022). Iako su ove izmjene Zakona o pomorskom dobru i pomorskim lukama svakako pozitivne, i dalje izostaje nacionalni plan ili strategija koja bi ujednačila praksu upravljanja obalnim područjem te je županijama ostavljeno na volju da različito planiraju dohranjivanje na svom području. U periodu prije 2023. godine, tj. do izmjene Zakona, svaka od 130 jedinica lokalne samouprave na obali imala je mogućnost samostalno provoditi dohranu, dakle bez suglasnosti nadležne županije i u sklopu "redovnog" održavanja plaža.

Zbog podjele ingerencije nad održavanjem plaža u 130 jedinica lokalne samouprave i zbog nedostatka nacionalne strategije upravljanja i praćenja stanja plaža, nepoznato je u kojem opsegu je u Hrvatskoj korištena praksa dohrane plaža. Poznato je da se postupci dohrane plaža u Hrvatskoj zasigurno provode, prvenstveno iz primjera loše prakse koji zbog upotrebe materijala koji se ispire u vodi završe u medijima, kao na primjer u slučaju općina Podgora i Makarska. Istraživanje u Italiji pokazalo je da većina ispitanih posjetitelja plaža nije upoznata s praksom dohrane plaža, a tek četvrtina posjeduje dobro razumijevanje prakse i njenih rizika (Marin i dr., 2009). Iako su posjetitelji plaža zabrinuti za kvalitetu vode i sedimenta na plažama, jednako tako brinu i o "udobnosti" sedimenta te postoji bojazan da upravo taj zahtjev utječe na odabir sedimenta pri dohrani, posebno tamo gdje nedostaje kvalitetna zakonska regulativa i stručno znanje (Marin i dr., 2009). Kako je u Hrvatskoj snažan utjecaj turizma i turista na odluke o dohrani plaža, moguće je da je "udobnost" sedimenta važan kriterij pri odabiru sedimenta za dohranu. U prilog tome da potrebe posjetitelja i turista diktiraju provedbu dohrane plaža govori i činjenica da se većina dohrana provodi u proljeće, tj. nakon olujne zimske i prije ljetne turističke sezone (Anthony i dr., 2011). Cilj je povećati prihvatni kapacitet plaža pred ljeto, prilagoditi njihov nagib (a ponekad i vrstu sedimenta) ugodu posjetitelja.

Neovisno o cilju zbog kojeg se provodi dohrana plaža ili bilo koja druga mjera u upravljanju

obalom, znanstvene spoznaje i numerički modeli postaju sve veći oslonac pri donošenju odluka. Međutim, fokus većine dosadašnjih istraživanja stavljen je na procese i svojstva pješčanih plaža koje su na obalama češće od šljunčanih i na kojima su eksperimentalna mjerenja, radi specifičnosti sedimenta, jednostavnija (Jennings i dr., 2002; Buscombe i dr., 2006; Bergillos i dr., 2017; Bujan i dr., 2019). Iako postoji velika potreba za procjenom erozije i efikasnosti mjera ublažavanja erozije na šljunčanim plažama, i dalje prevladava značajan nedostatak razvijenih numeričkih modela za šljunčane plaže u odnosu na pješčane (Pedrozo-Acuña i dr., 2006; Pedrozo-Acuña i dr., 2007; Orford i dr., 2011; Masselink i dr., 2014; Bergillos i dr., 2017). Za šljunčane plaže u upotrebi je tek numerički model naziva XBeach-Gravel (skraćeno XBG).

XBG je jednodimenzionalni numerički model nastao proširenjem numeričkog modela XBeach namijenjenoga za predviđanje učinka olujnih događaja na pješčane plaže (Roelvink i dr., 2009). Proširenja modela XBeach obuhvatila su: nehidrostatički modul za linearne valove, interakciju valova, struja i loma valova u zoni loma (Smit i dr., 2010), modul za procese infiltracije vode na šljunčanim plažama (McCall i dr., 2012) te modul za transport sedimenta i morfologiju (McCall i dr., 2015). Tako prošireni XBeach-Gravel model pokazao se uspješnim u simulacijama različitih morfoloških odgovora plaže, posebno za energetski snažne olujne događaje, a gdje značajna visina valova H_s doseže iznose od 10 metara i vršne periode T_p od 10 sekundi (McCall i dr., 2015). Slabiji rezultati ostvareni su pri značajnim visinama valova H_s od 3 metra i vršnim periodima T_p ispod 6 sekundi, a takvi uvjeti česti su između otoka i na hrvatskoj obali (McCall i dr., 2015; Bujak i dr., 2023). Osim spomenutog, XBG je korišten u istraživanju miješanih šljunčano-pješčanih plaža (Brown i dr., 2019), za prognozu promjena barijernih šljunčanih plaža (Ions i dr., 2021), razvoj empirijskih jednadžbi za doseg uspinjanja valova (engl. *wave runup*) (Poate i dr., 2016) i drugo.

Osim što izostaje upotreba XBG na primjerima na hrvatskom Jadranu, pokazalo se da XBG bez kalibracije ne postiže jednako dobre rezultate za slučaj blažih valnih uvjeta tipičnih za Jadran kao za slučaj valnih visina između 6 i 10 m (McCall, 2015). Dok je na otvorenom dijelu Jadranskog mora tijekom 23 godine promatranja zabilježena značajna visina valova od 6 m, a prognozirana iznosi i oko 8,6 m s povratnim razdobljem od 100 godina (Leder i dr., 1998; Farkas i dr., 2016), očekivane valne visine u međuotočnom dijelu upola su manje. Zbog smjera prostiranja hrvatske obale Jadrana u pravcu sjeverozapad-jugoistok, obale i plaže na obali često su orijentirane k jugozapadu. S obzirom na takvu orijentaciju, većina plaža je zaštićena od djelovanja valova uzrokovanih burom (iz smjera 45 °), ali ne i u potpunosti od juga (135 °), a koji predstavljaju dominantne vjetrove na Jadranu (Cushman-Roisin i dr., 2013; Viličić, 2014). Oštro (180 °) je pri tome prisutno češće na otvorenom moru nego unutar otočnog pojasa, a slično vrijedi i za lebić (iz smjera 225 °) koji najveći značaj ima na zapadnoj obali otoka najbližih Italiji. Valovi juga prisutni unutar otočnog pojasa Jadrana pristižu na plaže jugozapadne orijentacije zahvaljujući refrakciji valova kako se približavaju obali. Uz to, trajanje juga i njegova snaga, tj. brzina doprinose dominantnom utjecaju valova juga te je pri tome ograničavajući faktor privjetrište koje zbog velikog broja otoka ograničava razvoj većih i snažnijih valova. Stoga

značajne visine valova unutar obalnog pojasa na Jadranu rijetko nadilaze H_s od 4 metra s vršnim periodom od T_p 6 sekundi. Upravo u tom rasponu je slaba i ispitanost i primjena modela XBG.

Potencijala za primjenu XBG modela na plažama u Hrvatskoj je mnogo. Na primjer, mogao bi se koristiti za procjenu učinkovitosti postupaka dohrane ili pri konstrukciji budućih umjetnih plaža kako bi ih se učinilo otpornijim na djelovanje valova. U kontekstu promjene klime, XBG od posebne koristi može biti za upotrebu u procjeni ponašanja plaža u budućnosti. Ranije je spomenut primjer istraživanja ponašanja pretežito pješčanih plaža na Egejskom moru, koje će zbog porasta srednje razine mora i zbog djelovanja olujnih događaja u većoj mjeri nestati do kraja stoljeća (Monioudi i dr., 2017). Slična analiza i za Mallorcu predviđa gubitak od oko 50 % trenutne površine plaža (Enríquez i dr., 2017), kao i za Cipar (Monioudi i dr., 2023).

Porast srednje razine mora na Jadranu tijekom prošlog stoljeća iznosio je oko 0,18 m, a predviđa se porast i od 0,5 metara do kraja stoljeća (Vilibić i dr., 2000) pa čak i 0,8 m (IPCC, 2022). Takav porast sa sobom nosi i rizik od dugoročnog potapanja dijelova obale i erozije plaža, međutim porast SRM je glavni doprinos i porastu ekstremne razine mora na globalnoj razini (Vousdoukas i dr., 2017) i na Jadranu (Marcos i dr., 2009; Lionello i dr., 2012). Ekstremna razina mora (skraćeno ERM, na engl. *extreme sea level* i ESL) posljedica je nekoliko komponenti, primarno srednje razine mora, astronomske plime i epizodalnog titranja morske površine koji uzrokuju valovi i olujni uspori (Vousdoukas i dr., 2017). Slobodna i prisilna titranja morske površine na Jadranu zanemarivo će se promijeniti do kraja stoljeća u usporedbi s porastom SRM (Lionello i dr., 2005). Posljedica je to prognoziranog i gotovo zanemarivog ublažavanja olujnih i vjetrovnih uvjeta na Jadranu (Belušić Vozila i dr., 2019; Belušić Vozila i dr., 2021), a što se posljedično odražava i u rezultatima numeričkih modela valne klime na Jadranu (Lionello i dr., 2003; Benetazzo i dr., 2012; Bonaldo i dr., 2020). Nastup olujnih uspora na području jadranskog bazena također se ne bi trebao značajno mijenjati u budućnosti (Međugorac i dr., 2021). Stoga na džepnim šljunčanim plažama hrvatskog Jadrana moguće je očekivati valne događaje slične današnjima u kombinaciji s ERM također sličnoj današnjoj, ali pri značajno višoj srednjoj razini mora i uz minimalne promjene sedimentnog budžeta, jer se ipak radi o džepnim plažama.

U budućnosti se očekuje da bi pri takvim uvjetima nastupilo pomicanje šljunčanih plaža ka kopnu ukoliko postoji prostor za takav pomak (Almeida i dr., 2017; Anthony, 2021). Šljunak se tada iz zone zapljuskivanja i položaja SRM zbog djelovanja valova tijekom visoke razine mora akumulira u obliku nove i više berme te, ako dođe do prelaska valova preko berme (engl. *overtopping*), sediment se akumulira na kopnenom dijelu iza plaže (engl. *rollover*) (Orford i dr., 1991; Shand i dr., 2013). U suprotnom, kada nema prostora za pomicanje šljunka na više dijelove kopna, nastupa erozija kada valovi pri višoj SRM povlače sediment u dublje dijelove plaže. Takav pojednostavljeni pristup za pješčane plaže dao je parametrizirati Bruun (1962) te se po njemu i naziva Bruunovo pravilo i danas se često uotrebljava (Leatherman, 2001). Međutim, tako pojednostavljeni pristup iznimno je teško verificirati upravo zbog utjecaja olujnih događaja i potrebe za dugoročnim mjerenjima pomaka obalne linije koja najčešće nisu dostupna (Leatherman, 2001). Štoviše, korisnost Bruunovog pravila u primjeni na pješčanim plažama

još uvijek je predmet rasprave, iako istraživanja pokazuju da ne može predvidjeti povijesno zabilježene pomake (Seenath i dr., 2024). Upotreba tako pojednostavljenih i determinističkih modela učestalo dovodi do previsokih i konzervativnih procjena povlačenja obalne linije (Shand i dr., 2015).

Za potrebe ovog rada postavljene su tri hipoteze. U poglavlju 2, uzimajući u obzir globalni zamah u upotrebi dohrane plaža kao i upotrebu prakse u Hrvatskoj, a temeljem podataka o plažama koji će se prikupiti u sklopu ove disertacije iz različitih izvora, ispitat će se hipoteza da je dohrana plaža u Hrvatskoj usporediva sa sličnim postupcima u Europi. Rezultat i znanstveni doprinos te analize uključuje i objedinjeni popis plaža u Hrvatskoj s osnovnim svojstvima, pregled podataka o dohrani plaža u Hrvatskoj za promatrano razdoblje (2015. - 2019.) te usporedbu dohrane u Hrvatskoj s ostalim zemljama Europske unije. U poglavlju 3, uvažavajući potrebu za evaluacijom mjera dohrane kao i učinkovitosti pojedinih rješenja prilikom gradnje plaža na Jadranu, ispitat će se hipoteza da XBeach-Gravel numerički model može predvidjeti pomicanje sedimenta pod utjecajem olujnih događaja na profilu umjetne šljunčane plaže Ploče u trenutnim valnim uvjetima. U tu svrhu napraviti će se niz simulacija modelom XBeach-Gravel kako bi se odredile vrijednosti postojećih parametara modela koji dobro opisuju ponašanje plaže Ploče pri izmjeranim valnim uvjetima tipičnima za Jadran temeljem izmjerenih topografskih promjena na plaži. Nastavno na te rezultate model će se validirati na primjeru snažnog valnog događaja koji je zadesio plažu Ploče krajem prosinca 2020. godine, čime će se utvrditi primjenjivost modela za valne i meteorološke uvjete na Jadranu i opisati postupak upotrebe modela za buduće primjene u Hrvatskoj. Također, odredit će se i kalibrirani koeficijenti modela za upotrebu na šljunčanim plažama na Jadranu. Treće, u jeku klimatskih promjena koje će izazvati značajan porast srednje razine mora i na Jadranu kao što su izazvani značajni gubitci džepnih šljunčanih plaža na Egejskom moru, ispitat će se hipoteza da će buduće ekstremne razine mora dovesti do povlačenja obalne linije umjetne plaže Ploče i prirodne plaže Sakarun prema kopnu. Izvršiti će se niz simulacija s različitim valnim uvjetima i pri različitim porastima srednje razine mora za svaku lokaciju. Usrednjenjem rezultatnih profila, nakon djelovanja simuliranih valnih događaja, dat će se procjena pomaka obalne linije na plažama Ploče i Sakarun u kontekstu prosječne plaže u Hrvatskoj.

2. *Plaže i dohrana plaža u Hrvatskoj*

2.1. **Metodologija prikupljanja i obrade podataka o plažama i dohrani plaža**

U ovoj analizi korištena su tri niza podataka. Prvi niz podataka predstavljaju podatci o plažama preuzeti iz regionalnih programa uređenja i upravljanja morskim plažama. Drugi niz podataka su podatci o dohranama plaža provedenim za razdoblje od 2015. do 2019. godine. Treći niz podataka su podatci preuzeti iz rada (Hanson i dr., 2002) s kojima su uspoređeni podatci za Hrvatsku prikupljeni iz prethodna dva niza.

Prvi niz podataka, onaj o plažama, preuzet je iz regionalnih programa izrađenih za svaku od sedam županija na moru. Preuzimanjem tih podataka preuzeta je i metodologija prikupljanja podataka provedena u sklopu izrade regionalnih programa koju je predvodio i opisao u izvještaju Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu iz Opatije 2014. Regionalne programe za svaku županiju izrađivale su različite konzultantske tvrtke. One su prikupljale podatke o plažama temeljem PL/14 obrazaca prikazanog na slici 2.1. Obasce su ispunile konzultantske tvrtke zajedno sa 130 općina na obali, potom su u suradnji sa županijama podatke objavile u regionalnim programima za Istarsku (Institut za turizam, 2015), Primorsko-goransku (Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija, 2015), Ličko-senjsku (Razvojna agencija Ličko-senjske županije – LIRA, 2017), Šibensko-kninsku (Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija, 2014), Zadarsku (IGH Urbanizam and Horwath & Horwath Consulting, 2015), Splitsko-dalmatinsku (SAFEGE, 2015) i Dubrovačko-neretvansku (Trames Consultants, 2015) županiju.

OBRAZAC ZA EVALUACIJU PLAŽA (PL/14)

1. Grad, općina, županija, naziv plaže Županija: Grad/općina: Naziv plaže:	9. Da li plaža ima Plavu zastavu? a) da Za koje godine? b) ne
2. Dužina plaže: m Površina plaže: m2	10. Da li je plaži dozvoljen pristup kućnim ljubimcima? a) da b) ne
3. Klasifikacija plaže: a) prirodna b) uređena - udaljena - mjesna - ruralna - urbana - plaža turističkog kompleksa	11. Da li se sustavno prati kakvoća mora po Uredbi o kakvoći mora za kupanje (NN 73/08)? a) da b) ne
4. Ukoliko je prethodni odgovor pod a, odredite stupanj zaštite plaže: - potpuna zaštita - djelomična zaštita - bez zaštite	12. Koliki je procijenjeni sadašnji vršni kapacitet plaže u glavnoj turističkoj sezoni? kupača
5. Tip plaže prema značajkama plažnog sedimenta: Geološki sastav Pijesak Sitni šljunak Šljunak Kamen Stijene Beton Ostalo	13. Da li je plaža prilagođena osobama s posebnim potrebama? a) da b) ne
6. Dostupnost (prilaz) plaži: a) asfaltirana cesta b) samo morski prilaz c) bijela cesta d) morski prilaz - samo za iskrcaj putnika - uređeno pristajalište e) pješačka staza f) obalni put f) nešto drugo, navedite što	14. Temeljem utvrđenog stanja, što karakterizira plažu? Prirodni resursi zabava animacija sport i rekreacija gastro ponuda odmor i relaksacija bijeg od svakodnevice nudizam ponuda za kućne ljubimce događanja zdravstvene pogodnosti škola plivanja nešto drugo? (Upišite što!)

(a) Prednja stranica PL/14 obrasca.

Slika 2.1. Primjerak PL/14 obrasca za evaluaciju plaža korišten pri izradi regionalnih i Nacionalnog programa upravljanja i uređenja morskih plaža.

OBRAZAC ZA EVALUACIJU PLAŽA (PL/14)

7. Da li je plaža pod koncesijom? a) da ☐ od ☐ do ☐ b) ne ☐			15. Da li su određene granice pomorskog dobra? a) da ☐ b) ne ☐ c) djelomično (objašnjenje) ☐																													
8. Ako postoji koncesija (koncesijsko odobrenje), što obuhvaća koncesija (koncesijsko odobrenje)? <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Koncesija</th> <th>Koncesijsko odobrenje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a) korištenje plaže</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>b) ugostiteljske objekte</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>c) sportske sadržaje</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>d) parkiralište</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>e) sanitarni čvor</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>f) ostalo (navedite što!)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </tbody> </table>				Koncesija	Koncesijsko odobrenje	a) korištenje plaže	☐	☐	b) ugostiteljske objekte	☐	☐	c) sportske sadržaje	☐	☐	d) parkiralište	☐	☐	e) sanitarni čvor	☐	☐	f) ostalo (navedite što!)	☐	☐	16. Da li imate interes za uređenje postojećih i novih plažnih prostora? a) da ☐ b) ne ☐								
	Koncesija	Koncesijsko odobrenje																														
a) korištenje plaže	☐	☐																														
b) ugostiteljske objekte	☐	☐																														
c) sportske sadržaje	☐	☐																														
d) parkiralište	☐	☐																														
e) sanitarni čvor	☐	☐																														
f) ostalo (navedite što!)	☐	☐																														
			17. Ako je Vaš odgovor na prethodno pitanje DA; da li posjedujete slijedeću dokumentaciju? <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>DA</th> <th>NE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a) izvod iz katastarskog plana s popisom katastarskih čestica na kopnu koje su predmetom uređenja</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>b) vlasnički list s popisom čestica (provjeriti da li je upisano pomorsko dobro ili nešto treće)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>c) izdana lokacijska informacija (prema Zakonu o prostornom uređenju NN 153/13, članak 36)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>d) odluka o koncesiji (Zakon o prostornom uređenju NN 153/13, Zakon o koncesijama NN 143/12, Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama NN 158/03, 141/06, 38/09 i 123/11)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>e) eventualnu pripadnost plaže sustavu ekološke mreže Natura 2000</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>f) izvršenu procjenu okoliša, ako je potrebna, a sukladno Uredbi o procjeni utjecaja na okoliš (NN 64/08, 67/09)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>g) izrađeni idejni projekt uređenja plaže</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> <tr> <td>h) lokacijsku dozvolu (ako je riječ o zahvatu u prostoru npr. nasipavanju i drugo)</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </tbody> </table>				DA	NE	a) izvod iz katastarskog plana s popisom katastarskih čestica na kopnu koje su predmetom uređenja	☐	☐	b) vlasnički list s popisom čestica (provjeriti da li je upisano pomorsko dobro ili nešto treće)	☐	☐	c) izdana lokacijska informacija (prema Zakonu o prostornom uređenju NN 153/13, članak 36)	☐	☐	d) odluka o koncesiji (Zakon o prostornom uređenju NN 153/13, Zakon o koncesijama NN 143/12, Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama NN 158/03, 141/06, 38/09 i 123/11)	☐	☐	e) eventualnu pripadnost plaže sustavu ekološke mreže Natura 2000	☐	☐	f) izvršenu procjenu okoliša, ako je potrebna, a sukladno Uredbi o procjeni utjecaja na okoliš (NN 64/08, 67/09)	☐	☐	g) izrađeni idejni projekt uređenja plaže	☐	☐	h) lokacijsku dozvolu (ako je riječ o zahvatu u prostoru npr. nasipavanju i drugo)	☐	☐
				DA	NE																											
			a) izvod iz katastarskog plana s popisom katastarskih čestica na kopnu koje su predmetom uređenja	☐	☐																											
			b) vlasnički list s popisom čestica (provjeriti da li je upisano pomorsko dobro ili nešto treće)	☐	☐																											
			c) izdana lokacijska informacija (prema Zakonu o prostornom uređenju NN 153/13, članak 36)	☐	☐																											
			d) odluka o koncesiji (Zakon o prostornom uređenju NN 153/13, Zakon o koncesijama NN 143/12, Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama NN 158/03, 141/06, 38/09 i 123/11)	☐	☐																											
			e) eventualnu pripadnost plaže sustavu ekološke mreže Natura 2000	☐	☐																											
			f) izvršenu procjenu okoliša, ako je potrebna, a sukladno Uredbi o procjeni utjecaja na okoliš (NN 64/08, 67/09)	☐	☐																											
			g) izrađeni idejni projekt uređenja plaže	☐	☐																											
h) lokacijsku dozvolu (ako je riječ o zahvatu u prostoru npr. nasipavanju i drugo)	☐	☐																														

(b) Stražnja stranica PL/14 obrasca.

Slika 2.1. Primjerak PL/14 obrasca za evaluaciju plaža korišten pri izradi regionalnih i Nacionalnog programa upravljanja i uređenja morskih plaža. (nastavak)

Podatci preuzeti s PL/14 obrazaca su podatci o samoj plaži: županija i općina kojoj pripada plaža i njen naziv pod točkom 1, dužina i površina plaže pod točkom 2, te "tip plaže prema značajkama plažnog sedimenta" pod točkom 5. Ti preuzeti podatci nisu izvorni znanstveni doprinos ovog rada jer su već objavljeni u regionalnim programima županija, međutim sve izvedene vrijednosti na temelju tih podataka, kao i županijski i nacionalni prosjeci, jesu izvorni doprinos ovog rada. Preostali podatci s obrasca nisu ovdje analizirani, a primarno se odnose na svojstva plaža iz aspekta potreba u turizmu, kao što su: klasifikacija plaže na uređenu i prirodnu, opis dostupnosti plaže, posjedovanje Plave zastave, vršni kapacitet plaže, postojanje koncesije itd.

Prethodno daljnjoj analizi podatka s obrasca nužna je i kritika metodologije PL/14 obrasca. Nazive plaža i općine i županije kojima pripadaju odredile su konzultantske tvrtke u suradnji s općinama i županijama. Međutim, u akcijskom planu (Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu, Opatija, 2014) nije navedena jasna metodologija kojom su određene dužine i površine plaža. Može se pretpostaviti da su dužina i površina plaža određene drukčijom metodom za svaku općinu ili barem za svaku županiju i konzultantsku tvrtku koja je prikupljala i ispunjavala PL/14 obrasce. Neke konzultantske tvrtke radile su terenska istraživanja bez opisa metode mjerenja dužine i površine plaža, dok su druge tvrtke obrasce isključivo proslijedile općinama i od njih zatražile podatke. Stoga podatci o dužinama i površinama nisu u potpunosti pouzdani, ali će se uzeti kao reprezentativni jer su u ovom trenutku jedini takvi podatci.

Na obrascu PL/14 izraz sediment je krivo upotrijebljen, a prikladniji bi izraz bio 'materijal' te će se kroz ostatak ovog rada koristiti 'materijal' kada se oslovljavaju podatci iz PL/14 obrasca. Pod ovom kategorijom općine i/ili konzultanti označili su sve vrste materijala prisutne na plaži od ponuđenih na obrascu: pijesak, sitni šljunak, šljunak, kamen, stijene, beton ili ostalo, a u kategoriji ostalo ponegdje je i nadopisano koja vrsta materijala je bila prisutna na plaži. Nadopisane kategorije materijala izostavljene su iz analize - radilo se o šest slučajeva materijala navedenog kao "žalo", "ostalo", "glina" i "ljekovito blato". S obzirom da je bilo moguće označiti više materijala prisutnog na plaži, jedna plaža po PL/14 obrascu mogla je, primjerice, sadržavati pijesak, šljunak i beton.

Raspon veličine radijusa zrna za pojedine kategorije nije naveden niti je poznata točna metodologija utvrđivanja pojedinog materijala od ponuđenih, tako da se predmetni podatci ne mogu uzeti s potpunom pouzdanošću. Dodatan problem stvaraju i kategorije kamen, stijene i beton. Prvo, kategorije kamen i stijena u geološkom smislu su jednake. Dalje, plaža se po geološkoj definiciji sastoji od rastresitog materijala, a stijene i beton nisu rastresiti materijali te mogu predstavljati kupalište, ali ne i plažu u geološkom smislu. Stoga su obrasci prikupljeni za plaže u sklopu definicije u Zakonu o pomorskom dobru i morskim lukama, a po kojoj dijelovi tako definirane plaže mogu biti plaža u geološkom smislu i/ili kupališta. Zato je posebno istaknut broj plaža koje se sastoje od pijeska, šljunka i sitnog šljunka ili kombinacije tih materijala, a što čini plažu po geološkoj definiciji (označeno sa slovom G), a posebno broj kupališta od betona i stijena (kamena).

Podatci preuzeti s PL/14 obrazaca, odnosno iz svih regionalnih programa, u ovom su radu

iskorišteni kako bi se odredio ukupan broj plaža u Hrvatskoj i po županijama, a potom ukupna duljina obalne linije plaža i površina plaža po županijama i nacionalno. Za duljine obalne linije i površine određene su srednje i medijan vrijednosti za svaku županiju i nacionalno. Također, iz omjera površine i duljine obalne linije dobivena je širina plaža u srednjem i medijan iznosu za svaku županiju i nacionalno.

Podatci o vrsti materijala prisutnom na plaži iz PL/14 obrazaca korišteni su kako bi se odredio broj plaža na kojima je ta vrsta materijala prisutna po županiji i nacionalno. Određena je i najčešće prisutna vrsta materijala na plažama u Hrvatskoj.

Usprkos metodološkim nedostacima PL/14 obrasca, ovaj set podataka predstavlja najveći skup podataka o plažama u Hrvatskoj. S obzirom na svoju veličinu, ali i zbog namjere da posluži kao temelj za izradu nacionalnog registra plaža i programa uređenja i upravljanja morskim plažama, dostupan skup podataka je vrijedan za analizu. Prikupljeni podatci o plažama nužan su preduvjet daljnje analize o dohrani plaža.

Drugi niz podataka prikupljen je s ciljem boljeg razumijevanja prakse dohrane plaža na hrvatskoj obali. U ovom radu prikupljeni su osnovni podatci o dohrani plaža u Hrvatskoj za razdoblje od 2015. do 2019. godine. Svaka od 130 općina samostalno provodi mjere dohrane, stoga je svaka općina direktno kontaktirana te su od njih prikupljeni podatci o dohrani putem anketnog obrasca. Anketni obrazac poslan je u obliku Microsoft Excel tablice, a ogledni primjerak ispunjenog obrasca prikazan je u tablici [2.1](#).

Podatci prikupljeni anketnim obrascem uključuju: naziv plaže, godinu dohrane, godišnji trošak dohrane bez PDV-a u kunama, godišnju količinu materijala upotrebljenoga za dohranu u m³, ime i adresu izvođača dohrane, naziv izvorišta materijala kojim se dohranjuje plaža, prosječnu veličinu zrna materijala i geografske koordinate plaža. Općinama je posebno naglašeno da pri ispunjavanju ankete unose i evidentiraju isključivo plaže prepoznate u regionalnom programu njihove županije, a dodatno da vode računa o upotrebi imena koje se koristi u referentnom programu za njihovu županiju. Stoga prikupljeni obrasci obuhvaćaju podatke isključivo za plaže iz regionalnih programa, a podatci za plaže koje nisu u regionalnim programima izostavljeni su iz daljnje analize.

Troškovi izraženi u novcu i materijalu upotrijebljenim za pojedinačne dohrane navedeni su za svaku godinu u razdoblju od 2015. do 2019. godine. Trošak u novcu obuhvaća: cijenu materijala, njegovu dopremu na plažu i razastiranje po plaži. Ukoliko su općine izvršile godišnje više od jedne dohrane po plaži, tada su podatci zbrojeni za tu pojedinu godinu kako bi se dobio godišnji iznos. Također, tijekom provedbe ove ankete službena valuta u upotrebi u Hrvatskoj bila je kuna te su svi podatci prikazani u kunama, odnosno predstavljaju izvorno prikupljene podatke. Podatci o izvođaču dohrane, izvorištu materijala i veličini zrna nisu detaljno analizirani u ovom radu.

Na kraju je prikupljen i podatak o geografskim koordinatama plaže na kojoj je primijenjena dohrana. Time je omogućeno da se plaže koje se dohranjuju digitalno smjeste u prostoru, a potom se, koristeći druge prostorne podatke, mogu odrediti dodatna svojstva plaža. Primjeri

2. Plaže i dohrana plaža u Hrvatskoj

Tablica 2.1. Ogledni primjer ankete o dohrani plaža poslan općinama i gradovima s ispunjenim podacima za dvije plaže u Rijeci - "Ploče" i "Igralište do betonskog sunčališta i rampe".

Naziv plaže iz Regionalnog programa	Godina dohrane	Godišnji troškovi dohrane bez PDV-a (kn)	Godišnja količina dohrane (m ³)	Ime i adresa izvođača radova dohranjivanja	Naziv izvorišta kamena	Prosječna veličina zrna (mm)	Geografske koordinate plaže
1. Ploče	2019	20000,00	50	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	45.340663, 14.370982
	2018	23000,00	92	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2017	36000,00	145	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2016	17000,00	118	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2015	50000,00	150	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
2. Igralište do betonskog sunčališta i rampe	2019	5000,00	12	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	45.339830, 14.375182
	2018	17000,00	55	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2017	12000,00	52	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2016	16000,00	108	Dohranjivanje d.o.o., Trg sv. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	
	2015	25000,00	85	Dohranjivanje d.o.o., Trg v. Marka 1, 10 000 Zagreb	Čufarov kamenolom, Brijuni	32	

prostornih podataka koji se mogu izvesti temeljem geografskih koordinata plaže su dužina privjetrišta i nagib plaže. Dužina privjetrišta odnosi se na dužinu nad otvorenim morem gdje vjetar može slobodno puhati i time razvijati morske valove, a uz trajanje i brzinu vjetrova čini ograničavajući faktor za razvoj morskih valova. Nagib plaže je kut zatvoren između profila plaže i horizontale, a određuje međudjelovanje plaže s valovima.

Podatci prikupljeni temeljem obrasca analizirani su grupiranjem broja provedenih dohrana po županijama i nacionalno, a zbrojeni su i ukupni troškovi i ukupne količine upotrijebljenoga materijala. Određen je postotak broja dohranjenih plaža u odnosu na ukupni broj evidentiranih plaža iz regionalnih programa za svaku županiju i nacionalno. Omjerom provedenih dohrana i broja plaža na kojima se provela dohrana dobiven je prosječan broj dohrana koje se provode po plaži za promatrano petogodišnje razdoblje.

Srednje vrijednosti troška dohrane i korištene količine materijala za županije i nacionalno pristrane su k višim vrijednostima zbog velikih iznosa u podacima. Stoga su određeni kvantili tih vrijednosti kako bi se iznosima dao potreban kontekst. Troškovi dohrane i količine materijala koji troškom i materijalom spadaju u pojedini kvartil sumirani su u ukupan trošak i materijal za

taj kvartil. Ukoliko za pojedinu dohranu nije bio dostupan podatak o trošku ili materijalu, onda je ta dohrana izostavljena pri izračunu ukupnog troška i materijala za kvartile.

Troškovi i količine materijala dohrana zbrojeni su za svaku godinu posebno u promatranom razdoblju od 2015. do 2019. godine. Iz grafičkog prikaza ukupnih troškova i materijala po godini nastojalo se utvrditi postojanje trenda. Isto je učinjeno i za ukupan broj dohrana proveden na nacionalnoj razini.

Temeljem podataka o dužini plaža s prikupljenih PL/14 obrazaca, određeni su troškovi po metru dužine plaža za svaku provedenu dohranu. Potom su ti podatci usrednjeni za svaku županiju, ali i ukupno (nacionalno) te su prikazani po godinama.

Omjerom troška dohrane s količinom materijala dobiven je jedinični trošak m^3 materijala. Iz prikupljenih anketnih obrazaca, dohrane su razvrstane po korištenoj veličini zrna na tri kategorije: pijesak i sitni šljunak za zrna u rasponu od 0,063 do 4 mm, sitni šljunak u rasponu od 4 do 16 mm i krupni šljunak s rasponom od 16 do 64 mm. Potom je za svaku kategoriju materijala iznos jediničnog troška prikazan u obliku *box-and-whiskers* dijagrama. Prilikom određivanja kategorije temeljem veličine zrna u pojedinim dohranama korištena veličina zrna obuhvatila je dvije ili više navedenih kategorija. U tom slučaju kategorija je određena kao miješana, a za slučaj kada nije bila navedena veličina zrna kao nepoznata. I miješana i nepoznata kategorija zrna izostavljena je iz *box-and-whiskers* analize.

Nakon što su prikupljeni podatci o plažama i o dohranama u Hrvatskoj, preostala je usporedba podataka za Hrvatsku s ostalim državama koje vrše dohranu. Za potrebu te analize preuzeta je Tablica 3 iz rada Hanson i dr. (2002), a dodani su i izračunati podatci za Hrvatsku temeljem podataka iz prethodno analiziranih regionalnih programa i anketnog obrasca o dohrani. Time je uspoređen broj promatranih godina dohranjivanja, ukupna količina materijala, (jedinstvena) duljina dohranjene obale, ukupna duljina dohranjene obale, ukupna duljina pješčane i šljunčane obale, ali i izvedene vrijednosti kao što su: količina materijala dohranjena po metru obalne linije godišnje, prosječna količina materijala za sve projekte, prosječna količina materijala po duljini cijele pješčane i šljunčane obale, broj dohranjivanja po plaži, prosječni interval nadohranjivanja, postotak dohranjene obale i raspon korištenog volumena po metru obale.

Nužno je dati nekoliko objašnjenja oko određivanja nekih od navedenih kategorija. Duljina dohranjene obale ili LN odnosi se na jedinstvenu duljinu obale koja je podvrgnuta dohrani u promatranom razdoblju. Za nju je pribrojena svaka duljinu obale, tj. plaže koja je barem jednom dohranjena - i to samo jednom. Za razliku od ukupne duljine dohranjene obale ili LP, a gdje se pribraja duljina obale za svaku dohranu koja je na toj obali, odnosno plaži, provedena. Pri tome treba dodati da je i pretpostavljeno da su sve dohranjene plaže zaista plaže s rastresitim materijalom, iako nemaju nužno takav materijal naveden u PL/14 obrascu.

Nadalje, za ukupnu duljinu pješčane i šljunčane obale (LS) korišten je ukupan zbroj dužina svih plaža na kojima je PL/14 obrascem evidentirano sadržavanje barem jedne vrste rastresitog materijala. Time su obuhvaćene sve plaže u zakonskom smislu koje su ujedno i plaže u geološkom smislu barem u nekom dijelu obale koju obuhvaćaju, a iz brojke su izostavljene plaže koje

su u suštini isključivo kupališta i nije evidentiran rastresiti materijal na njima. Plaže za koje nije naveden materijal izostavljene su iz zbroja.

Drugim riječima, analizom provedenom ovdje griješi se zbog nepouzdanosti PL/14 obrazaca. S obzirom na nedostupnost drugog i pouzdanijeg izvora podataka o plažama, ali i na kraju tek malog utjecaja na konačne zaključke, procijenjeno je da je takva pogreška prihvatljiva.

2.2. Rezultati i diskusija o plažama i dohrani u Hrvatskoj

Regionalnim programima i PL/14 obrascima evidentirane su 1904 plaže na hrvatskoj obali u smislu Zakona o pomorskom dobru i morskim lukama, a što je u skladu s ranijim procjenama od oko 2000 plaža (Favro i dr., 2013), iako se pretpostavlja da je stvarni broj ipak nešto veći. Razlog tome je činjenica da su općine i županije evidentirale plažni prostor koji je u redovitoj upotrebi, koji nosi naziv i koji ima sebi svojstven turistički potencijal. S obzirom na nedostatak jasne metodologije prilikom izrade regionalnih programa odnosno PL/14 obrazaca prilikom evidentiranja plaža, moguće je da postoje i drugi zasebni plažni prostori koji su po definiciji građeni od rastresitog materijala uz more, a nisu obuhvaćeni ovom analizom. Stoga je ukupan broj plaža i veći od 1904 koliko ih je evidentirano PL/14 obrascima.

Pregled podataka o dužini i površini plaža prikazan je u tablici 2.2, a temelji se na podacima preuzetim iz PL/14 obrazaca. Podatci iz regionalnih programa objedinjeni su u ovom radu i analizirani u svrhu dobivanja podataka na nacionalnoj razini te kako bi se međusobno usporedile županije. Najveći broj plaža ima Primorsko-goranska županija 406, potom Splitsko-dalmatinska s njih 347, dok je najmanji broj plaža, svega 181, u Ličko-senjskoj županiji. Ličko-senjska županija zadržava posljednje mjesto i kad je u pitanju ukupna dužina plaža i njihova ukupna površina, dok se s najdužim i najvećom površinom plaža ističe Istarska županija s njih ukupno 250, zahvaljujući u prosjeku (i medijanu) najdužih plaža s oko 600 m (odnosno 350 u medijanu) i površinom od 6778 m² (tj. 3225 m² u medijanu).

Tablica 2.2. Pregled dužine i širine plaža iz regionalnih programa po županijama.

Županija	# op- ćina	# plaža	Ukupna dužina plaža (m)	Ukupna površina plaža (m ²)	Prosječna dužina plaže (m)	Medijan dužine plaže (m)	Prosječna površina plaže (m ²)	Medijan površine plaže (m ²)	Prosječna širina plaže (m)	Medijan širine plaže (m)
Dubrovačko-neretvanska	18	278	40.229,00	494.334,00	144,71	100,00	1778,18	560,00	12,29	5,6
Ličko-senjska	3	181	27.646,00	183.271,00	152,74	100,00	1012,55	346,50	6,63	3,47
Splitsko-dalmatinska	32	347	109.959,00	1.036.743,00	316,88	202,00	2987,73	1.414,00	9,43	7
Šibensko-kninska	10	142	53.622,00	1.334.066,00	377,62	382,50	9394,83	4.300,00	24,88	11,24
Istarska	21	250	150.369,00	1.694.579,00	601,48	350,00	6778,32	3.225,00	11,27	9,21
Primorsko-goranska	20	406	118.673,20	956.405,00	292,3	200,00	2355,68	1.255,00	8,06	6,28
Zadarska	26	300	118.493,00	1.371.118,00	394,98	250,00	4570,39	2.000,00	11,57	8
Hrvatska (ukupno)	130	1904	618.991,20	7.070.516,00	325,1	200,00	3713,51	1.456,50	11,42	7,28

Hrvatska ukupno broji oko 619 km ukupne dužine i oko 7 milijuna m² površine plaža. Od toga se gotovo četvrtina ili 24 % ukupne dužine i površine svih plaža nalazi u Istarskoj županiji. Na nacionalnoj razini prosječna plaža ima tek 325 m dužine i 3700 m² površine, odnosno 200 m dužine i 1456 m² površine u medijanu. Prosječno najšire plaže ima Šibensko-kninska županija s 24 metra širine (ili 11 u medijanu), a time ima i prosječno najveće površine plaža od oko 9395 m² (tj. 4300 m² u medijanu).

Dalje, u tablici 2.3 nalazi se pregled podataka o materijalu prisutnom na plažama temeljem prikupljenih PL/14 obrazaca i po županijama. Na primjer, u Hrvatskoj je pijesak prisutan na 361 plaži od 1904, a što čini 18,96 % svih plaža. U Dubrovačko-neretvanskoj županiji evidentirano je 278 plaža, od toga 54 sadrže i pijesak, a što čini 14,96 % plaža od 361 plaže u Hrvatskoj koje sadrže pijesak.

Za ukupno 445 plaža evidentirano je da sadrže samo jednu vrstu materijala, 583 plaže sadrže dvije vrste materijala, 483 plaže tri različita materijala, a četiri ili više vrsta materijala sadrži 259 plaža. Na 134 obrasca nije bio naveden materijal prisutan na plažama. Od vrsta materijala prisutnog na plažama i prikazanog u tablici 2.3, najučestaliji je šljunak koji je prisutan na 1108 plaža, odnosno na 58,19 % od 1904 plaže. Potom su najprisutnije stijene na čak 792 ili 41,6 % plaža, dok je "kamen" označen kao prisutan i na 716 ili 37,61 % plaža. S obzirom na raniju napomenu da se geološki radi o jednom te istom materijalu, ove dvije kategorije prisutne su na 1067 ili 56,04 % plaža. To ovu zajedničku kategoriju čini gotovo jednakobrojnom kao i šljunak. Sitni šljunak nalazi se na 597 ili 31,36 % plaža, međutim ako ga se pribroji kategoriji šljunak, onda je šljunak daleko najučestaliji materijal te je prisutan na 1380 plaža ili 72,48 %. Beton kao materijal nalazi se na 550 ili čak 28,89 % plaža u Hrvatskoj, a što je značajno više od pijeska koji se nalazi na tek 361 ili 18,96 % plaža. S obzirom na metodološke nedostatke obrasca PL/14, za očekivati je da je beton kao materijal prisutan na plaži dobro evidentiran, jer ga je lako prepoznati, dok je pijesak potencijalno i prezastupljen u obrascima s obzirom da je bez jasne metodologije određivanja veličine zrna dio šljunčanih plaža potencijalno označen kao pješčani. Stoga je nedvojbeno Hrvatska puno bogatija betonskim kupalištima nego pješčanim plažama.

Kada je riječ o geološkoj definiciji plaže koja uključuje postojanje rastresitog materijala, onda takvih ima 1525 ili 80,09 % i označene su slovom G u tablici 2.3. Međutim, to ne isključuje i postojanje stjenovitih ili betonskih kupališta na istom dijelu obale koji PL/14 obrazac prepoznaje kao (zakonski definiranu) plažu. Naime, kupališta u evidenciji PL/14 obrazaca nalazi se 1247 ili 65,49 %. Brojanjem isključivo plaža u geološkom smislu, takvih plaža ima 521 ili 27,36 % dok isključivo kupališta, bez prisutnosti rastresitog materijala, ima 243 ili 12,76 %.

Tablica 2.3. Pregled prisutnosti različitih materijala navedenih na PL/14 obrascu na plažama s postotkom takvih plaža u županiji i nacionalno od ukupnog broja plaža.

Županija	DNŽ	LSŽ	SDŽ	ŠKŽ	IŽ	PGŽ	ZŽ	HRV
Materijal	Broj plaža							
	278	250	181	406	142	347	300	1904
Pijesak	54 (19.42%)	27 (10.8%)	43 (23.76%)	23 (5.67%)	37 (26.06%)	64 (18.44%)	113 (37.67%)	361 (18.96%)
Šljunak	145 (52.16%)	137 (54.8%)	225 (124.31%)	66 (16.26%)	172 (121.13%)	247 (71.18%)	116 (38.67%)	1108 (58.19%)
Sitni šljunak	115 (41.37%)	19 (7.6%)	185 (102.21%)	56 (13.79%)	35 (24.65%)	114 (32.85%)	73 (24.33%)	597 (31.36%)
Šljunak ili sitni šljunak	213 (76.62%)	144 (57.6%)	295 (162.98%)	92 (22.66%)	193 (135.92%)	284 (81.84%)	159 (53%)	1380 (72.48%)
Plaže (G)	226 (81.29%)	160 (64%)	313 (172.93%)	95 (23.4%)	208 (146.48%)	310 (89.34%)	213 (71%)	1525 (80.09%)
Isključivo plaže (G)	112 (40.29%)	60 (24%)	133 (73.48%)	15 (3.69%)	37 (26.06%)	90 (25.94%)	74 (24.67%)	521 (27.36%)
Kamen	54 (19.42%)	78 (31.2%)	115 (63.54%)	61 (15.02%)	158 (111.27%)	148 (42.65%)	102 (34%)	716 (37.61%)
Stijene	112 (40.29%)	70 (28%)	130 (71.82%)	48 (11.82%)	154 (108.45%)	197 (56.77%)	80 (26.67%)	791 (41.54%)
Stijene ili kamen	141 (50.72%)	98 (39.2%)	169 (93.37%)	82 (20.2%)	208 (146.48%)	241 (69.45%)	128 (42.67%)	1067 (56.04%)
Beton	55 (19.78%)	60 (24%)	74 (40.88%)	55 (13.55%)	70 (49.3%)	148 (42.65%)	88 (29.33%)	550 (28.89%)
Kupališta	161 (57.91%)	120 (48%)	211 (116.57%)	94 (23.15%)	213 (150%)	284 (81.84%)	164 (54.67%)	1247 (65.49%)
Isključivo kupališta	47 (16.91%)	20 (8%)	31 (17.13%)	14 (3.45%)	42 (29.58%)	64 (18.44%)	25 (8.33%)	243 (12.76%)

Posebno se ističe veliki broj plaža s pijeskom u Zadarskoj županiji, broj plaža sa sitnim šljunkom u Splitsko-dalmatinskoj županiji te stjenovitih (kamenih) i betonskih kupališta u Primorsko-goranskoj. Ukoliko se broje plaže koje po PL/14 obrascu sadrže samo jednu vrstu materijala, onda je evidentirano 190 plaža sa samo i isključivo šljunkom (9,98 % plaža), plaže sa isključivo sitnim šljunkom evidentirane su 97 puta (5,09 %) dok evidentiranih isključivo pješčanih plaža ima sveukupno 62 (3,26 %). Ako se sitni šljunak i šljunak tretiraju kao jedinstvena kategorija, plaža s isključivo tim materijalom evidentirano je 374 ili 19,64 %.

Prethodno navedeni podatci daju obris prosječne plaže na hrvatskoj strani Jadrana. Tipična hrvatska plaža u prosjeku je mala plaža s dužinom uz obalu u iznosu od oko tek 200 m, proteže se ka kopnu u širinu oko 7 m (što čini prosječnu površinu oko 1400 m²). Na plažama je prisutno više materijala, najčešće je prisutan šljunak, a potom stijene i sitni šljunak.

Metodologija korištena za određivanje prethodno spomenutih svojstava plaža zahtijeva nadogradnju. Iako prikupljeni podatci daju uvid u svojstva plaža u najširem smislu, pri budućoj analizi plaža u Hrvatskoj metodologija bi jasno trebala razlučiti plaže od kupališta, opisati i propisati postupak mjerenja dužine plaže i njene površine, a potencijalno se oslanjati i na određivanje plaža iz satelitskih podataka radije nego na evidenciju jedinica lokalne samouprave.

Podatci o plažama dalje su korišteni za usporedbu podataka o dohrani prikupljenih anketnim obrascem u sklopu ovog rada. Od 130 općina kojima je upućen anketni obrazac odazvalo se njih 89, a što čini 68 % ukupnog broja općina. Ukupno 56 općina je putem obrasca evidentiralo da je u razdoblju od 2015. do 2019. dohranjivalo plaže u svom području, dok je preostalih 33 utvrdilo da nije provodilo takve postupke u promatranom razdoblju. Od ukupnog broja općina njih 46 % je dohranjivalo plaže, 25 % nije dohranjivalo, dok za ostalih 29 % nema pouzdanih podataka. U 89 općina koje su se odazvale na anketu, po ranije analiziranim regionalnim programima i PL/14 obrascima, nalazi se sveukupno 1400 plaža. To od ukupnog broja od 1904 plaže u Hrvatskoj čini uzorak od 73,53 % svih plaža u Hrvatskoj za koje je sada prvi put poznat podatak o tome obavlja li se na njima dohrana ili ne.

Od 1400 plaža obuhvaćenih anketom, utvrđeno je da se tek 256 plaža dohranjivalo, odnosno njih 18,3 %. U odnosu na ukupan evidentiran broj plaža (i kupališta) u Hrvatskoj (1904), dohranjuje se 13,4 % plaža. Na tih 256 plaža za razdoblje od 2015. do 2019. ukupno je provedeno 828 postupaka dohrane. S obzirom na odnose ta dva broja, jasno je da se većina dohrana provodi redovito na jednim te istim plažama. Prosjek, odnosno omjer dohrana po broju plaža, iznosi 3,23 dok medijan iznosi 3 dohrane. Dakle, u danom razdoblju u trajanju od 5 godina prosjek i medijan broja dohrana na plažama koje su se dohranjivale iznosio je 3.

U tablici 2.4 prikazan je broj plaža po županijama, broj plaža koji se dohranjuje, postotci tih plaža od ukupnog broja plaža o kojima je dobiven podatak iz ankete i od ukupnog broja, potom ukupne količine novca i materijala utrošene po županijama. Najveći broj plaža dohranjuje se u Zadarskoj županiji, njih 67, odnosno petina svih plaža regionalnog programa Zadarske županije.

Nakon Zadarske, po apsolutnim brojkama dohranjenih plaža, slijedi Primorsko-goranska županija s njih 58. U relativnom odnosu na ukupan broj plaža u županiji, nakon Zadarske županije

slijedi Šibensko-kninska županija koja također dohranjuje gotovo petinu svojih plaža, tj. 19 % ili 27 od 142 plaže. Zadarska i Primorsko-goranska županija u tablici 2.4 uvelike nadmašuju ostale županije po broju plaža koje dohranjuju: dok one broje 67 i 58 plaža svaka, prva sljedeća županija je Istarska i broji tek 35 plaža, odnosno upola manje.

Promatra li se u tablici 2.4 broj izvršenih dohrana po županijama, najveći broj dohrana proveden je u Zadarskoj 243, potom u Primorsko-goranskoj županiji 156. Usprkos najmanjem broju plaža koje se dohranjuju, u Ličko-senjskoj županiji se 15 plaža dohranilo ukupno 67 puta, što je prosjek od 4,47 dohrana u pet godina te toj brojeci ne konkuriraju ostale županije. Sljedeća je Šibensko-kninska s 3,78 dohrana u pet godina, potom Zadarska i Dubrovačko-neretvanska s 3,63 odnosno 3,61 dohranom. Najmanje dohrana u pet godina po plaži provela je Istarska županija - samo 2,2.

Ličko-senjska županija po tablici 2.4 dohranjuje samo 15 plaža, međutim tu valja uzeti u obzir da se na odaslanu anketu odazvala samo jedna od tri općine na moru u ovoj županiji. Također, Ličko-senjska županija relativno dohranjuje samo 8,3 % plaža (po podacima iz ankete), a Splitsko-dalmatinska županija s dohranjivanih 26 plaža zauzima zadnje mjesto u relativnom iznosu od 7,5 % plaža u županiji koje dohranjuje. Uvaži li se činjenica da je anketa upućena svim općinama, a odaziv općina je iznosio ranije spomenutih 68 %, za očekivati je da iznosi koji su ovdje navedeni predstavljaju donju granicu te da su stvarne brojke više za potencijalno trećinu. Tako se i na razini Hrvatske može pouzdano reći da se dohranjuje više od osmine svih plaža, zasigurno 13,4 %, kako je i navedeno u tablici 2.4.

Promotre li se u tablici 2.4 ukupni troškovi po županijama, bilo troškovi u novcu ili u količini materijala korištenom za dohranu, ispred svih je Zadarska županija u kojoj je utrošena trećina ukupnih sredstava i materijala upotrijebljenih za dohranu plaža u Hrvatskoj. U Zadarskoj županiji najviše su na dohrane plaža utrošili Općina Sveti Filip i Jakov s utrošenih 4,3 milijuna kuna i Grad Nin s utrošenih 3,8 milijuna kuna u razdoblju od promatranih pet godina. Pri tome Općina Sveti Filip i Jakov nije navela koliko materijala je koristila pri provedenim dohranama, dok je Grad Nin utrošio 49 tisuća m³ materijala. Grad Nin je stoga odgovoran za jednu četvrtinu (25,3 % ili 49 305 m³) svog utrošenog materijala evidentiranog anketom na nacionalnoj razini, Općina Sveti Filip i Jakov je odgovorna za osminu (12,7 % ili 4.270.960,8 kn) nacionalno utrošenih sredstava, a Grad Split za čak petinu (19,14 % ili 6.427.787,47 kn) sredstava i pri tome i šestinu ukupne količine materijala (16,46 % ili 32 082 m³).

Tablica 2.4. Pregled podataka o dohrani plaža po županijama i nacionalno.

Županija	# plaža	# dohranjenih plaža	% dohranjenih od ukupnog # plaža	# izvršenih dohrana	Omjer dohrana i dohranjenih plaža	Ukupan trošak (kn)	Ukupan materijal (m ³)
Dubrovačko-neretvanska	278	28	10,1	101	3,61	1.596.461,20	4.437,90
Ličko-senjska	181	15	8,3	67	4,47	637.000,00	4.900,00
Splitsko-dalmatinska	347	26	7,5	82	3,15	8.090.718,41	54.902,41
Šibensko-kninska	142	27	19	102	3,78	4.310.369,24	30.118,37
Istarska	250	35	14	77	2,2	2.465.748,36	8.994,53
Primorsko-goranska	406	58	14,3	156	2,69	4.068.070,50	17.849,11
Zadarska	300	67	22,3	243	3,63	12.448.394,51	74.088,99
Hrvatska	1904	256	13,4	828	3,23	33.616.762,22	195.291,31

Za slučaj dohrana Grada Nina, materijal i sredstva su većinski utrošena na rekonstrukciju plaža Ždrijac i Kraljičine plaže, specifične pješčane plaže značajno uništene djelovanjem iznimnog olujnog juga i poplavnog događaja koji se dogodio u rujnu 2017. godine. Prilikom rekonstrukcije plaža je refulirana velikom količinom pješčanog materijala iz Ninskog zaljeva, ne samo zbog obnove plaže, već i zbog potreba produbljenja zaljeva, koji je nakon olujnog događaja postao preplitak za normalan promet brodova. Refuliranje morskog dna rijetko je korištena metoda u Hrvatskoj, a obuhvaća prikupljanje pijeska s morskog dna usisavanjem zajedno s morskom vodom nakon čega se materijal i voda transportiraju tlačnim cjevovodom na željenu lokaciju, u ovom slučaju plažu, te se tamo pijesak dalje razastire. Zbog specifičnosti postupka rekonstrukcije plaža u Ninu vjerojatno je i opravdana visoka cijena dohrane, dok za slučaj Grada Splita i Općine Sveti Filip i Jakov nisu poznati detalji oko provedenih dohrana koji bi opravdali visoki trošak i količinu materijala.

Da se u navedenim slučajevima zaista radi o izuzetno visokim troškovima u novcu i materijalu za dohrane potvrđuju i izračunati kvantili utrošenih sredstava i materijala navedeni u tablici 2.5. Ukupno 75 % dohrana za koje su prikupljeni podatci anketnim obrascem od općina koštale su do 30 000 kuna, a pri tome je korišteno do 128,57 m³ materijala. Od evidentiranih 828 dohrana, 75 % čini 621 provedenu dohranu koje su unutar prethodno navedenog 3. kvantila za troškove i materijal. Drugim riječima, većina dohrana u Hrvatskoj provedenih u ovom razdoblju su dohrane plaža s relativno malim količinama materijala.

Ukupan trošak 75 % provedenih dohrana (3. kvartil u tablici 2.5) koje su pojedinačno koštale manje od 30 000 kn i koristile manje od 128,57 m³ materijala iznosio je oko 5 milijuna kuna. U njima je upotrijebljeno svega 24 tisuće m³ materijala. To predstavlja tek mali dio troška novca i materijala upotrijebljenoga za dohrane u promatranom razdoblju. Većinu troška u tablici 2.5 generirale su dohrane u 4. kvartilu: preko 22 milijuna kuna i s preko 170 000 m³ trošak je u slučaju 207 (25 % od ukupno 828) dohrana. Taj iznos je dobiven kao razlika 4. i 3. kvantila ukupnog troška i materijala u tablici 2.5 te predstavlja iznos troška i materijala upotrijebljenog za 25 % najskupljih (iznad 30 000 kuna) i volumenom najvećih (iznad 128,57 m³) dohrana. Tu se ubrajaju i prethodno spomenute dohrane gradova Nina i Splita te Općine Sveti Filip i Jakov, a koje su u odnosu na većinu dohrana koristile daleko iznadprosječne količine novca i materijala.

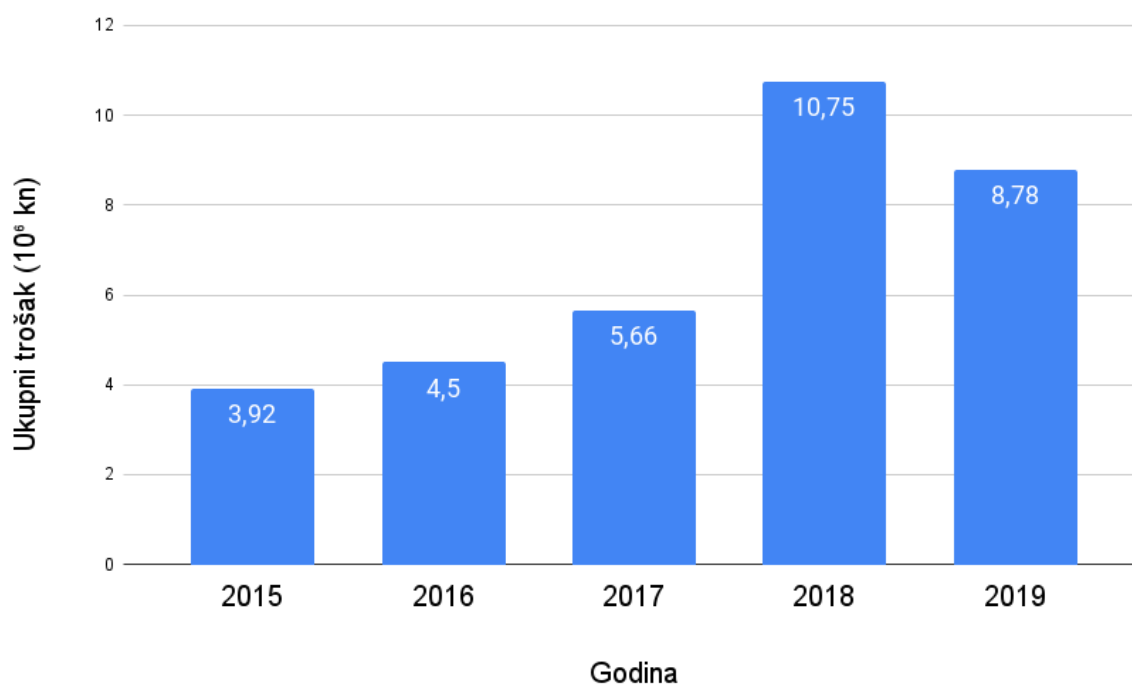
Ukupne količine troškova novca i materijala upotrijebljenoga za dohranu plaža u Hrvatskoj, tablica 2.4, iznose 33,6 milijuna kuna i 195,3 tisuća m³ za petogodišnje razdoblje. Razlika između ukupnog troška u tablici 2.4 i 2.5 nastaje zbog 6.199.685,54 kuna utrošenog na dohrane za koje općine u anketi nisu navele korištenu količinu materijala pa nije bilo moguće odrediti kojem kvartilu ta dohrana pripada. Taj trošak nije pribrojen u tablici 2.5, ali ukoliko se pribroji ukupnom trošku za 4. kvartil onda ukupan trošak postaje jednak onom navedenom u tablici 2.4 od 33.616.762,22 kuna. Uvažavajući da se trećina općina nije odazvala na anketu, za očekivati je da su troškovi viši od toga.

Na slici 2.2 prikazani su godišnji troškovi dohrana za cijelu Hrvatsku u milijunima kuna. Najviše sredstava utrošeno je 2018. godine, a što je ujedno godina kada je i Grad Nin financi-

Tablica 2.5. Izračunati kvartili za trošak dohrane u novcu i trošak dohrane u materijalu, a na uzorku svih zabilježenih dohrana u razdoblju od 2015. do 2019. evidentirane anketnim obrascem. Posljednja dva stupca prikazuju ukupne količine novca i materijala utrošene na dohrane koje spadaju unutar navedenih kvartila iznosom i količinom materijala.

Kvartil	Trošak (kn)	Materijal (m ³)	Ukupan trošak (kn)	Ukupno materijala (m ³)
1.	3.957,59	20,00	415.746,48	2.318,38
2.	14.510,00	60,00	1.539.038,96	8.332,53
3.	30.000,00	128,57	5.055.576,10	24.572,09
4.	2.566.642,50	33.235,00	27.417.076,68	195.291,31

rao dohranu plaže Ždrijac u iznosu od 2,56 milijuna kuna, Općina Sveti Filip i Jakov je 2018. rekonstruirala plažu Morovička u iznosu od jednog milijuna kuna, a Grad Split potrošio je rekordnih 1,7 milijuna kuna. U odnosu na prve tri godine (2015. - 2017.), u 2018. i 2019. godini utrošeno je najviše sredstava za dohranu. Iako je vremenski niz u kojem se promatraju troškovi kratak, vidi se uzlazni trend u troškovima dohrana.

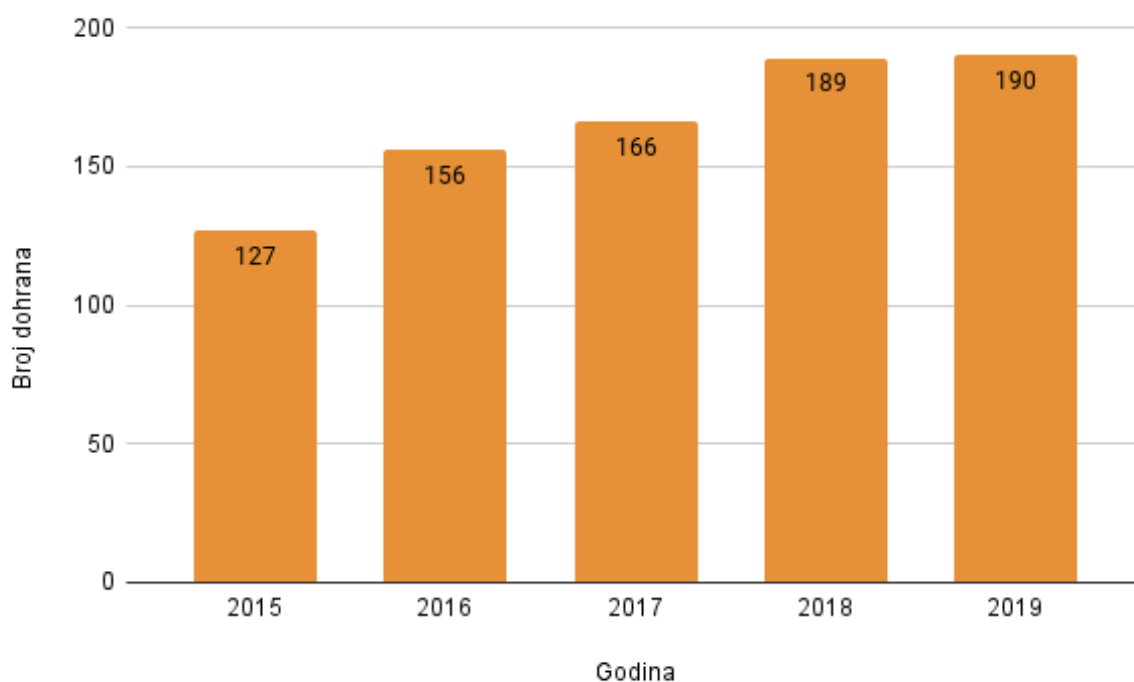


Slika 2.2. Ukupan trošak dohrane plaža za Hrvatsku utvrđen anketom za razdoblje od 2015. do 2019. i raspoređen po godinama u milijunima kuna (bez PDV-a).

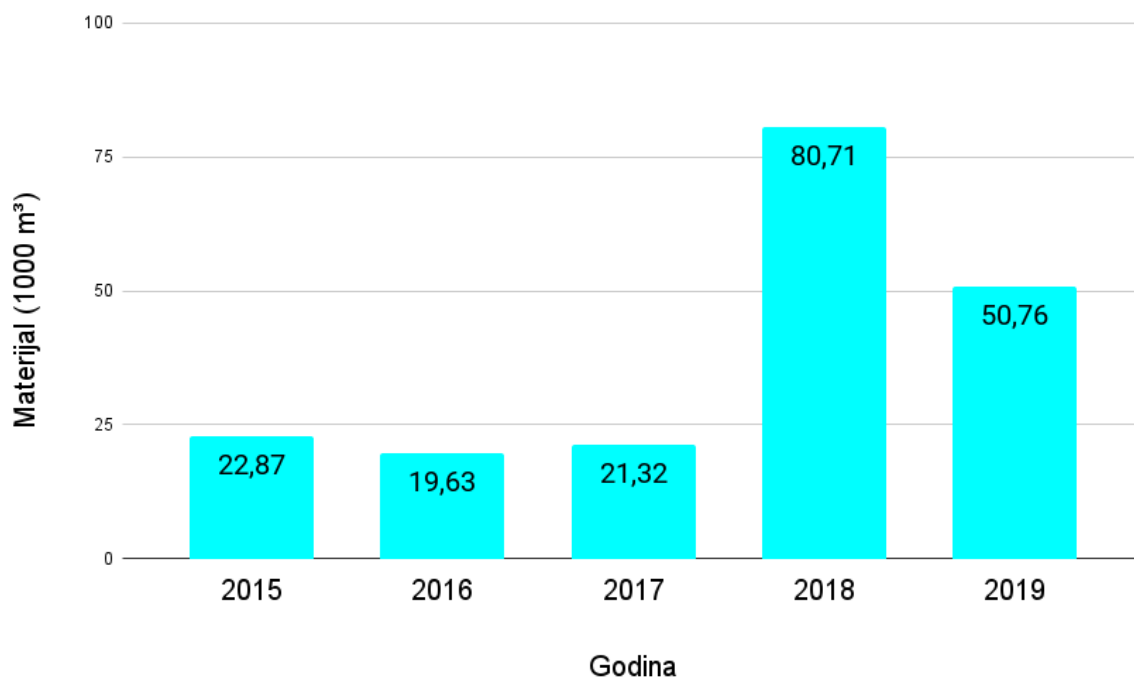
Slično se vidi i ukoliko se promotri broj dohrana izvršenih po godinama na slici 2.3. U 2018. i 2019. godini provodi se 190 dohrana po godini, a što je približno upola više nego 127 dohrana koliko je bilo izvršeno 2015. godine. Dakle, porasla je učestalost dohranjivanja plaža u promatranom razdoblju.

Na slici 2.4 prikazane su i količine materijala upotrijebljene za dohrane od 2015. do 2019. godine. Količine upotrijebljenoga materijala značajno su porasle 2018. i 2019. godine u odnosu

na prve tri promatrane godine. Pri tome valja istaknuti da je 2018. godine Grad Nin za dohranu plaže Ždrijac upotrijebio 33 235 m³ materijala, a Općina Primošten na plaži (poluotoku) Raduča 10 800 m³. U zbroju, te dvije dohrane koriste više od polovice svog upotrijebljenoga materijala za dohranu 2018. godine. Slično, u 2019. godini Grad Nin je upotrijebio 15 111 m³ za dohranu Kraljičine plaže, a Općina Primošten dodatnih 6 500 m³ na plaži (poluotoku) Raduči, čineći 43 % svog upotrijebljenoga materijala za tu godinu.



Slika 2.3. Ukupan broj dohrana provedenih u Hrvatskoj utvrđeno anketom za razdoblje od 2015. do 2019. i raspoređeno po godinama.

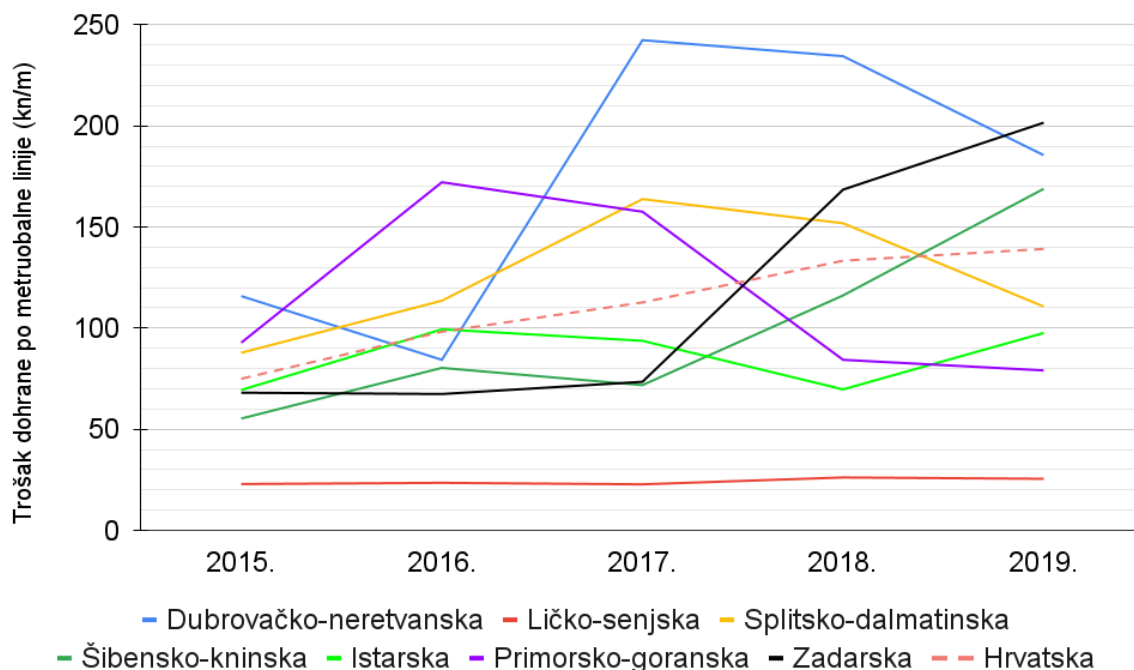


Slika 2.4. Ukupna količina materijala potrošena na dohrane plaža za Hrvatsku utvrđena anketom za razdoblje od 2015. do 2019. i raspoređena po godinama u tisućama m³.

Uvažavajući rezultate slika [2.2](#), [2.3](#) i [2.4](#), troškovi dohrane rastu iz godine u godinu, a raste i broj dohrana, dok količina materijala ne prati takav trend. Problem predstavljaju 2018. i 2019. godina kada je upotrijebljena količina materijala značajno veća od ranijih i to za 4 puta u 2018. i 2,5 u 2019. u odnosu na prosjek godina 2015., 2016. i 2017.. Zanimajući te dvije godine, od 2015. do 2017. troškovi dohrane su nedvojbeno rasli s obzirom da je upotrijebljena količina materijala ostala ista, a broj dohrana se povećao. Zanimljiva je i činjenica da se broj dohrana povećava kontinuirano iz godine u godinu. Posljednje dvije godine, 2018. i 2019., trebalo bi dodatno analizirati, a posebnu pažnju obratiti na pojedinim velike dohrane i plaže, a što nije moguće temeljem samo ovih podataka niti je fokus ovog rada. Ako se trend od 2015. do 2017. godine nastavi, može se očekivati da će se postupak dohrane na hrvatskim plažama biti češći, a rast će mu i troškovi. S druge strane, upotrijebljene količine materijala neće rasti proporcionalno broju dohrana i novcu.

Troškovi dohrane po metru dužine plaže, dobiveni omjerom troška dohrane iz ankete i dužine plaže iz regionalnih programa, prikazani su na slici [2.5](#) za svaku županiju i po godinama. Izuzev Ličko-senjske županije gdje je trošak dohrane po metru dužine plaže ostao gotovo nepromijenjen od 2015. do 2019. godine, u ostalim županijama trošak dohrane po metru dužine plaže značajno varira iz godine u godinu.

Najveći porast u troškovima po metru dužine plaže ostvaren je u Dubrovačko-neretvanskoj županiji s $84 \frac{kn}{m}$ 2016. godine na $242 \frac{kn}{m}$ 2017. godine, a slično utrostručenje troškova prisutno je bilo i u Zadarskoj županiji od 2017. do 2019. gdje su troškovi porasli sa $73 \frac{kn}{m}$ na $201 \frac{kn}{m}$.

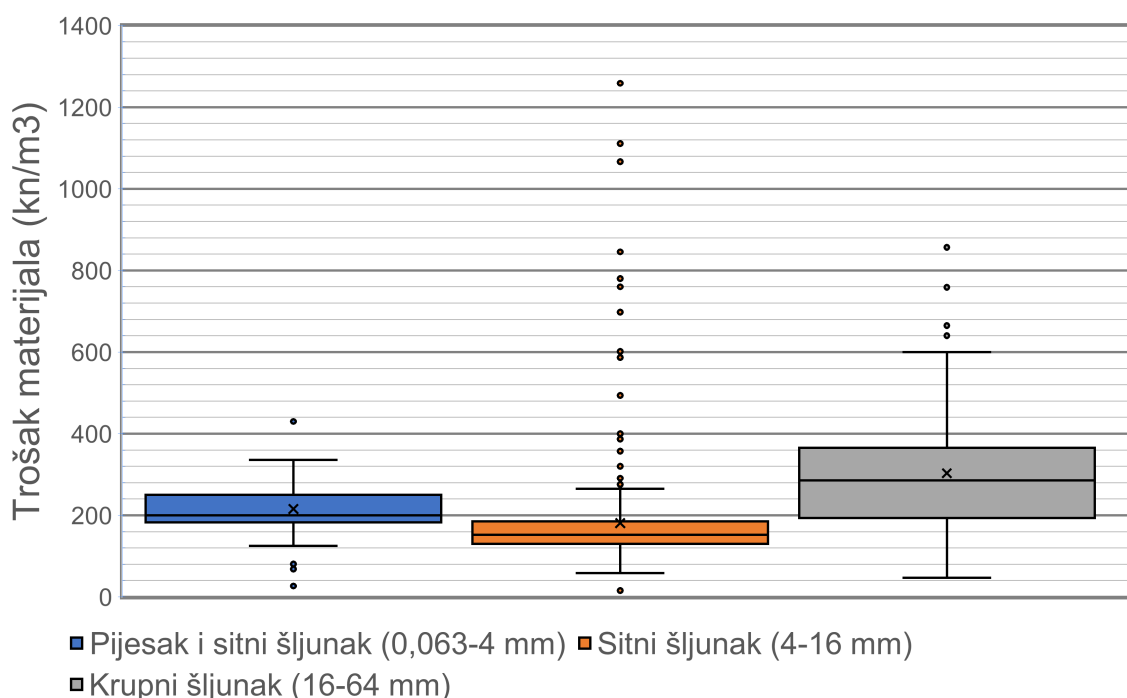


Slika 2.5. Pregled troška dohrane po metru obalne linije usrednjen za svaku županiju i nacionalno po godini.

Na nacionalnoj razini trošak dohrane je od $75 \frac{\text{kn}}{\text{m}}$ plaže 2015. godine kontinuirano rastao do $139 \frac{\text{kn}}{\text{m}}$ u 2019. godini, što predstavlja gotovo udvostručenje troškova u petogodišnjem razdoblju. Stoga se može očekivati da je i svaka županija u prosjeku zabilježila porast troškova dohrane u promatranome razdoblju.

Dalje je grupiran omjer troška dohrane i upotrijebljenoga materijala u ovisnosti o veličini zrna materijala korištenog za dohranu. Od 828 dohrana za njih 657 općine su jednoznačno navele veličinu zrna kao pijesak i sitni šljunak u rasponu od 0,063 do 4 milimetra, sitni šljunak od 4 do 16 milimetara i krupni šljunak od 16 do 64 milimetra. U kategoriji miješanoga materijala zabilježene su anketom 104 dohrane, dok za preostale dohrane nije poznata veličina zrna ili ju nije bilo moguće odrediti.

Troškovi 1 m^3 materijala za jednoznačne kategorije prikazani su na *box and whiskers* dijagramu na slici 2.6 s označenim medijanom (crta) i srednjakom (križić) za svaku kategoriju materijala.



Slika 2.6. Box and whiskers dijagram za jediničnu cijenu m^3 (bez PDV-a) materijala upotrijebljenoga za dohranu plaža. Križićem je označena srednja vrijednost.

Sitni šljunak prosječno je najjeftiniji materijal po kubnom metru za dohranu plaže - medijan cijene mu iznosi $152 \frac{kn}{m^3}$ a prosječno oko $180 \frac{kn}{m^3}$. Slijede ga pijesak i sitni šljunak u iznosu od $200 \frac{kn}{m^3}$ tj. $216 \frac{kn}{m^3}$, a najskuplji je krupni šljunak u iznosu od 286 odnosno $303 \frac{kn}{m^3}$. Međutim, krupni šljunak ne samo da je najskuplji materijal za dohranu plaže, njegova cijena i najviše varira: tako je 50 % svih zabilježenih dohrana koristilo krupni šljunak s cijenom u rasponu između 193 i $366 \frac{kn}{m^3}$.

Najviša jedinična cijena m^3 materijala izvan interkvartilnog raspona bila je za sitni šljunak, ali u pravilu se radi o dohranama koje su koristile manje od $120 m^3$ materijala i ukupno su koštale ispod 30 000 kuna te je opravdano za pretpostaviti da je visok trošak materijala u ovom slučaju vjerojatno uzrokovan činjenicom da je u anketnom obrascu naveden trošak ne samo dohranjivanja i/ili materijala već i drugih radova na plaži. Također, najviše dohrana izvršeno je upravo sitnim šljunkom: njih 420 u odnosu na 63 dohrane pijeskom i sitnim šljunkom, tj. 174 dohrane provedene krupnim šljunkom.

Prisutnost dohrane na velikom broju hrvatskih plaža (13 - 18 %) najčešće redovito (tri puta u pet godina) zajedno s porastom broja dohrana i troškova postupka upućuje na izraziti interes jedinica lokalne samouprave za održavanjem postojećih plaža. Međutim, s obzirom na visok pritisak turizma izgledno je da je ovakav interes dijelom posljedica potreba i želja posjetitelja plaža više nego objektivne potrebe za održavanjem plaža i njene obalne linije. Tome u prilog ide i odabir materijala za dohranu. Upotreba većinom istog tipa materijala, sitnog šljunka od 4 do 16 milimetra, u količinama koje sežu do $120 m^3$, nije u skladu s prirodnim obilježjima plaža na hrvatskom Jadranu gdje očekujemo krupnija zrna sedimenta i do 10 centimetara. Dohrana

bi, iz perspektive ublažavanja posljedica erozije i očuvanja prirodnog okoliša, trebala uvažavati konfiguraciju obale, litologiju i prirodni intenzitet erozije, a ne potrebe u turizmu.

Za razumijevanje prakse dohrane u Hrvatskoj prikupljeni podatci uspoređeni su s podacima za ostale države iz rada autora Hanson i dr. (2002). Iz tog rada preuzeta je Tablica 3 i dodan joj posebni stupac s podacima iz analize u ovom poglavlju, tj. podatci za Hrvatsku, čime je izrađena nadopunjena tablica 2.6. Promatrajući ukupne količine materijala upotrijebljenoga prilikom dohrane u tablici 2.6 vidi se je obuhvat dohrane u Hrvatskoj značajno manji od prakse u Europi, čak i ako se uvaži kratko promatrano razdoblje i to za 2 do 3 reda veličine. Dok zemlje poput Nizozemske u 10 godina utroše 60 milijuna m^3 materijala ili Španjolske sa 110 milijuna m^3 tijekom 13 godina, Hrvatska je u pet godina utrošila 0,2 milijuna m^3 , odnosno 300 i 550 puta manje materijala.

Promatrajući duljinu dohranjene obale, tj. LN, gdje se broji jedinstvena duljina obale koja se dohranjuje, Hrvatska ipak konkurrira ostalim zemljama iz rada Hanson i dr. (2002). Hrvatska je tako dohranila 108 kilometara plažnoga prostora, ipak nešto manje nego Nizozemska sa 152 kilometra ili Španjolska s 200 kilometara, ali više nego Francuska, Italija ili Danska čiji su podatci prikazani za razdoblje od 30-tak godina.

LP ili ukupna duljina dohranjene obale za Hrvatsku iznosi 356 kilometara, a što je među višim iznosima te je usporedivo s 313 kilometara dohranjenih u Njemačkoj tijekom 48 godina ili 297 kilometara u Nizozemskoj tijekom samo 10 godina. Podatak o ukupnoj duljini pješčane i šljunčane obale ili LS ove vrijednosti stavlja u kontekst. Tako Hrvatska raspolaže sa 619 kilometara pješčane i šljunčane obale, a tijekom promatranih pet godina dohranila je jednu šestinu te obale (LN u iznosu od 108 kilometara). Zbrajajući ukupnu duljinu obale koja se dohranila, Hrvatska je kumulativno dohranila polovicu svoje pješčane i šljunčane obale (LP u iznosu od 356 kilometara). Europske zemlje, s druge strane, raspolažu s puno većim šljunčanim i pješčanim obalama - Italija tako raspolaže sa 6320 kilometara. Međutim, Hrvatska se može usporediti s Njemačkom koja ima 602 kilometra obale.

Ovdje sličnosti završavaju te se nastavljaju razlike. Promatrajući količinu materijala dohranjenog po metru obalne linije godišnje, Hrvatska na plaže dodaje oko $0,36 \frac{m^3}{m \text{ god.}}$, a što je za red veličine manje od ostalih europskih zemalja koje koriste od 5,6 (Italija) do čak $42,3 \frac{m^3}{m \text{ god.}}$ (Španjolska). Čak i Njemačka koristi oko $10 \frac{m^3}{m \text{ god.}}$, a što je 30 puta više nego Hrvatska. Drugim riječima, Hrvatska s relativno malo materijala dohranjuje svoje plaže dok ostale zemlje koriste velike količine materijala.

Tablica 2.6. Usporedba dohrane plaža u Hrvatskoj s drugim europskim zemljama i SAD-om. Podatci za Francusku, Italiju, Njemačku, Nizozemsku, Španjolsku, Ujedinjeno Kraljevstvo, Dansku i SAD preuzeti su iz rada Hanson i dr. (2002), tablice 3 na stranici 18.

Država	HR	FR	IT	DE	NL	ES	UK	DK	USA
Y = Broj promatranih godina (god.)	5	33	37	48	10	13	44	24	46
V = Ukupna količina materijala (10^6 m^3)	0,195	12	15	50	60,2	110	20	31	144
LN = Duljina dohranjene obale (broji se obalna linija plaže pri dohranjivanju, ali samo jednom) (km)	108	35	73	128	152	200	/	80	350
LP = Ukupna duljina dohranjene obale (broji se obalna linija plaže pri svakom dohranjivanju) (km)	356*	190	85	313	297	525	/	515	/
LS = Ukupna duljina pješčane i šljunčane obale (km)	516**	1960	6320	602	292	1760	3670	500	61400
AVN = Količina materijala dohranjena po metru obalne linije godišnje = $V/LN/Y \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m god.}} \right)$	0,36	10,4	5,6	10	39,6	42,3	/	16	9
AVP = Prosječna količina materijala za sve projekte = $V/LP \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}} \right)$	0,55	63	176	210	207	210	/	60	/
AVS = Prosječna količina materijala po duljini cijele pješčane i šljunčane obale = $V/LS/Y \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m god.}} \right)$	0,08	0,19	0,11	1,7	20,6	4,8	/	2,6	0,05
ANF = Broj dohranjivanja po plaži = $LP/LN (/)$	3,3	5,4	1,2	2,4	1,9	2,6	/	6,4	/
ARI = Prosječni interval nadohranjivanja (ponovljene dohrane) = Y/ANF (god.)	1,52	6,1	31,8	19,6	5,2	4,9	/	3,7	/
Postotak dohranjene obale LN/LS (%)	20,9	1,8	2	21,6	52,1	11,4	/	16	0,6
RUV = Raspon korištenog volumena po metru obalne linije $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}} \right)$	0,005- 10,4	3,3- 400	19-511	30- 500	31- 596	70- 450	/	10- 100	/

* Ranije publicirani iznos u radu Bogovac i dr. (2023b) rezultat je grube greške.

** U odnosu na iznos u Bogovac i dr. (2023b), ovdje je LS hrvatske obale utvrđen zbrajajući duljine plaža u geološkom smislu, tj. plaža koje sadrže pijesak, šljunak ili sitni šljunak.

Pretpostavi li se da s tom količinom materijala samo održavaju zatečeno stanje svoje obale, onda europske zemlje erozijom gube značajan dio obale dok je u Hrvatskoj ta vrijednost značajno manja. Slična je situacija u vezi s prosječnom količinom materijala za sve projekte - tu Hrvatska koristi tek $0,55 \frac{m^3}{m \text{ god.}}$, ponovno stotinjak puta manje od ostalih europskih zemalja.

Po iznosu prosječne količine materijala upotrijebljene po duljini cijele pješčane i šljunčane obale (AVS) Hrvatska ima ipak usporedive vrijednosti s ostalim europskim zemljama. Tako AVS iznosi $0,06 \frac{m^3}{m \text{ god.}}$ što je među promatranim zemljama najmanje, dvostruko manje nego u Italiji ili trostruko manje u usporedbi s Francuskom. Međutim, valja uzeti u obzir da je ukupna duljina pješčane i šljunčane obale za slučaj Hrvatske ovdje precijenjena, stoga bi i od ove izvedene veličine trebalo očekivati nešto veći iznos. Također, treba uvažiti da Italija i Francuska imaju značajnu veću duljinu pješčane i šljunčane obale od Hrvatske te je bolja usporedba s Njemačkom u odnosu na koju Hrvatska ima ipak 30 puta manji AVS.

Hrvatska drži korak i s brojem dohranjivanja po plaži (ANF) s iznosom od 3,3 što je i u skladu s vrijednostima za druge države. Ali prosječni interval nadohranjivanja (ARI tj. vremenski razmak između dvije uzastopne dohrane) je u slučaju Hrvatske izuzetno nizak i iznosi tek 1,52 godine. To je tri do četiri puta manje od najbliže Francuske i Nizozemske kojima ARI iznosi 6,1 i 5,2 godina. Drugim riječima, Hrvatska učestalo provodi dohrane plaža u usporedbi s ostalim europskim zemljama. Zahvaljujući toj učestalosti, odnosno kratkom intervalu između uzastopnih dohrana, dobiven je i visoki postotak dohranjenosti obale u iznosu od čak 17,4 %, što je deset puta više od Italije i Francuske, a usporedivo s Njemačkom i Danskom koje su isti postotak na približno usporedivu duljinu ukupne pješčane i šljunčane obale postigle tijekom 48 i 24 godine - Hrvatska je isto ostvarila u samo pet godina.

Za kraj, promotre li se rasponi korištenog volumena po metru obale, Hrvatska uvjerljivo koristi najmanju količinu materijala za dohranu svoje obale, tek $0,005 \frac{m^3}{m}$. S druge strane, pri najvećim dohranama u Hrvatskoj korišteno je oko $10,5 \frac{m^3}{m}$ što je, osim za slučaj Francuske, usporedivo s najmanjim dohranama u Europi. Promatrajući medijane dužine obalne linije (200 metara) i količine upotrijebljenoga materijala ($60 m^3$) za Hrvatsku iz prošlog poglavlja, omjer tih vrijednosti iznosi $0,3 \frac{m^3}{m}$, što je također značajno manje od svih najmanjih dohrana kakve se provode u Europi.

Sveukupno dobiveni rezultati pokazali su da se ističu značajne razlike između dohrana kakve se provode u Europi i u Hrvatskoj. Duljina pješčane i šljunčane obale u Hrvatskoj usporediva je s drugim EU zemljama, kao i duljina dohranjene obale i ukupna duljina dohranjene obale. Pri tome je važno istaknuti da je Hrvatska to postigla učestalim dohranjivanjem u samo pet promatranih godina i to s prosjekom od 3,3 dohranjivanja po plaži, što je usporedivo s ostalim zemljama. Međutim, iste te brojke ostale zemlje su postigle u razdobljima od 10 do 40 godina, a ne u samo pet godina. Moguće je zaključiti da je intenzitet dohrane u Hrvatskoj snažniji nego u ostalim EU zemljama, a upravo zbog učestalog dohranjivanja (skoro svakih 1,52 godine u prosjeku) Hrvatska je dohranila 17,4 % svoje šljunčane i pješčane obale.

S druge strane, količine materijala korištene pri ovim dohranama su malene u usporedbi s

dohranama u Europi. Isto tako je i mala količina materijala koja se godišnje dodaje po metru obalne linije kao i prosječna količina materijala za sve projekte. Tu se radi o tek $0,55 \frac{m^3}{m}$ obalne linije godišnje po dohrani.

Stoga se može zaključiti da je dohrana u Hrvatskoj zaista intenzivna obuhvatom, ali s malim količinama korištenoga materijala, što ne odgovara praksi ostalih europskih zemalja. Time je opovrgnuta hipoteza da je dohrana plaža u Hrvatskoj usporediva sa sličnim postupcima u Europi. U budućnosti je potrebno ispitati opravdanost postupaka dohrane u Hrvatskoj uvažavajući pri tome specifičnost hrvatskih plaža kao malih šljunčanih plaža zaštićenih otočnim pojasom. Jedan od mogućih razloga zašto je dohrana u malim količinama u Hrvatskoj učestala je sklonost džepnih plaža rotaciji, odnosno longitudinalnom transportu sedimenta pri kojem se pri različitim valnim prilikama naizmjenično na svakom od rubova plaže akumulira sediment (Pranzini i dr., 2013). Takav fenomen može dati dojam da plaža gubi sediment zbog djelovanja oluja, što je teško ocijeniti bez provedbe mjerenja i dugoročnog praćenja plaža. Razlog učestaloj dohrani plaža u Hrvatskoj mogao bi biti upravo u slučaju kada se odluke o dohrani donose bez stručnog uporišta, pod pritiskom potreba turističke industrije.

Za potrebe ispitivanja ove hipoteze, objedinjeno je nekoliko različitih nizova podataka o plažama i dohrani, međutim preostaje pitanje točnosti tih izvora s obzirom na metodološke nedostatke primarno PL/14 obrasca. Usprkos tome, korišteni niz podataka o plažama početna je točka za daljnje istraživanje tipičnih hrvatskih plaža - kratkih, šljunčanih i džepnih. Nedostupnost podataka o dohrani plaža ostaje glavni ograničavajući faktor za daljnja istraživanja jer zakonska regulativa odgovornost za dohrane plaža i dalje ostavlja pojedinačnim lokalnim samoupravama uz prethodnu suglasnost regionalne samouprave ili ministarstva u čijem je djelokrugu zaštita okoliša, ali bez šire strategije i praćenja.

3. *Kalibracija numeričkog modela XBeach-Gravel*

3.1. Uvodno o kalibraciji modela XBeach-Gravel

Prije korištenja modela XBeach-Gravel potrebna je kalibracija modela za specifične uvjete u kojima će on biti korišten. Drugim riječima, kalibracija je postupak kojim se parametre modela prilagođava s ciljem da model pruži dobar opis sustava koji se modelira. Pri postupku kalibracije uspoređuju se rezultati modela s mjerenjima sustava i postepeno mijenjaju parametri modela dok god rezultati i mjerenja ne postignu zadovoljavajuće slaganje. Postupak kalibracije modela nužno je provesti kako bi se postiglo to da rezultati modela i vjerojatnost nastupanja tih rezultata odgovaraju stvarnosti. U suprotnom model nije pouzdan.

Za potrebe kalibracije numeričkog modela XBeach-Gravel u ovom radu korištena su dva niza mjerenih podataka. Prvi niz preuzet je od provedenih laboratorijskih mjerenja u valnom kanalu u Hannoveru u Njemačkoj, a eksperimentalni postav i rezultati navedeni su u radu López de San Román-Blanco i dr. (2006). Drugi niz podataka za kalibraciju valni su događaji izmjereni na umjetnoj plaži Ploče, a izvršeni su u sklopu projekta Beachex i izrade ove disertacije.

Za ocjenu uspješnosti modela u predviđanju promjena na plaži nastalih tijekom djelovanja valova korištena je Brierova ocjena modela (engl. *Brier skill score*, skraćeno BSS) koja vrednuje razliku između rezultata modela i mjerenja. Odabirom parametara modela pri kojem Brierova ocjena postiže najveći iznos izvršena je kalibracija modela XBeach-Gravel za slučaj plaže u laboratoriju u Hannoveru kao i plaže Ploče. Kalibrirani model za slučaj u Hannoveru poslužio je kao demonstracija koncepta i za usporedbu ponašanja pojednostavljenog profila šljunčane plaže u valnom kanalu s prirodnim profilom plaže Ploče prilikom usporedivih valnih uvjeta. Kalibrirani model plaže Ploče dodatno je i validiran na temelju dodatnog valnog događaja, a kako bi se model mogao dalje koristiti za procjenu pomaka obalne linije u daljnjim poglavljima.

3.2. Metodologija kalibracije modela

3.2.1. Opis numeričkog modela XBeach-Gravel

Za potrebe kvalitetnog upravljanja, održavanja i gradnje šljunčanih plaža nužno je pouzdano predvidjeti odaziv plaža na različite uvjete. Danas je učestala upotreba složenih numerički modela čije je glavno ograničenje računalna snaga zajedno s fizikalno-matematičkim opisom prirodnih procesa, a koriste se i empirijske formule. Za slučaj plaža, razumijevanje procesa na pješčanim plažama prednjačilo je u odnosu na razumijevanje šljunčanih plaža, posljedično postoji niz modela za opis procesa na pješčanim plažama. Modeli za pješčane plaže koji opisuju dugoročnije promjene u *swash* zoni, tj. prostoru obale koji zapljuskuju valovi, grupiraju se u tri kategorije: s empirijskom formulom transporta sedimenta, s metodama distribucije transporta sedimenta i s metodom ravnotežnog stanja. Sveukupno broje preko 15 različitih modela koji se danas upotrebljavaju (Chen i dr., 2023), uključujući i model XBeach (Roelvink i dr., 2009). Za slučaj šljunčanih plaža dugo su jedini dostupni modeli bili empirijske formule čija je primjenjivost ograničena isključivo na uzak set uvjeta za koji su određene (McCall i dr., 2014).

Glavna prepreka razvoju modela za šljunčane plaže je kompleksnost *in-situ* mjerenja na šljunčanim plažama gdje prevladavaju snažni valni uvjeti. To za posljedicu ima malo dostupnih istraživanja i mjerenja na šljunčanim plažama izvan laboratorijskih uvjeta koji bi omogućili opis hidrodinamike i transporta sedimenta nužne za razvoj složenijih modela (Poate i dr., 2013). Ipak, zbog porasta interesa za istraživanjem šljunčanih plaža, kao i zbog porasta upotrebe šljunka pri dohrani pješčanih plaža, javila se potreba za razvojem procesnog modela koji bi opisivao hidrodinamiku i morfodinamiku specifičnu za šljunčane plaže. Koristeći se ranije spomenutim modelom otvorenoga koda za pješčane plaže naziva XBeach Williams i dr. (2012) i Jamal i dr. (2014), proširuju model jednažbama za transport šljunka i infiltraciju vode te demonstriraju dobro slaganje takvih proširenih modela s ograničenim spektrom rezultata mjerenja na šljunčanim plažama i u laboratoriju. Naslanjajući se na te rezultate, u svom doktorskom radu McCall (2015) dalje radi na razvoju posebnog procesnog modela izvedenog iz XBeacha, a za opis morfodinamike na šljunčanim plažama tijekom olujnih događaja. Izmjene i nadopune modela XBeach predstavljene u tom radu rezultirale su s novim numeričkim modelom nazvanim XBeach-Gravel.

Za razvoj XBeach-Gravela prvo je validirana hidrodinamika postojećeg modela XBeach nadograđenog s nehidrostatičnim modulom za razlučivanje djelovanja val-po-val na različitim šljunčanim plažama bez opisa morfodinamike (McCall i dr., 2014; McCall, 2015). XBeach može dobro opisati hidrodinamiku na šljunčanim plažama za različita prisilna gibanja, ali bez morfodinamičke komponente model može samo dati procjene učinka olujnog događaja kao što je inicijalni doseg uspinjanja valova na profilu (engl. *wave runup*) tijekom olujnog događaja i nastupanje prelaska valova preko berme. Međutim, model ne može opisati progresiju tih parametara kroz olujni događaj bez adekvatnog opisa morfodinamike šljunčane plaže. Da bi se

u potpunosti opisao morfološki odgovor šljunčane plaže na olujni događaj, McCall (2015) je uključio procese laminarnog toka u zasićenom propusnom sloju plaže, infiltraciju površinske vode u nezasićeni dio plaže i eksfiltraciju vode iz zasićene plaže te eksfiltraciju vode u plaži na stražnjoj strani barijere. Sve od navedenog ima učinak na doseg uspinjanja valova i stabilnost sedimenta pri povratku vala niz plažu ili na poplavljanje kopna.

Laminarni tok nekompresibilnog fluida kroz šljunak (medij) opisan je Darcyjevim zakonom 3.1, gdje je brzina toka u fluidu određena negativnim gradijentom hidrauličkog tlaka u mediju i koeficijentom hidrauličke vodljivosti. Gradijent hidrauličkog tlaka proporcionalan je laminarnom, turbulentnom i inercijskom faktoru. Prva dva faktora mogu se svesti na zajedničku efektivnu hidrauličku vodljivost, dok se inercijski faktor može zanemariti u šljunku. Efektivna hidraulička vodljivost $K(Re)$ u Darcyjevom zakonu 3.1 određena je temeljem hidrauličke vodljivosti i odnosa Reynoldsova broja i kritičnog Reynoldsova broja.

$$\nabla H = -\frac{1}{K} \vec{U} \quad (3.1)$$

$$K(Re) = \begin{cases} K_{lam} \sqrt{\frac{Re_{crit}}{Re}} & Re > Re_{crit} \\ K_{lam} & Re_{crit} > Re \end{cases}$$

Reynoldsov broj 3.2 određen je medijanom promjera zrna (D_{50}), kinematičkom viskoznosti vode (ν) i brzinom oticanja vode kroz porozno tlo ($\frac{U}{n}$, a gdje je U brzina oticanja, a n poroznost tla). Kritični Reynoldsov broj razgraničuje laminarni od turbulentnog toka, stoga kada je omjer $\frac{Re_{crit}}{Re}$ iznad jedan nastupa turbulentni tok.

$$Re = \frac{|U|D_{50}}{n\nu} \quad (3.2)$$

Za određivanje hidrauličkog tlaka u vertikalno usrednjenom vodenom stupcu, zbog čega nije bilo moguće odrediti stvarni hidraulički tlak, korištena je aproksimacijska krivulja određena s tri uvjeta:

- nema izmjene vode između vodonosnika (voda pohranjena u propusnom sedimentu) i nepropusnog dna te su brzina na dnu i gradijent promjene hidrauličkog tlaka (uvjet nestlačivog fluida) jednaki nuli

$$w_b = 0 \quad \frac{\partial^2 H}{\partial \sigma^2} = 0 \quad (3.3)$$

- hidraulički tlak na površini plaže je kontinuiran s tlakom koji je primijenjen na površini plaže/medija

$$H(h_g w) = H_{bc} \quad (3.4)$$

- vertikalna brzina linearno se mijenja od dna vodonosnika do površine, a gdje je σ verti-

kalna koordinata udaljenosti od vodonosnika prema površini

$$w(\sigma) = \alpha\sigma \qquad \frac{\partial^2 H}{\partial \sigma^2} = \alpha \qquad (3.5)$$

Prve dvije pretpostavke su validne, međutim treća nije nužno točna u cijelom modelu, ali je pogreška te pretpostavke prihvatljiva u odnosu na složenost i zahtjevnost punog 3D modela toka u plaži. Hidraulički tlak potom se određuje iz funkcije koja je određena kao rješenje uz navedene uvjete. Rješenje je parabolična funkcija 3.6, a parametar β predstavlja koeficijent zakrivljenosti te parabole.

$$H(\sigma) = \beta\sigma^2 + H_{bc} - \beta h_{gw}^2 \qquad (3.6)$$

McCall (2015) dalje opisuje i uvjete pri kojima dolazi do izmjene vode između plaže (*groundwater*) i vode na površini plaže (*surface water*) ispod površine vode te na površini plaže u obliku eksfiltracije i infiltracije. Ispod površine vode dolazi do izmjene vode zbog razlike u tlakovima u vodi i plaži te je u tom slučaju voda u plaži u doticaju s površinskom vodom, dok u preostala dva slučaja nastupa izmjena vode kada voda u plaži i voda na površini nisu u kontaktu. Tako infiltracija nastupa kad voda dođe na dio plaže koji nije zasićen vodom, dok eksfiltracija nastupa kad voda u plaži postigne razinu veću od razine plaže. Za sve navedene slučajeve dane su jednadžbe koje opisuju intenzitet izmjene vode, a posljedično se uz pomoć njih može odrediti intenzitet promjene razine vode i razine vode u plaži.

Ovakav model izmjene vode u plaži potom je kalibriran na mjerenjima BARDEX eksperimenta (Williams i dr., 2012) gdje se postavio gradijent u razini vode unutar šljunčane plaže i potom promatrao njen transport. Ti podatci su se potom koristili za kalibraciju parametara K_{lam} i Re_{crit} u modelu, a određeni su u iznosu od 0.155 m/s i 225. Validacija je provedena također na BARDEX eksperimentu uz pomoć mjerenja tlaka u plaži na nekoliko lokacija. McCall (2015) je pokazao da ovako postavljen model može dobro opisati hidraulički tlak u plaži u usporedbi s mjerenjima sa sonde tlaka kako za slučajeve kada se promatra samo doseg uspinjanja valova, ali i u slučajevima kad dolazi do prelaska valova preko berme (*overtopping*) te akumulacije sedimenta iza berme (*overwash*). Također, u usporedbi s modelom bez procesa toka u plaži, XBG daje bolje rezultate od standardnog XBeach modela kada je u pitanju doseg uspinjanja valova. Naime, XBG model s procesima toka djelovanjem infiltracije smanjuje broj valova koji nadilaze bermu, kao i ukupni doseg uspinjanja valova. Odabir iznosa hidrauličke vodljivosti određuje intenzitet tog fenomena i u konačnici određuje i promjene na profilu plaže.

Posljednje proširenje XBeach modela u svrhu opisa šljunčanih plaža je modul za opis morfo-dinamičkog odgovora šljunka na djelovanje valova. U razvijanju modula za transport sedimenta McCall (2015) se koristio sljedećim načelima:

- morfodinamički modul treba opisati sve odgovore šljunčane plaže na olujni događaj,
- modul se mora koristiti fizičkim načelima i jednadžbama, a ne oslanjati se na empirijske

odnose,

- modul ne smije biti potrebno kalibrirati za svaki pojedini olujni događaj, ali prihvatljiva je kalibracija za svaku pojedinu lokaciju i
- za potrebe šljunčanih plaža modul mora opisivati transport sedimenta pri dnu (*bed-load transport*) i transport sedimenta u sloju (*sheet-flow transport*), ali opis suspendiranog sedimenta nije važan jer je pretpostavka da je šljunak pregrub za takvu vrstu transporta (međutim, isti bi bio potreban za opis miješanih šljunak-pijesak plaža).

Transport sedimenta pri dnu koji zadovoljava gore navedene uvjete McCall (2015) je odredio jednadžbom 3.7, a izvedenom na temelju jednadžbe koju je odredio Van Rijn (2007) na način da je zanemaren koeficijent za mulj.

$$q_b = \gamma D_{50} D_{\star}^{-0,3} \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \frac{\tau_b}{|\tau_b|} \quad (3.7)$$

U jednadžbi 3.7 q_b je volumni intenzitet transporta sedimenta pri dnu, γ je koeficijent kalibracije transporta sedimenta, $D_{\star}$ bezdimenzionalna veličina zrna, θ' i θ_{cr} su efektivni Shieldsov parametar i kritični Shieldsov parametar, a τ predstavlja posmično naprezanje dna. Jednadžbe pojedinih parametara detaljno je raspravio McCall (2015), ali potrebno je istaknuti da se τ_b razdvaja na doprinos trenja i inercije. Dok se komponenta u ovisnosti o trenju može relativno lako odrediti ukoliko se poznaje koeficijent trenja, komponenta ovisna o inerciji ovisi i o derivaciji brzine vode u vremenu, veličini zrna, gustoći i nizu drugih koeficijenata koji su svedeni na zajednički koeficijent inercije, a označava ga se s c_i . Testovi osjetljivosti pokazuju da je koeficijent inercije malog učinka, osim na plažama s jako krupnom granulacijom gdje ima značajan učinak upravo jer množi D_{50} (McCall, 2015).

Volumni intenzitet transporta sedimenta pri dnu sastavni je dio jednadžbe 3.8 za transport sedimenta.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{1 - n_p} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (3.8)$$

Posebno, transport sedimenta zbog urušavanja materijala koji je formirao prevelik nagib određen je tangensom nagiba koji, ako je veći od zadanog kuta unutarnjeg trenja, (*angle of repose*) φ dolazi do urušavanja materijala.

Za korištenje modela potrebno je odrediti tri slobodna parametra u modelu za pojedinu plažu, tj. koeficijent transporta γ , koeficijent inercije c_i i kut unutarnjeg trenja φ . Uz njih potrebno je poznavati i hidrauličku vodljivost plaže k_x . Za potrebe analize mogućnosti modela za opis promjena na šljunčanoj plaži tijekom olujnih događaja, McCall i dr. (2015) je u svojem radu odabrao vrijednosti c_i od 1, φ od 35 ° i γ od 0,5; dok je posebno za slučaj BARDEX eksperimenta korišten viši koeficijent transporta γ u iznosu od 1. Hidrauličke vodljivosti plaža preuzete su iz ranijih istraživanja i literature.

Uz tako odabrane parametre autori McCall i dr. (2015) analizirali su mogućnost modela za predviđanje različitih morfoloških odgovora plaže u slučaju kada izostaje kalibracija za pojedinu plažu. Promatrani su slučajevi formiranja berme (engl. *berm formation*), erozije plaže (engl. *beach erosion*), uzdizanje krune (engl. *crest build-up*), snižavanje krune (engl. *crest lowering*) i pomicanje barijere (engl. *barrier rollover*) za pet različitih plaža. Formiranje berme je vjerojatno najčešći tip odaziva plaže na olujni događaj u Hrvatskoj, upravo zbog malih valnih visina i perioda koji se razvijaju pri olujnim događajima u obalnom moru. U slučaju bez kalibracije, model je pokazao da podcjenjuje količine materijala pri novoformiranoj bermo, a precjenjuje akumulaciju sedimenta na podmorskom dijelu profila. Očekuje se da bi model trebao ponuditi bolje rezultate uz kalibraciju za potrebe specifične lokacije, ali i uz bolji opis dinamike lomljenja vala uz nožicu plaže. Druge, energičnije, događaje model može bolje predvidjeti i prikazati te je za njih na primjeru analiza autora McCall i dr. (2015) određena puno bolja uspješnost modela.

McCall (2015) dodatno je napravio i testove osjetljivosti za koeficijent inercije c_i te je u njima zaključio da je učinak promjene koeficijenta inercije za plaže granulacije do približno 10 mm malen upravo zbog linearne povezanosti ta dva parametra. U slučaju niskog koeficijenta inercije za plaže s većom granulacijom dolazi do značajnog snižavanja krune plaže i povlačenja materijala nego što je izmjereno, odnosno dolazi do više erozije. Korištenje koeficijenta inercije smanjuje brzinu vode na plaži, što znači da nastupa i niži doseg uspinjanja valova, a posljedično se smanjuje i vjerojatnost za prelazak valova i depoziciju sedimenta iznad postojeće berme (*overtopping* i *overwash*). Zaključuje da je korištenje koeficijenta inercije bilo nužno za plaže s grubom granulacijom, dok za plaže manje granulacije vrijednost u iznosu od 1 odgovara širokom rasponu granulacija, a posebna kalibracija bila bi nužna za plaže sa sedimentom veće granulacije. U skladu s tim zaključcima, pri kalibraciji modela u ovom radu korišten je iznos koeficijenta inercije c_i od 1 jer je veličina zrna u valnom kanalu i na plaži Ploče iznosila približno 2 cm u medijanu. Također je vizualnom analizom topografskih mjerenja određen kut unutarnjeg trenja u iznosu od približnih 35 °, a što je i pri sredini vrijednosti za šljunak u rasponu od 25 ° do 35 ° (Beakawi Al-Hashemi i dr., 2018).

3.2.2. Brierova ocjena prognoze modela

Kako bi se kvantificirala mogućnost modela da prognozira stvarno izmjerene promjene na profilu plaže, korištena je Brierova ocjena modela (engl. *Brier skill score*, skraćeno BSS). Brierova ocjena učestalo je u upotrebi u numeričkom modeliranju obale (Van Rijn i dr., 2003; McCall i dr., 2015; Brown i dr., 2019). Brierova ocjena računa se koristeći apsolutnu razliku promjene na profilu iz modela i promjene na profilu iz mjerenja u svakoj točki, a od koje je potom oduzeta greška instrumenta. Ukoliko je taj iznos manji od nule, odnosno ako je apsolutna razlika u promjenama na profilu između modela i mjerenja manja od greške instrumenta kojim je napravljeno mjerenje, onda se uzima 0. Tako dobivena vrijednost zove se greška predviđanja apsolutne promjene i označava se s $|\epsilon_{\Delta\xi}|$, a računa po formuli 3.9 za svaku točku profila. U ovom radu

uzeta je greška instrumenta u iznosu od 0,1 metar, a temeljem preciznosti mjernog uređaja s kojim je obavljena topografska izmjera na plaži Ploče.

$$|\epsilon_{\Delta\xi}| = \max(|\Delta\xi_{modelled} - \Delta\xi_{measured}| - \epsilon_0, 0) \quad (3.9)$$

Važno je istaknuti da se ovdje koristi promjena na profilu $|\Delta\xi|$ nastala u modelu (*modelled*) kao i na plaži (*measured*), a određena je kao razlika krajnjeg profila (nakon olujnog događaja) i početnog (prethodi olujnom događaju). Početni profil je za model i plažu jednak i izmjeren, dok je krajnji profil izmjeren na plaži i uspoređuje se s profilom dobivenim iz modela. Svrha je kalibracije pronaći parametre modela pri kojima profil plaže ostvaren modeliranjem olujnog događaja odgovara izmjerenom profilu plaže do na grešku mjerenja, tada $|\epsilon_{\Delta\xi}|$ iznosi 0 u svakoj točki.

Nakon određivanja greške predviđanja modela, može se odrediti i Brierova ocjena po formuli 3.10 u kojoj se suma odnosi na sve točke profila.

$$BSS = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\epsilon_{\Delta\xi}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\xi_{i,measured})^2} \quad (3.10)$$

Iz tako postavljene jednadžbe 3.10 proizlazi da se za BSS-a može dobiti broj manji ili jednak 1. BSS iznosi 1 za ranije opisani slučaj kad $|\epsilon_{\Delta\xi}|$ iznosi 0 u svakoj točki i tada je postignuto dobro slaganje između rezultata modela i mjerenja, do na grešku mjerenja. Za slučaj kad BSS iznosi 0 odgovoran je rezultat modela u kojem nema promjena između početnog i krajnjeg profila, odnosno kad je $\Delta\xi_{modelled}$ jednak 0 u $|\epsilon_{\Delta\xi}|$, te razlomak u formuli 3.10 iznosi 1. Posljedično porast BSS-a između 0 i prema 1 odgovara poboljšanju modela da se približi mjerenjima te za različite iznose BSS u tom rasponu se koriste kvalifikacije opisane u tablici 3.1. Za slučaj BSS-a manjeg od 0 rezultat modela je profil koji se udaljava od početnog, ali ne približava krajnjem izmjerenom profilu.

Tablica 3.1. Kvalifikacija raspona Brierove ocjene modela (Van Rijn i dr., 2003)

Brierova ocjena	Kvalifikacija
0,8-1	Odlično
0,6-0,8	Vrlo dobro
0,3-0,6	Dobro
0-0,3	Slabo
< 0	Loše

3.2.3. Opis eksperimentalnog postava u Hannoveru i postupka kalibracije

Podatci za ovaj primjer preuzeti su iz rada autora López de San Román-Blanco i dr. (2006). Korišten je slučaj plaže I, isključivo šljunčane plaže granulacije od 16 do 32 milimetra, s medijanom od 21 milimetra, a materijal je riječnog podrijetla. Šljunak je bio položen na nepropusnu

asfaltnu bazu nagiba 1:6 u kanalu duljine 309 metara, a koja se prostirala od 7 metara dubine do 5 metara visine. Time je postignuto mjerilo 1:1 (odnos geometrijske, kinematske i dinamičke sličnosti). Visina plaže je 6,5 metara, a duljine 80 metara u kanalu. Šljunak je položen u sloju debljine od minimalno 2 metra duž cijelog profila plaže, a formiran je inicijalni profil plaže s nagibom od 1:8. Razina vode u kanalu zadržana je na 4,7 metra, što predstavlja i ograničenje za značajnu visinu valova u kanalu. Najviši mogući H_s u kanalu tako je ograničen s 2,35 m jer za svaki H_s nastupa interakcija s dnom na razini $2H_s$. Tako je za razinu vode od 4,7 m u kanalu najviša moguća značajna visina valova za koju na izvoru ne dolazi do interakcije s dnom određen na manje od 2,35 m ($\frac{4,7}{2} = 2,35$).

Za potrebu kalibracije modela preuzeti su podatci za tri uzastopna eksperimenta koja su u radu autora López de San Román-Blanco i dr. (2006) označena s Test 1 - 3. Provedeni testovi su uzastopni, a što znači da nakon svakog valnog događaja, odnosno testa, krajnji profil plaže je zadržan kao početni profil za sljedeći test - profil plaže nije poravnat nakon svakog testa. Valni parametri korišteni tijekom sva tri testa navedeni su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Parametri valova za testove 1 - 3 u valnom kanalu u Hannoveru: značajna visina valova H_s , vršni period T_p , trajanje testa i strmost (omjer valne visine s valnom duljinom) valova.

	Test 1	Test 2	Test 3
H_s (m)	0,6	1	1,2
T_p (s)	3,22	4,14	4,48
Trajanje (s)	8400	7200	7800
Strmost		0,05	

3.2.4. Opis plaže Ploče i provedena mjerenja

Plaža Ploče nalazi se 5 kilometara zapadno od centra Rijeke, u sklopu bazenskog kompleksa Kantrida. Ploče je umjetna plaža, projektirana i izgrađena u sklopu uređenja bazenskog kompleksa koji je završen 2008. godine, dok je uređenje plaže i obalnog pojasa bila posljednja, peta faza uređenja koja je nastupila naknadno. Plaža je završena početkom 2011. godine, troškovi uređenja iznosili su 18 milijuna kuna, od kojih je oko 2,4 milijuna kuna iznosio trošak nasipavanja plaže. U sklopu uređenja izgrađena su tri pera za zaštitu od razornog djelovanja valova, a time su i formirane dvije ćelije plaže.

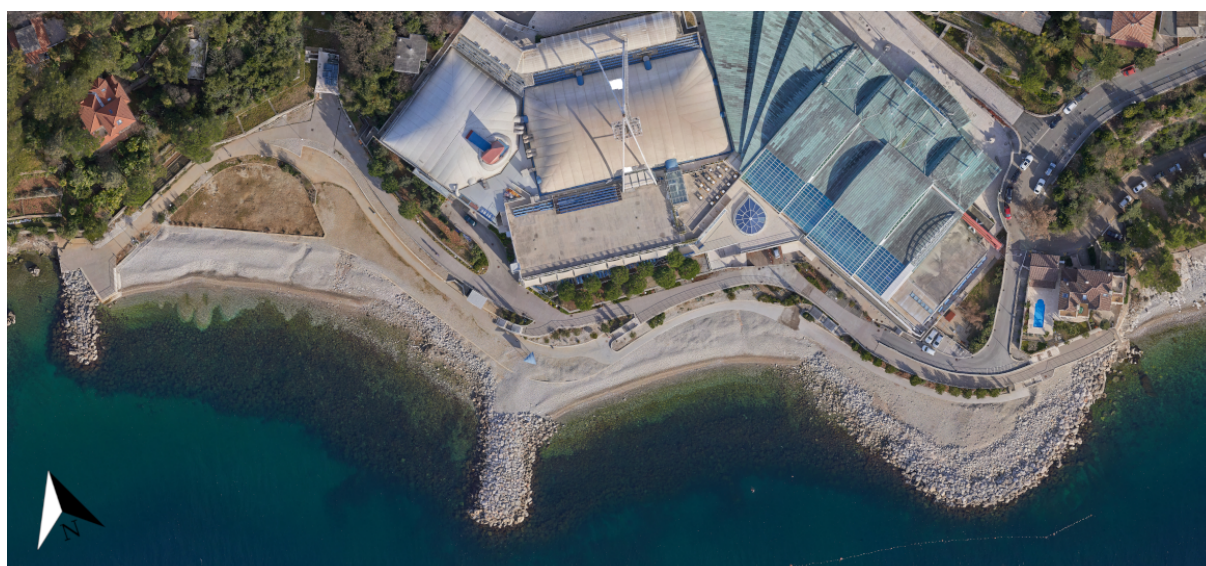
Ranije postojeća obala koja je u svom prirodnom obliku bila stjenovita i prikazana je na slici 3.1 uređenjem je u potpunosti preobražena u dvije šljunčane plaže uz šetnicu, pera i popratni sadržaj. Gotovo odmah nakon uređenja plaže uočen je i problem pojave procjednih voda koje se u obliku obalnih izvora pojavljuju i preplavljaju plažu tijekom kišnog razdoblja. Time je omogućen doprinos sedimenta na plažu transportom uzrokovanim otjecanjem procjednih voda, ali i gubitak sedimenta s plaže u more tijekom istog tog odljeva.

Nove plaže, prikazane na slici 3.2, obuhvatile su zajedno 360 metra obalne linije te površinu od oko 7920 m². Dvije ćelije plaže Ploče dijele se na istočnu i zapadnu, a formirane su s tri



Slika 3.1. Fotografija bazena Kantrida na otvorenom prije uređenja u zatvoreni bazenski kompleks zajedno s izgradnjom plaže. (Adamić, 2024)

hidrotehnička pera koja ih razdvajaju i onemogućuju transport sedimenta duž s jedne ćelije na drugu. Sastavni dio plaža je i hidrodinamički prag koji je izgrađen na 2 metra dubine, a koji ima funkciju spriječiti nepovratni gubitak sedimenta u dublje dijelove mora. Obje ćelije su ispunjene općim kamenim nasipom na koji je položen površinski sloj riječnog šljunka.

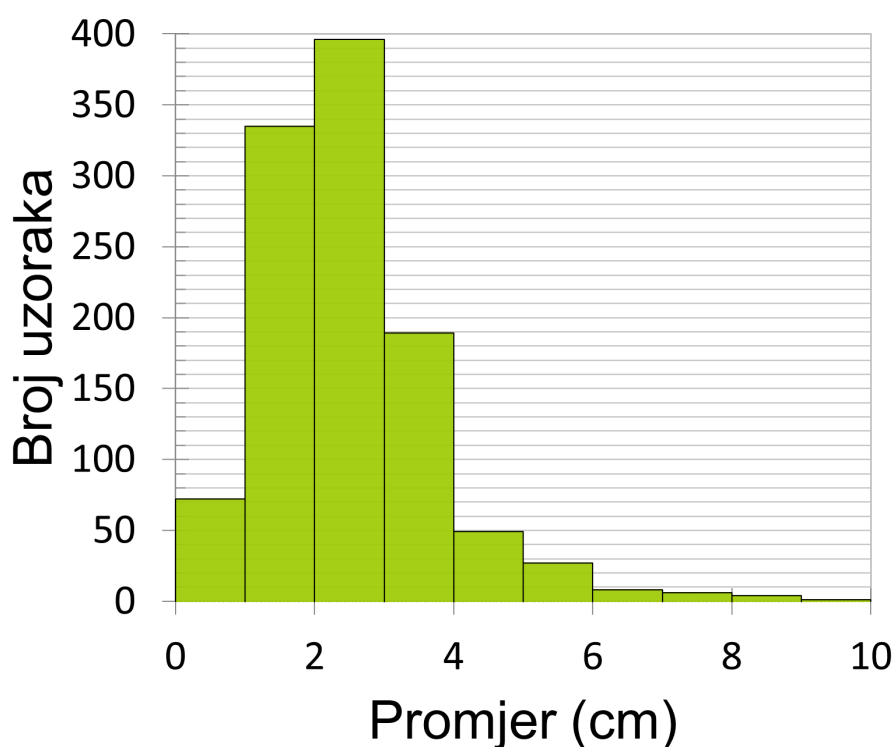


Slika 3.2. Pregled uređene plaže Ploče i bazenskog kompleksa iz zraka, 2020. godina

Granulacija šljunka upotrijebljenog na samoj plaži u rasponu je od 16 do 32 milimetra. Na plaži Ploče provedena je granulometrijska analiza u veljači 2022., a na uzorku od 1087 zrna

prikupljenih na osam različitih profila plaže okomitih na obje ćelije. Raspon promjera zrna na različitim profilima varirao je od 2,03 cm do 3,22 cm, a ukupni prosjek dobiven kao prosjek prosječnih promjera zrna po profilu iznosio je 2,52 cm. Medijan svih analiziranih zrna određen je na 2,33 cm.

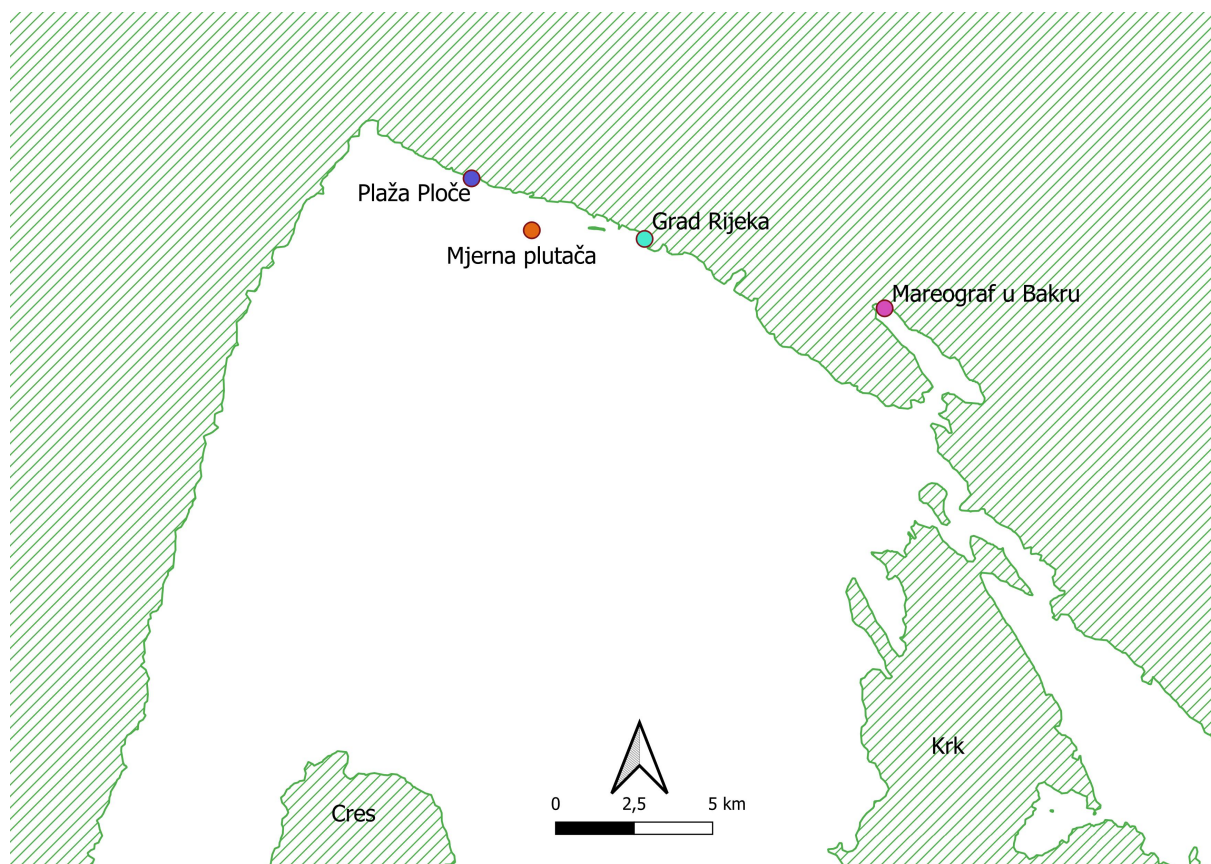
Histogram broja zrna u ovisnosti o promjeru prikazan je na slici 3.3, većina zrna (396 zrna od 1087) nalazi se u rasponu od 2 do 3 centimetra.



Slika 3.3. Histogram broja zrna uzorkovanih na plaži Ploče duž 8 različitih profila u odnosu na promjer zrna u centimetrima

Istočna ćelija plaže orijentirana je u smjeru juga, dok je zapadna ćelija orijentirana prema jugozapadu. Orijentacija je određena kao kut između pravca okomitog na duljinu koja povezuje rubne dijelove plaže i sjevera. Takvom orijentacijom plaža je izložena valovima koji nastaju na gotovo cijelom području Riječkoga zaljeva, prikazano na slici 3.4. Privjetrište je stoga ograničeno otocima Krkom i Cresom te za valove lebića iznosi 28,4 kilometra dok za valove juga iznosi 15,9 kilometara. Privjetrište je ovdje korišteno kao duljina duž koje vjetar može neometano puhati morskou površinom te time stvarati morske valove. Pod privjetrištem određeno je efektivno privjetrište metodom opisanom u *Shore protection manual* (Coastal Engineering Research Center (US), 1984) u poglavlju 3 glavi V i paketom *waver* (Marchand i dr., 2023).

Jugo, odnosno široko, iz smjera jugoistoka (135 °) najučestaliji je vjetar kojem se pripisuje najveći utjecaj na preraspodjelu sedimenta na plaži Ploče jer na relativnom velikom privjetrištu učestalo postiže velike brzine i struji kroz dugi vremenski period. Time se postižu i visoki valovi koji dolaze iz navedenog smjera. Iz smjera jugozapada puše lebić nad privjetrištem od 28,4



Slika 3.4. Položaj plaže Ploče, mjerne plutače i grada Rijeke u Riječkom zaljevu te mareografa u Bakru u Bakarskom zaljevu.

kilometra, što je značajno veće nego za jugo. Međutim, rijetko se ostvaruju uvjeti za visoke vrijednosti brzine tog vjetrova, a time i valova. Zbog toga se smatra da lebić manje doprinosi morfološkim promjenama na plaži.

Uvažavajući spomenute vjetrove koji dominiraju prostorom ispred plaže Ploče, za simulacije je odabran profil 1, prikazan na slici 3.5. Valovi iz smjera juga nailaze gotovo okomito na profil 1, kao i valovi iz smjera jugo-jugozapada zahvaljujući refrakciji valova zbog promjene (smanjenja) dubine dna. Takvim smjerom nailaska valne fronte minimizira se dužobalni transport na zapadnoj ćeliji (Lončar i dr., 2020). Profil 1 na zapadnoj ćeliji plaže odabran je i na temelju okomitog nailaska valova juga i zaključaka i rezultata u radu Tadić i dr. (2022). Naime, nakon dohrane plaže (na proljeće) na plaži Ploče se za prvih nekoliko olujnih događaja šljunčani materijal preraspodjeljuje dužobalnim transportom s istočnog (profil 5) na zapadni (profil 1) dio (zapadne ćelije) plaže. Time se na istočnom dijelu plaže otkriva opći kameni nasip građen od stijena pojedinačne mase 250 - 350 kg koje čine dno plaže (Tadić i dr., 2022). Nakon toga dolazi do smanjenja dužobalnog transporta na plaži i tada se većina promjena na zapadnom (profil 1) i centralnom (profil 3) dijelu zapadne ćelije događa kao posljedica pretežito poprečnog transporta sedimenta. Iako valni događaji u stvarnosti na plaži Ploče uzrokuju kombinaciju dužobalnog i poprečnog transporta sedimenta, za potrebe simulacije jednodimenzionalnim XBG modelom korišteno je prethodno pojednostavljenje o vremenskom slijedu i neovisnosti procesa

transporta sedimenta: valni događaji prvo uzrokuju dužobalni, a potom poprečni transport sedimenta. Stoga je i odabran profil 1 za simulaciju jer nakon nekoliko inicijalnih valnih događaja s dužobalnim transportom slijede valni događaji s pretežito poprečnim transportom. K tome pri izrazito snažnim valnim događajima u poprečnom setu valnih događaja sediment završava i na šetnici iza plaže.

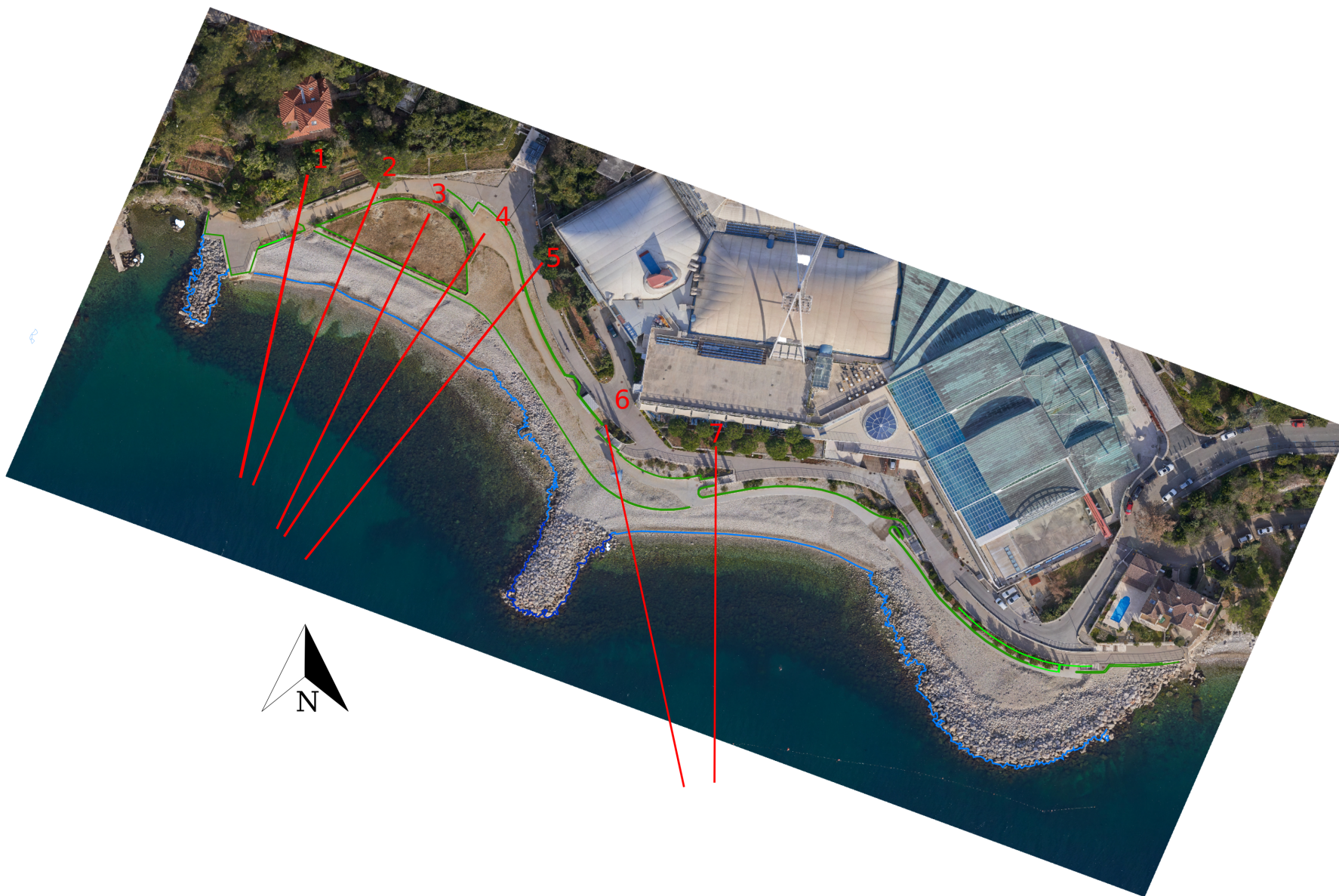
Promjene na profilima 1, 3 i 5 prikazane su na slikama 3.6 tijekom cijele mjerene olujne sezone na zapadnoj čeliji plaže Ploče. Promjene profila na plaži Ploče zabilježene su s 19 provedenih topografskih mjerenja u razdoblju od 17. siječnja 2020. godine do 26. veljače 2021. godine. Datumi topografskih mjerenja navedeni su u tablici 3.3, a metodologija i rezultati tih mjerenja detaljno su opisani u radu autora Tadić i dr. (2022). Dio mjerenja plaža obavili su djelatnici Geodetskog zavoda Rijeka, a dio djelatnici Građevinskog fakulteta u Rijeci. U oba slučaja korištena je bespilotna letjelica za prikupljanje fotografija i izradu digitalnih modela georeferenciranih oblaka točaka koje određuju položaj plaže s preciznošću od ± 5 centimetara. Po završetku olujne zimske sezone jedinica lokalne samouprave u Rijeci nadohranjuje plažu Ploče kako bi se nadoknadilo percipirane gubitke tijela plaže i to pretežito na istočnoj čeliji plaže, ali i kako bi na zapadnoj čeliji šljunak bio uklonjen sa šetnice i preraspodijeljen sa zapadnog dijela na prethodno ogoljeni istočni dio zapadne čelije te ostvarilo "ugodni" nagib cijele čelije (Tadić i dr., 2022).

XBeach-Gravel model stoga može simulirati ovaj kasniji poprečni transport sedimenta, za razliku od dužobalnog transporta odmah nakon dohrane, a kako je opisano u radu Tadić i dr. (2022). Zaključno, profil 1 koristi se u daljnjim simulacijama jer na njega valovi nailaze gotovo okomito i tijekom olujnih događaja nakon inicijalne dohrane većina transporta sedimenta je poprečna - što odgovara ograničenjima XBeach-Gravel modela.

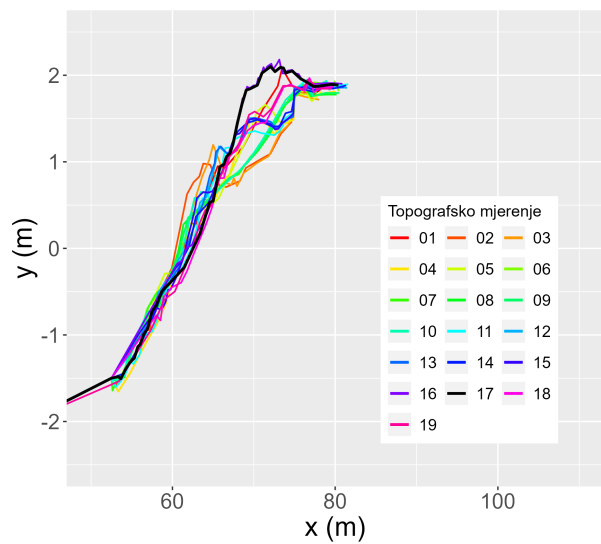
Na slici 3.7 prikazan je i nacrt presjeka 3 iz projektne dokumentacije plaže, a koji položajem približno odgovara profilu 1 prikazanom na slici 3.5. Presjek 3, odnosno profil 1, građen je na pjeskovitom i muljevitom dnu na koje je postavljen osnovni kameni nasip od kamenih blokova mase od 250 pa sve do 3500 kilograma. Tim kamenim blokovima formiran je i prag na dubini od 2 metra i koji sprječava gibanje šljunčanog sedimenta u dublje dijelove. Nakon praga položen je i završni sloj nasipa šljunčanog materijala pod nagibom 1:10. Upravo taj dio nasutog šljunka čini tijelo plaže Ploče i njegove promjene mjerene su topografskim mjerenjima. Materijal ispod sloja šljunka dubine 0,6 metara je nepomičan i kao takav modelira se kao neerodibilni sloj u svim simulacijama, kao i ostatak materijala pijeska i mulja.

Tablica 3.3. Tablica topografskih mjerenja i datum kada su mjerenja izvršena. Za referenciranje pojedinih topografskih mjerenja u tekstu ili valnim događajima koristi se slovo "G" s rednim brojem mjerenja.

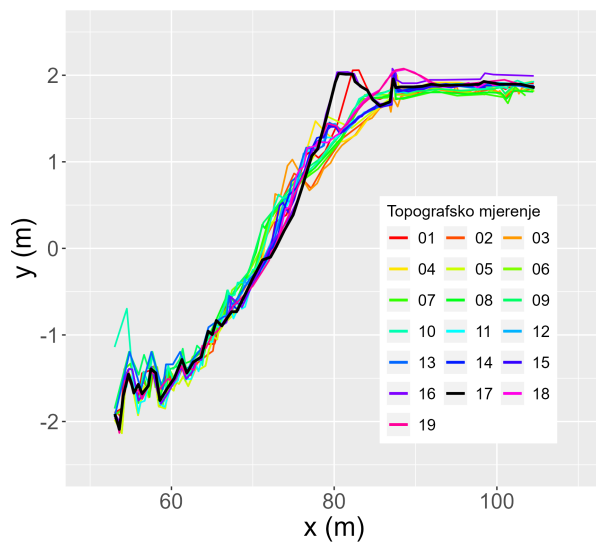
Broj mjerenja	Datum
1	17. 1. 2020.
2	7. 2. 2020.
3	12. 2. 2020.
4	2. 3. 2020.
5	3. 3. 2020.
6	10. 3. 2020.
7	20. 3. 2020.
8	29. 3. 2020.
9	28. 4. 2020.
10	5. 5. 2020.
11	1. 10. 2020.
12	6. 10. 2020.
13	13. 10. 2020.
14	2. 11. 2020.
15	21. 11. 2020.
16	10. 12. 2020.
17	14. 12. 2020.
18	14. 1. 2021.
19	26. 2. 2021.



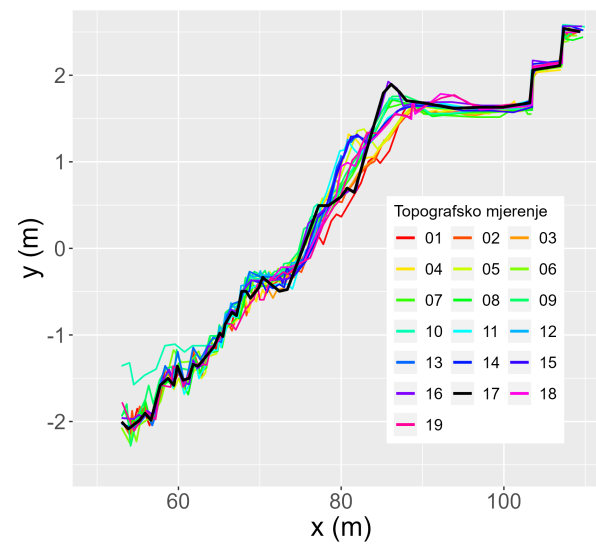
Slika 3.5. Pregled položaja različitih profila (1 - 7) na kojima su obavljena topografska mjerenja na plaži Ploče iz zraka.



(a) Profil 1



(b) Profil 3



(c) Profil 5

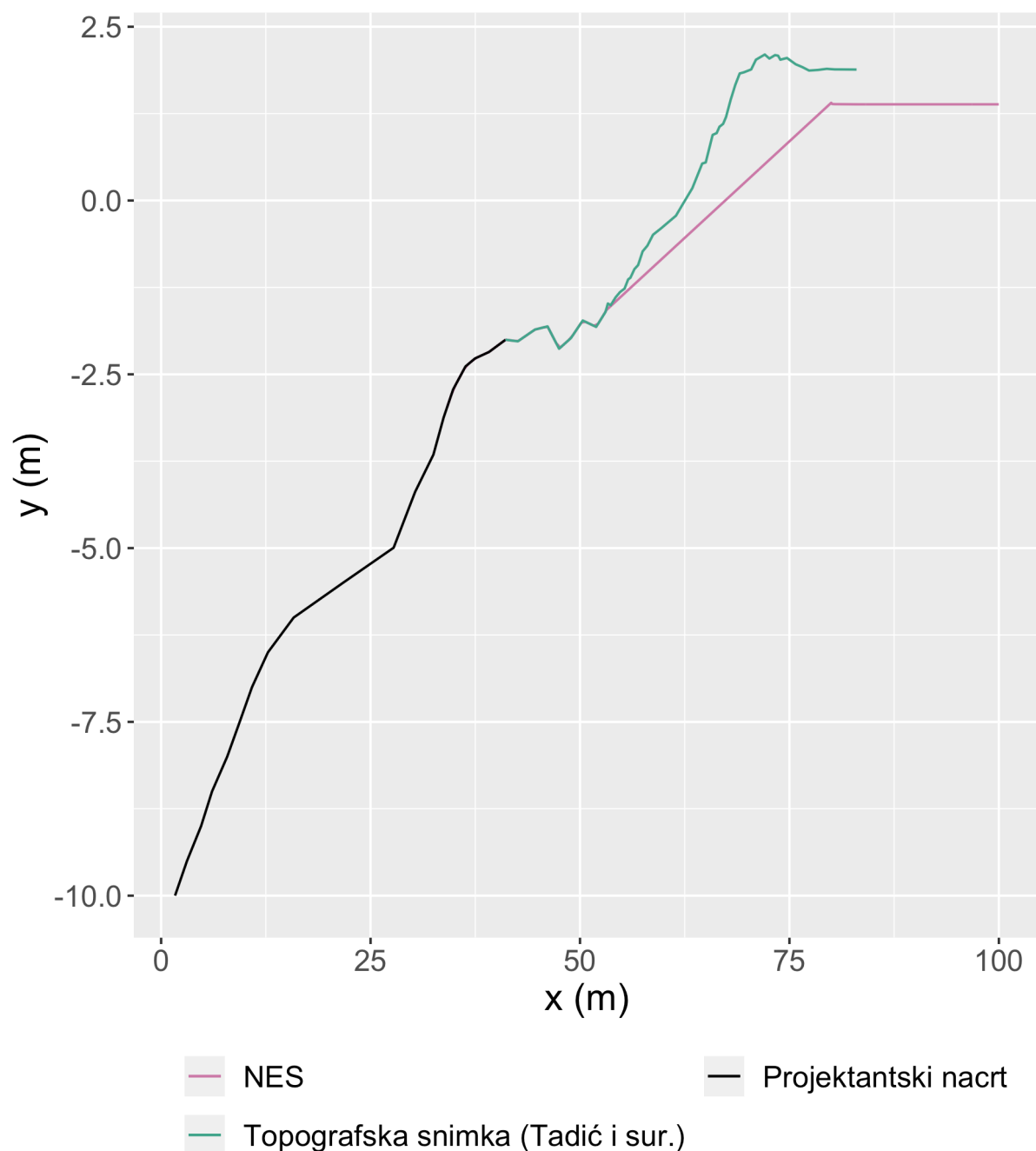
Slika 3.6. Promjene na profilima 1, 3 i 5 na plaži Ploče.

Profil u simulaciji olujnog događaja mora biti minimalne dubine od $2H_s$ a kako bi se izbjeglo da val visine H_s ima interakciju s dnom profila odmah na rubu modela (*XBeach-G GUI User Manual* 2024). To znači da je za valne uvjete gdje je H_s iznosio 3 metra, potrebna dubina profila od minimalno 6 metara. Bepilotna letjelica korištena za topografska mjerenja u idealnim uvjetima (sunčano vrijeme, mirno more, visoka prozirnost mora) nije u mogućnosti s visokom preciznošću odrediti položaj i oblik plaže dublje od 5 metara dubine. Međutim, isto nije ni bilo potrebno jer stijene na dubinama većim od 2 metra nisu podložne eroziji, a hidrotehnički prag pozicioniran na 2 metra dubine ne dozvoljava pomicanje sedimenta plaže u dublje dijelove. Stoga je nepomični dio profila dubine od 10 do 2 metra preuzet iz projektantskog nacrtu plaže Ploče, a na njega je pripojen topografski snimak pomičnog šljunčanog tijela plaže iznad 2 metra dubine izmjeren bespilotnom letjelicom Tadić i dr. (2022). Time je dobiven profil plaže do dubine 10 metara korišten za simulacije, a koji se po potrebi skratio na dubinu od $2H_s$ kako bi se smanjilo proračunsko vrijeme. Na slici 3.8 prikazan je jedan vertikalni profil plaže Ploče s opisom izvora podataka. Ispod šljunka je ponovno neerodibilni sloj (NES) također preuzet iz projektantskog nacrtu i koji počinje na približno 1,5 m dubine.

Za adekvatan opis uvjeta prisutnih na plaži Ploče, nužno je bilo prikupiti podatke o doseg u spinjanja valova na obalu (dalje skraćeno DUV), valnim uvjetima na moru ispred plaže i o oscilacijama morske razine.

DUV je izmjeren upotrebom sustava za videonadzor plaže (detaljnije opisan u radu autora Bujak i dr. (2023)), koji je bio postavljen u listopadu 2020. na zapadnu čeliju plaže Ploče. Kamera je pratila DUV na profilu 1, najzapadnijem profilu plaže na zapadnoj čeliji, a čiji je odabir i položaj dodatno obrazložen ranije. Zbog ograničenja postavljenog videosustava određivanje DUV-a bilo je moguće isključivo za kratko vrijeme dnevnog svjetla u zimskom periodu. Prilikom nastupa valnog događaja u tom vremenu, kamera je uzorkovala četiri slike plaže i valova visoke rezolucije po sekundi u 12 minutnim intervalima. Uz pomoć programskih paketa i ranijeg postupka kalibracije i georeferenciranja kamere i plaže, priskrbljene fotografije omogućile su automatsko određivanje DUV-a na profilu tijekom valnog događaja i u odnosu na trenutnu SRM (Bujak i dr., 2023). Tako određeni DUV potom je za 12-minutno razdoblje sveden na jednu vrijednost, DUV2% ili DUV koji se nadvlada u samo 2 % slučajeva tijekom 12 promatranih minuta, tj. rezultat komplementarne kumulativne funkcije gustoće za vjerojatnost od 2% i izmjereni DUV (Stockdon i dr., 2006).

DUV2% dobiven mjerenjem je potom uspoređivan s rezultatom numeričkog modela XBeach-Gravel, a koji kao jedan od izlaznih parametara nudi i DUV s uzorkovanjem zadanim u modelu (postavljeno na 5 Hz). DUV dobiven kao izlazni podatak iz XBeach-Gravel modela određen je u odnosu na geodetsku nulu te je kao takav uvećan za oscilaciju morske razine koja je zadana u modelu. Da bi se od DUV-a kao izlaznog podatka iz XBeach-Gravel modela odredio DUV2%, od DUV niza oduzeta je pripadajuća vrijednost oscilacije morske razine zadane u modelu, da bi se dobio DUV u odnosu na srednju razinu mora tijekom olujnog događaja. Time DUV nizovi iz modela i s kamere postaju usporedivi, a potom se nad oba provodi izračun DUV2%.



Slika 3.8. Prikaz vertikalnog profila plaže Ploče koji je korišten pri simulacijama olujnih događaja.

Valni parametri utvrđeni su mjerenjem na hidrografskoj plutači koja se nalazila na 2,5 kilometara jugoistočno od plaže. Mjerenja valnih uvjeta na plaži Ploče izvršena su za razdoblje od prosinca 2019. do sredine siječnja 2021. godine. Kako je video sustav za praćenje DUV-a postavljen tek u listopadu 2020. zbog pandemije korona virusa, u daljnjoj analizi koriste se samo podatci prikupljeni tijekom topografskih mjerenja od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. godine. Mjerenja valova provodio je Hrvatski hidrografski institut valografskom plutačom *Datowell Waverider MkIII*. Plutača je bila postavljena na koordinatama 45,326 ° N i 14,396 ° E. Na

toj lokaciji prikupljeni su srednji polusatni i 3-minutni valni parametri: značajna visina valova H_s , vršni period T_p , smjer valova D i raspršenje valova. Na slici 3.9 prikazane su značajne visine valova izmjerene na plutači zajedno s DUV-om za razdoblje od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. U tom promatranom razdoblju nastupio je najjači valni događaj označen s G17_G18_K3 28.12.2021. u trajanju od 8 do 23 sata, te je tada zabilježena značajna visina vala H_s od 2,32 metra.

Za definiciju nastupanja valnog događaja za razdoblje mjerenja valova (1. listopada 2019. do 14. siječnja 2021.) uzeti su kriteriji da valni događaj počinje i završava kad H_s pređe 80. percentil (u iznosu od 0,27 metara), a dodatni uvjet je da u tom vremenu značajna visina valova mora premašiti 90. percentil H_s (u iznosu od 0,45 metara). Time je postignuto da se nekoliko uzastopnih značajnih visina valova koje premašuju 90. percentil ne kategoriziraju kao zasebni valni događaji, već da se temeljem prvog kriterija grupiraju u jedan dugotrajniji valni događaj. Takvi kriteriji odabrani su kako bi kratak period mjerenja (samo godinu dana) bio iskorišten za dobivanje što većeg broja valnih događaja, a dodatno kako bi iz valnog zapisa bili izostavljeni periodi relativnog mirovanja morske površine (H_s manji od 80. percentila) prilikom kojih mjerenje vršnog perioda nije pouzdano.

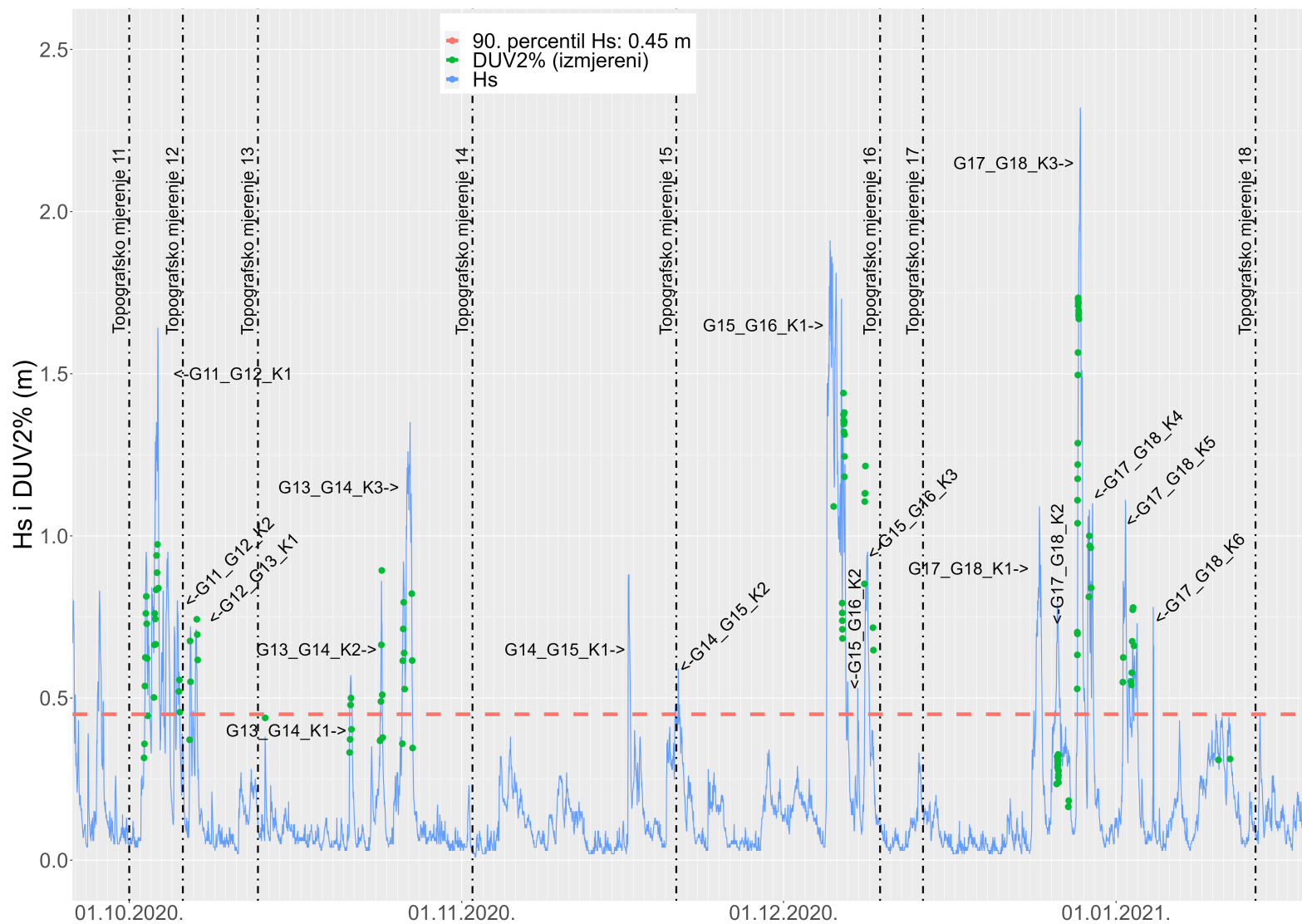
U tablici 3.4 opisana su osnovna svojstva valnih događaja koji su nastupili po prethodno opisanom kriteriju, između 1. listopada 2020. i 14. siječnja 2021. godine. U tablici su navedena topografska mjerenja koja su prethodila i slijedila valne događaje. Označena su slovom "G" i rednim brojem mjerenja, a nakon toga slijedi i datum kad su mjerenja održana. Dalje je navedena ukupna promjena sedimenta, početak i kraj valnog događaja, najviša zabilježena značajna visina valova H_s , prosječan smjer valova tijekom valnog događaja i informacija je li tada mjeren DUV. Ukupna promjena sedimenta dobivena je kao suma razlika razine profila početnog i krajnjeg topografskog mjerenja u svakoj točki. Time je određen iznos u metrima koji govori koliko ukupno materijala u svim točkama profila je dobiveno ili izgubljeno zahvaljujući longitudinalnom transportu sedimenta. Što je taj broj bliži nuli, to je transport sedimenta u longitudinalnom smjeru bio manji, a dominirao je samo poprečni transport koji model XBeach-Gravel može modelirati.

Značajne visine valova (H_s) i vršni periodi (T_p) izmjereni su na plutači kao 30-minutni podatci, a dodatno su usrednjeni kliznim srednjakom od 1,5 sat kako bi se dobio zapis s manje oscilacija kao ulazni podatak u model.

Na slici 3.10 prikazani su smjerovi valova koji su izmjereni na valografskoj plutači. Dominantni i najčešći smjer valova po gustoći zapisa mogu se odrediti kao južni i jugozapadni. Takav rezultat je i u skladu s usrednjenim smjerom valova tijekom trajanja valnih događaja koji se nalaze u tablici 3.4.

Podatci o satnim oscilacijama morske površine preuzeti su s mareografske postaje u Bakru i prikazani su na slici 3.11. Zapis s mareografa zadan je u odnosu na mareografsku nulu, a koja se nalazi 0,738 m ispod geodetske nule. Stoga je od zapisa s mareografa u Bakru oduzet iznos od 0,738 m. Najviša razina mora u razdoblju mjerenja iznosila je 0,9 metara i nastupila je 8. prosinca 2019. tijekom valnog događaja G15_G16_K3, a najmanja u iznosu od -0,34 m 14.

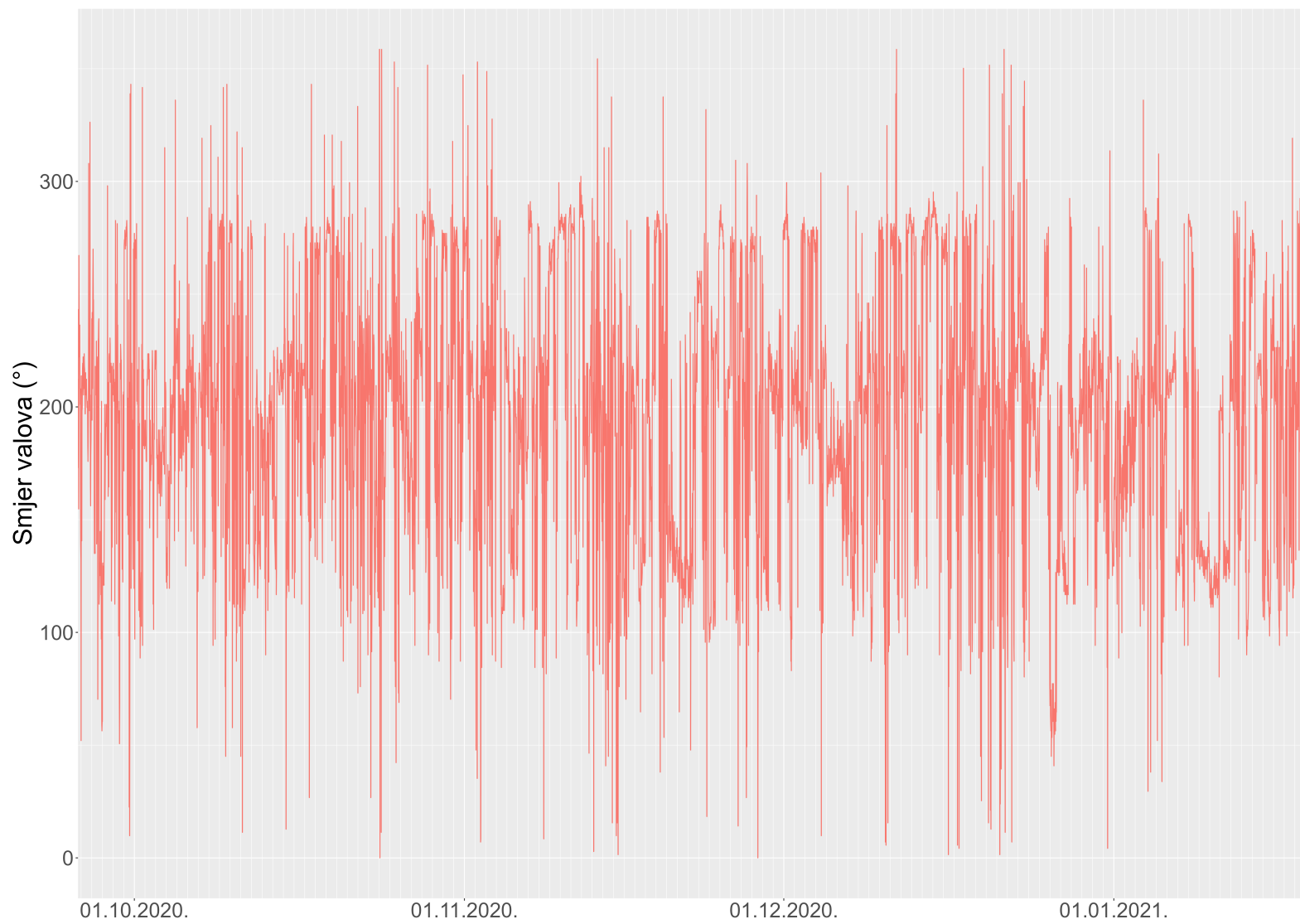
studenoga 2020. Ukupni raspon oscilacija morske površine iznosio je 1,23 m u promatranom razdoblju.



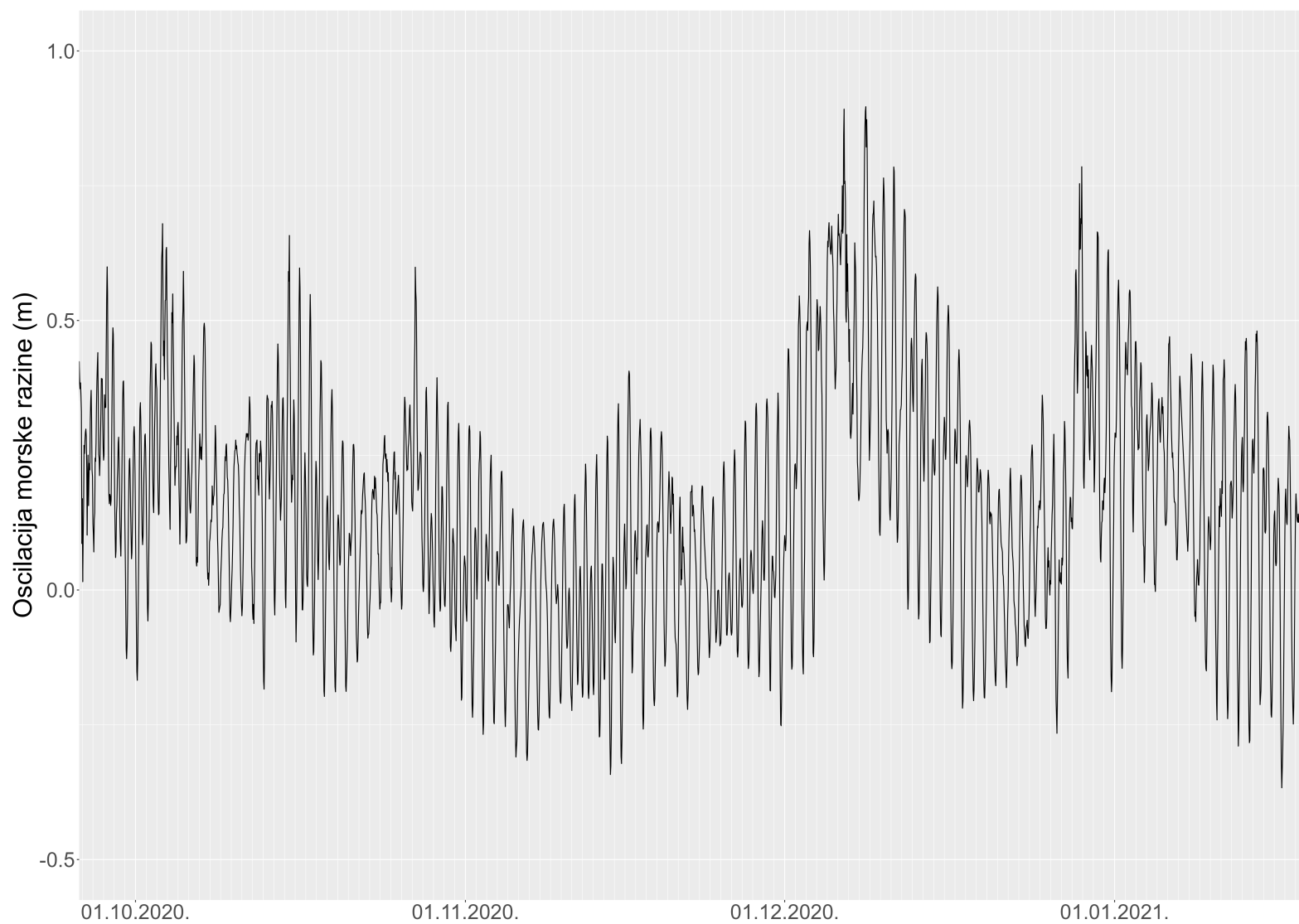
Slika 3.9. Pregled značajne visine valova H_s izmjerene na plutači (zelena linija) i DUV 2 % označen plavim točkama za razdoblje od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. godine.

Tablica 3.4. Parametri valnih događaja u razdoblju od 1. 10. 2020. do 14. 1. 2021. godine.

Topografska mjerenja		Broj valnog događaja	Ukupna promjena sedimenta (m)	Početak događaja	Kraj događaja	Najviši H_s (m)	Prosječni smjer valova (°)	Mjerenje uspona vala
G11 1.10.2020.	G12 6.10.2020.	K1	2.64	2.10.2020. 08:00:00	4.10.2020. 20:00:00	1.64	187	Da
		K2		5.10.2020. 04:00:00	5.10.2020. 20:00:00	0.8	195	Da
G12 6.10.2020.	G13 13.10.2020.	K1	-0.02	6.10.2020. 15:00:00	7.10.2020. 09:30:00	0.72	191	Da
G13 13.10.2020.	G14 2.11.2020.	K1	-0.57	21.10.2020. 12:30:00	21.10.2020. 20:30:00	0.57	184	Da
		K2		24.10.2020. 08:00:00	24.10.2020. 16:00:00	0.86	199	Da
		K3		26.10.2020. 10:00:00	27.10.2020. 11:00:00	1.35	182	Da
G14 2.11.2020.	G15 21.11.2020.	K1	0.08	16.11.2020. 12:00:00	16.11.2020. 18:30:00	0.88	186	/
		K2		20.11.2020. 20:00:00	21.11.2020. 16:30:00	0.59	136	/
G15 21.11.2020.	G16 10.12.2020.	K1	11.11	5.12.2020. 00:00:00	7.12.2020. 04:00:00	1.91	177	Da
		K2		7.12.2020. 21:30:00	8.12.2020. 01:00:00	0.53	200	/
		K3		8.12.2020. 12:30:00	9.12.2020. 10:30:00	0.95	182	Da
G16 10.12.2020.	G17 14.12.2020.	/	-1.06					
G17 14.12.2020.	G18 14.1.2021.	K1	-5.15	24.12.2020. 03:00:00	25.12.2020. 05:00:00	1.09	199	/
		K2		26.12.2020. 04:00:00	27.12.2020. 17:00:00	0.79	125	Da
		K3		28.12.2020. 08:00:00	28.12.2020. 23:00:00	2.32	178	Da
		K4		29.12.2020. 08:30:00	29.12.2020. 21:00:00	1.1	199	Da
		K5		1.1.2021. 13:00:00	2.1.2021. 23:00:00	1.11	179	Da
		K6		4.1.2021. 11:00:00	4.1.2021. 12:30:00	0.78	208	/



Slika 3.10. Pregled smjera valova izmjerenih na plutači (crvena linija) za razdoblje od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. godine.



Slika 3.11. Pregled oscilacija morske razine izmjerenih na mareografskoj mjernoj postaji u Barku (crna linija) za razdoblje od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. godine.

3.2.5. Postupak kalibracije XBeach-Gravel modela za plažu Ploče

Za potrebe kalibracije modela XBeach-Gravel za uvjete na umjetnoj plaži Ploče proveden je postupak analogan onom za valni kanal u Hannoveru opisanom u poglavlju 3.2.3. Odabrana su dva olujna događaja, označena kao G12_G13_K1 i G13_G14_K3, za kalibraciju modela koristeći se rasponom hidrauličkih vodljivosti od 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5 $\frac{m}{s}$ i koeficijentom transporta u iznosu od 0,25; 0,5; 1; 1,5 i 3. Ostali parametri potrebni za pokretanje XBeach-Gravel modela i korišteni pri ovoj kalibraciji navedeni su u dodatku A. Sveukupno je provedeno 30 simulacija te je za svaku određen BSS, kako bi se ocijenila učinkovitost modela u prognozi promjena na šljunčanom profilu.

Događaji G12_G13_K1 i G13_G14_K3 odabrani su za kalibraciju modela iz nekoliko razloga. Prvo, usporedbom promjene sedimenta na profilu 1 za razdoblje kada je dostupan DUV (1. listopada 2020. - 14. siječnja 2021.) može se u tablici 3.4 izdvojiti događaje između topografskih mjerenja 12 i 15. Tijekom tog razdoblja uočeno je manje od 1 metar ukupne promjene u količini sedimenta na profilu. Ta brojka opisuje ukupan pomak sedimenta na profilu. Ukoliko je nula, znači da je sediment redistribuiran duž profila, ako je različita od nule, znači da je sediment redistribuiran i izvan profila, odnosno dužobalno. Posljedično, događaji između topografskih mjerenja 12 i 15 su prikladni za kalibraciju - transport sedimenta tada je bio većinom duž profila plaže pa takav podatak XBeach-Gravel može modelirati. U slučajevima kada je ova brojka iznad 1 uzima se da je dio transporta sedimenta dužobalan i dovoljno značajan da XBeach-Gravel ne može vjerno reproducirati izmjerene promjene profila.

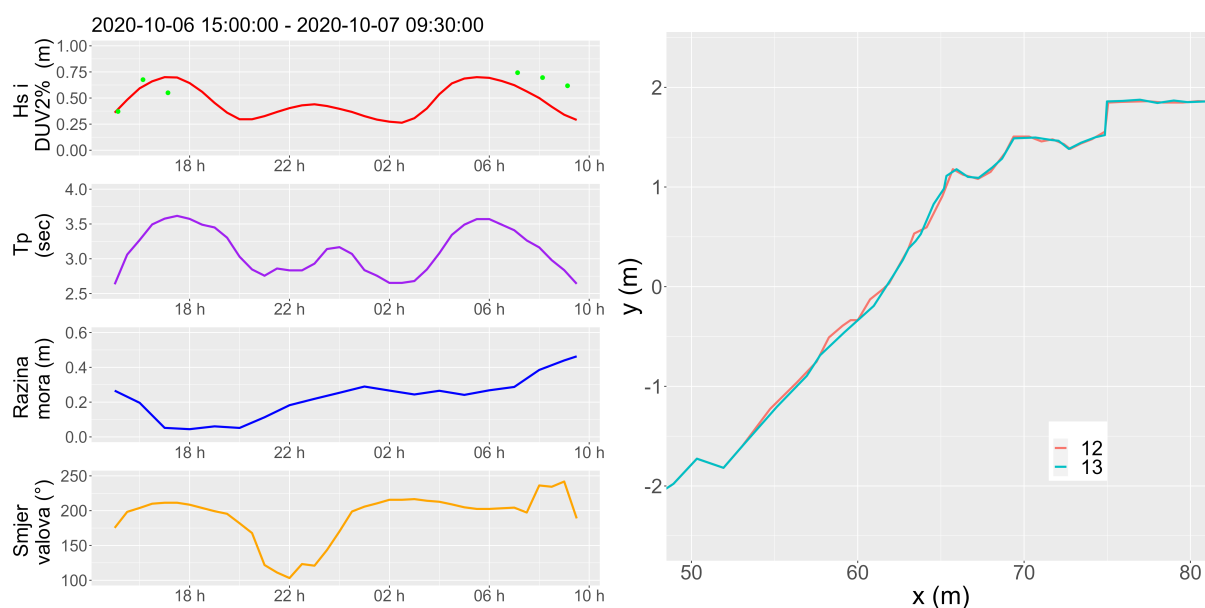
Time se broj olujnih događaja povoljnih za kalibraciju modela svodi na 6 od njih 17, a od tih 6 tijekom 2 događaja između topografskih mjerenja 14 i 15 nije mjeren DUV kamerom, jer su događaji nastupili tijekom noći te su zato izostavljeni iz odabira za kalibraciju. Tako za kalibraciju preostaju događaji između G12, G13 i G14. Između tih topografskim mjerenja nastupali su valovi s prosječnim smjerom nailaska između 182 ° i 199 ° kako je navedeno u tablici 3.4. Time su valovi nailazili direktno na simulirani profil 1, a zbog refrakcije valova opisane u radovima autora Lončar i dr. (2020) i Lončar i dr. (2021) te zbog usmjeravajućeg učinka zapadnog pera plaže.

Između topografskih mjerenja 12 i 13 nastupio je samo jedan valni događaj prikazan na slici 3.12, označen kao G12_G13_K1 s najvišom značajnom visinom valova od 0,72 metara. Događaj je trajao sveukupno 18,5 sati, od 6. listopada u 15 sati do 7. listopada u 9:30 sati, 2020. godine. Većina valnog događaja odvila se po noći, stoga je DUV zabilježen isključivo tijekom sunčanog dijela dana kada je kamera imala dovoljno svjetlosti za praćenje valnog uspona. Prosječna značajna visina valova tijekom događaja iznosila je 0,47 metara s prosječnim vršnim periodom od 3,1 sekunde. Ovaj valni događaj tako se može usporediti s Testom 1 u valnom kanalu, a koji je imao konstantan H_s od 0,6 metara.

Između preostala dva topografska mjerenja (13 i 14), nastupila su tri različita valna događaja s rastućom maksimalnom značajnom visinom valova u iznosima od 0,58; 0,78 i 1,28 metara.

Posljednji valni događaj, a koji je ujedno imao i najviši H_s , označen je s G13_G14_K3 i prikazan na slici 3.13. Taj događaj imao je dominantan utjecaj na profil plaže Ploče, stoga je samo on i korišten. Utjecaj ranija dva valna događaja zanemareni su temeljem rezultata laboratorijskih mjerenja i zaključaka autora Powell (1990) prema kojima je upravo najsnažniji i posljednji valni događaj taj koji određuje krajnji profil plaže.

Prosječna značajna visina valova tijekom događaja G13_G14_K3 prikazanog na slici 3.13a iznosila je 0,9 metara s maksimumom od 1,28 metara, a to je čini usporedivom s Testom 3 u valnom kanalu. Prosječni vršni period iznosio je 3,9 sekundi. Tijekom valnog događaja nastupio je i porast u razini mora od 0,3 metra. Srednji smjer vjetera iznosio je 181° a cijeli događaj trajao je 25 sati, od 26. listopada u 10 sati do 27. listopada u 11 sati, 2020. godine.

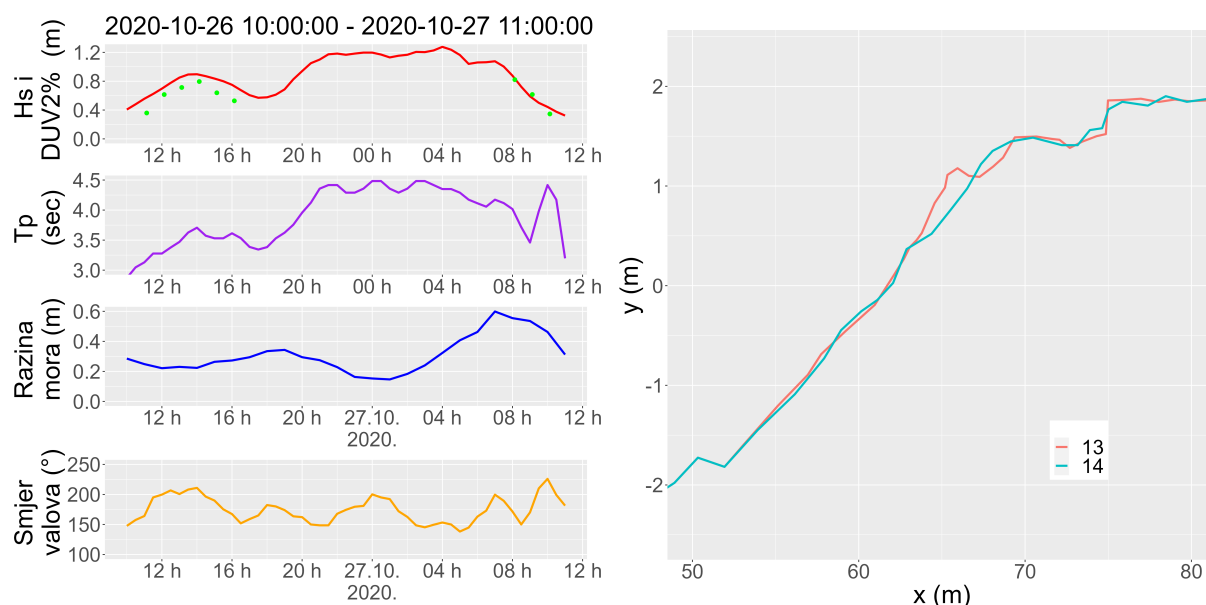


(a) Parametri valnog događaja G12_G13_K1.

(b) Topografska mjerenja 12 i 13 profila 1.

Slika 3.12. Valni događaj G12_G13_K1 opisan s 3.12a parametrima valnog događaja gdje crvena linija opisuje značajnu visinu valova H_s , zelene točke izmjereni DUV2%, ljubičasto vršni period T_p , plavo razinu mora, a žuto smjer valova i 3.12b topografska mjerenja profila 1 prije (crveno) i poslije (svjetloplava) valnog događaja.

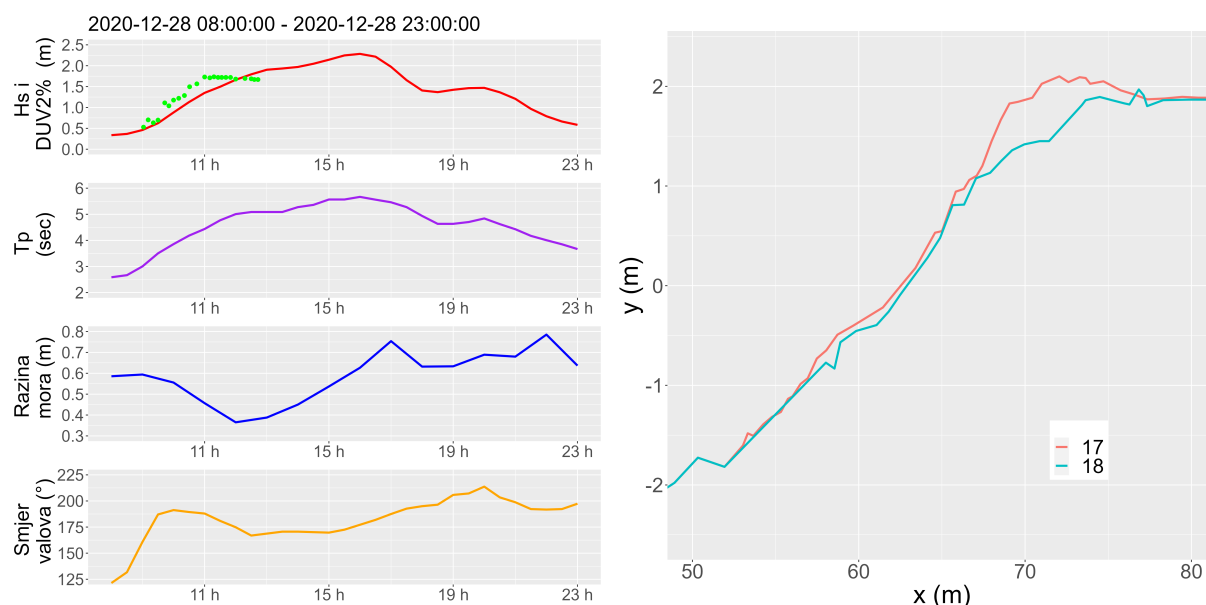
Oba valna događaja korištena su za kalibraciju modela XBeach-Gravel za slučaj profila 1, a parametri korišteni pri simulaciji detaljno su navedeni u dodatku A. Pri tome vrijedi istaknuti da ne postoji set neovisnih mjerenja na kojem je bilo moguće validirati model nakon kalibracije, već je za to korišten valni događaj G17_G18_K3 prikazan na slici 3.14. Ovaj valni događaj treći je u nizu od pet valnih događaja između topografskih mjerenja 17 i 18, a kako mu značajna visina valova doseže 2,28 metara, ujedno mu je i H_s dvostruko veći od svih prethodnih događaja između dva topografska mjerenja. Upravo ovaj događaj dominantno je oblikovao profil plaže Ploče, ali zbog utjecaja ostala tri valna događaja koja su mu slijedila, a bila su između ova dva topografska mjerenja plaže, ovaj događaj nije mogao biti korišten za kalibraciju modela, stoga se koristiti za validaciju.



(a) Parametri valnog događaja G13_G14_K3.

(b) Topografska mjerenja 13 i 14 profila 1.

Slika 3.13. Valni događaj G13_G14_K3 opisan s 3.13a parametrima valnog događaja gdje crvena linija opisuje značajnu visinu valova H_s , zelene točke izmjereni DUV2%, ljubičasto vršni period T_p , plavo razinu mora, a žuto smjer valova i 3.13b topografska mjerenja profila 1 prije (crveno) i poslije (svjetloplava) valnog događaja.



(a) Parametri valnog događaja G17_G18_K3.

(b) Topografska mjerenja 17 i 18 profila 1.

Slika 3.14. Valni događaj G17_G18_K3 opisan s 3.14a parametrima valnog događaja gdje crvena linija opisuje značajnu visinu valova H_s , zelene točke izmjereni DUV2%, ljubičasto vršni period T_p , plavo razinu mora, a žuto smjer valova i 3.14b topografska mjerenja profila 1 prije (crveno) i poslije (svjetloplava) valnog događaja.

Na slici 3.14a prikazani su valni parametri događaja G17_G18_K3 u trajanju od 15 sati i s maksimalnom oscilacijom razine mora u iznosu od 0,8 metara. Tijekom događaja prosječni

smjer iz kojeg su dolazili valova bio je jug, a valne visine postigle su vrhunac 8 sati nakon početka događaja s H_s u iznosu od 2,28 metara. Promjena na profilu prikazana na slici 3.14b ostvarena je na način da je valno djelovanje uzrokovalo formiranje visoke berme na plaži, na oko 2 metra visine. Izmjereni DUV tijekom valnog događaja označen je zelenim točkama na slici 3.14a, a u pravilu korelira sa značajnom visinom valova. DUV može iznositi od 0,4 do 2 puta iznosa H_s , a taj se omjer može i mijenjati kako se mijenjaju valni uvjeti, profil plaže i rasipanje energije (Poate i dr., 2016).

Za simulaciju navedenog valnog događaja 3.14 korišteni su parametri hidrauličke vodljivosti prethodno određeni kalibracijom. Prikaz svih parametara pri simulaciji ovog valnog događaja XBeach-Gravel modelom prikazan je u dodatku A. Usporedbom profila i DUV-a iz modela s izmjerenim očekuje se slaganje, a time i potvrda da je model validiran.

Dalje je izvršena i verifikacija modela usporedbom rezultata simulacije modela na valnom događaju G17_G18_K3 prilikom upotrebe numeričke mreže modela različite najkraće udaljenosti između točaka mreže: 0,05; 0,1 i 0,3 m. Time se opravdava odabir mreže numeričkog modela u odnosu s trajanjem simulacije valnog događaja i u odnosu s konvergencijom rezultata k rezultatima modela s najgušćom mrežom.

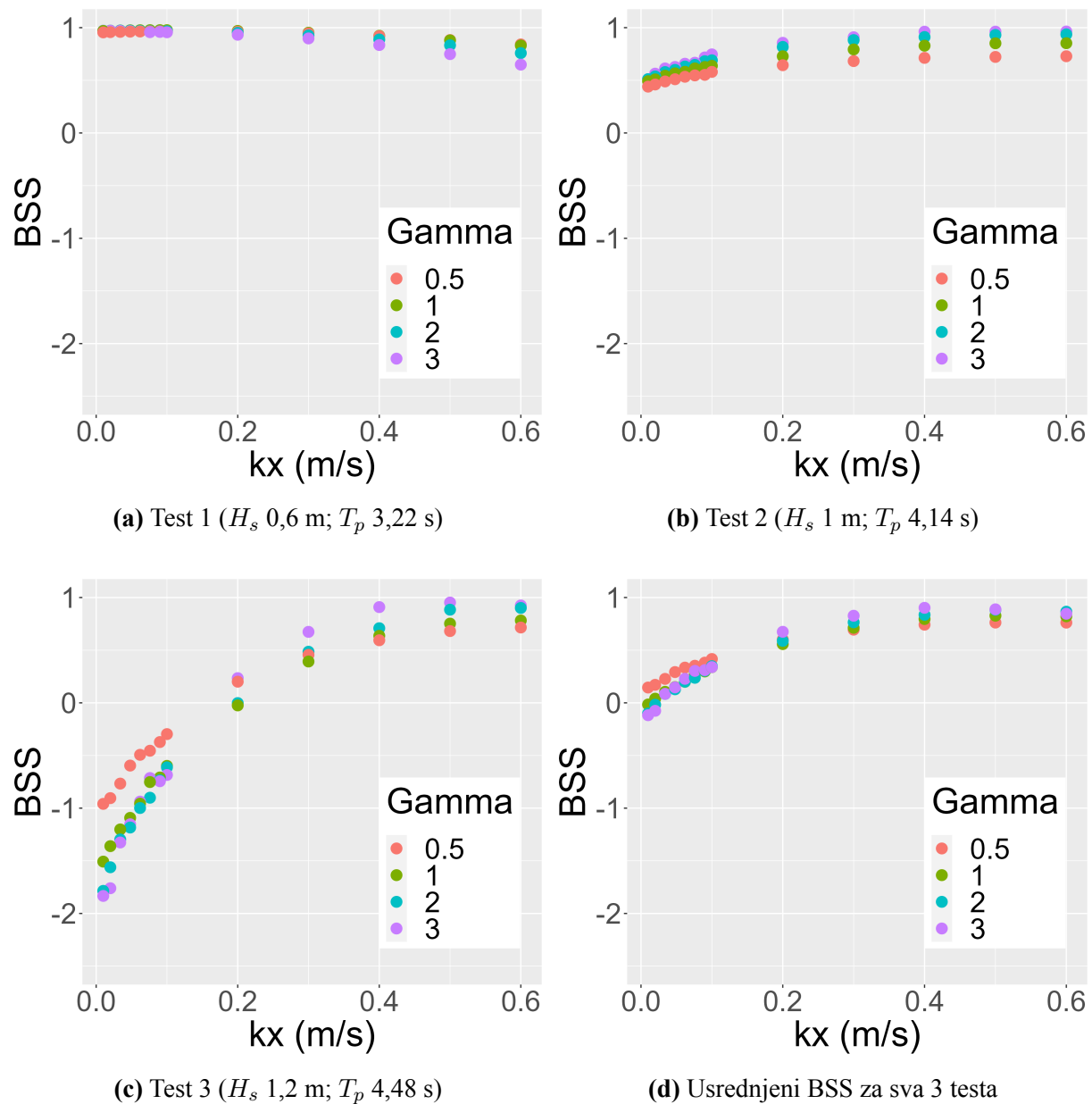
3.3. Rezultati kalibracije i diskusija

3.3.1. Rezultati kalibracije za laboratorijske uvjete u Hannoveru

Za potrebe kalibriranja modela varirani su parametri hidrauličke vodljivosti (k_x) i koeficijent transporta (γ), a s ciljem određivanja iznosa i kombinacije ta dva parametra prilikom kojih model ostvaruje Brierovu ocjenu čim bliže 1. Prilikom kalibracije korištena je hidraulička vodljivost k_x u iznosu od 0,01; 0,02; 0,034; 0,048; 0,062; 0,076; 0,09; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 i 0,6 $\frac{m}{s}$ dok su za koeficijent transporta γ korišteni iznosi od 0,5; 1; 2 i 3. Time su napravljene 52 simulacije u ovisnosti o kombinaciji prethodna dva parametra, a odabran je par tih parametara koji rezultira s najvišom Brierovom ocjenom modela. Detaljne postavke modela za sva tri testa nalaze se u dodatku A. Hidraulička vodljivost je parametar koji se može odrediti iz veličine zrna šljunka (Hazen, 2013; Poate i dr., 2016), a ovdje je određen kalibracijom po uzoru na postupak proveden u radu autora Brown i dr. (2019). Koeficijent transporta je slobodan parametar te ga je nužno odrediti kalibracijom modela.

Nakon provedene 52 simulacije modelom XBeach-Gravel za svaki od tri testa u valnom kanalu s valnim uvjetima opisanim u tablici 3.2, uspoređeni su iznosi BSS-a za sve simulacije. Izračunati BSS u ovisnosti o hidrauličkoj vodljivosti (k_x) i koeficijentu transporta (γ) prikazan je na slikama 3.15.

Za slučaj Testa 1 (slika 3.15a), gotovo sve kombinacije parametara k_x i γ postižu odličan BSS, ali uz blago opadanje prema ocjeni vrlo dobar za iznos k_x od 0,5 i 0,6 $\frac{m}{s}$. Ovaj rezultat ujedno pokazuje da odabir γ i k_x pri maloj značajnoj visini valova nema veliki utjecaj na rezultat



Slika 3.15. Izračunati BSS za testove 1 - 3 u valnom kanalu zajedno s usrednjenim BSS-om za sva tri testa u ovisnosti o odabranoj hidrauličkoj vodljivosti k_x i koeficijentu transporta γ .

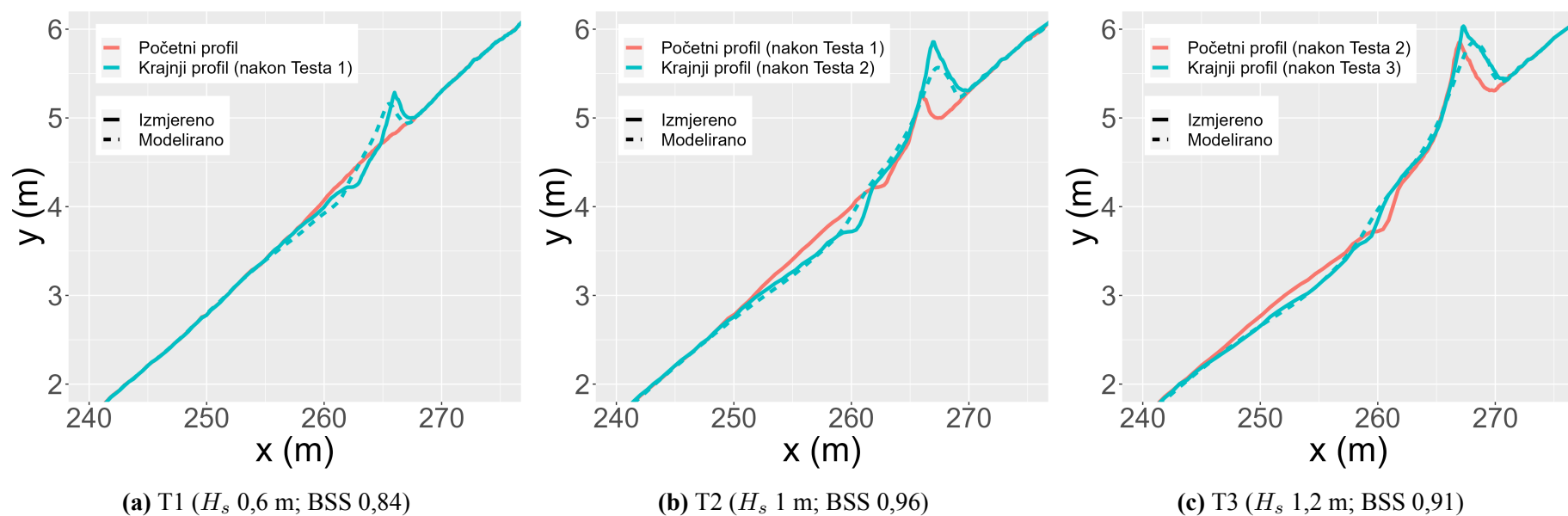
modela jer BSS u ovom parametarskom prostoru nikad nije ocijenjen s manje od vrlo dobar.

Prilikom Testa 2 s H_s od 1 metar rezultat na slici 3.15b ukazuje na suprotno ponašanje modela: BSS se povećava s porastom k_x i γ . Za ovaj test i za γ ispod 1 BSS je za 0,3 niži nego pri Testu 1 i tu se BSS može kvalificirati tek kao dobar, a postaje odličan za k_x veći od 0,2 $\frac{m}{s}$ i γ iznad 1.

Za slučaj Testa 3 sa značajnom visinom valova od 1,2 metra BSS vrijednosti na slici 3.15c ponovno rastu s porastom hidrauličke vodljivosti. Ovaj put se tek za k_x iznad 0,4 $\frac{m}{s}$ postiže dobar BSS ili bolji. Tome doprinose i viši koeficijenti transporta γ , a koji pri k_x od 0,2 i više doprinose većem BSS-u. Suprotno, pri k_x manjem od 0,2 dolazi do nižeg BSS-a pri višem koeficijentu transporta. Za k_x manji od 0,2 $\frac{m}{s}$ predviđanje modela može se kvalificirati kao loše jer BSS

iznosi manje od nule, implicirajući da prognoza modela nije ništa pouzdanija od prognoziranja početnog profila.

Kako su svi testovi koristili isti raspon koeficijenata k_x i γ , postignuti BSS može se usrednjiti kako bi se ocijenila ukupna mogućnost modela da prognozira promjene profila za valne visine u rasponu od 0,6 do 1,2 metara. Rezultat usrednjenih vrijednosti BSS-a prikazan je na slici 3.15d. Tada model ostvaruje odličan i najviši BSS od 0,9 za slučaj kombinacije parametara k_x od $0,4 \frac{m}{s}$ i γ u iznosu od 3. S takvim parametrima model ostvaruje visoki BSS u sva tri testa, te oni ujedno i predstavljaju kalibrirane koeficijente modela za slučaj valnog kanala u Hannoveru. Najveći utjecaj na zajednički BSS je imao Test 3 koji je pokazao da manje vrijednosti k_x i γ nisu prikladne za H_s od 1,2 m.



Slika 3.16. Promjene na profilu nakon testova 1 - 3 za slučaj kalibriranog seta parametara (k_x od $0.4 \frac{m}{s}$ i γ u iznosu 3). Crvena linija predstavlja početni profil, svjetlozelena puna linija izmjereni krajnji profil, dok isprekidana svjetlozelena linija predstavlja modelirani profil.

Na slici 3.16 prikazane su izmjerene i modelirane promjene na profilu u valnom kanalu koje su nastupile tijekom testova 1 - 3. Za modelirane rezultate korišteni su parametri k_x od $0,4 \frac{m}{s}$ i γ u iznosu 3, odnosno kalibrirani parametri. Za Test 1 na slici 3.16a valovi s H_s u iznosu od 0,6 metara uzrokuju na profilu bermu od 0,45 metara, a model uzrokuje slične promjene na profilu s bermom od 0,38 metara, ali dislociranu u lijevo, odnosno niz profil. Modelirana promjena na profilu ostvaruje odličan iznos BSS-a od 0,8351, a i kvalitativni rezultat simulacije je dobar, usprkos nešto nižoj modeliranoj bermi i poziciji. Za slučaj Testa 2 na slici 3.16b model ponovno predviđa nižu bermu (0,56 metara u odnosu na izmjenjenih 0,88 metara) prilikom djelovanja valova s H_s od 1 metra. Međutim, pozicija berme je u ovom slučaju dobro predviđena. Slično i za slučaj Testa 3 na slici 3.16c, model ponovno dobro pozicionira bermu iako podcjenjuje njenu visinu (1 metar izmjereno u odnosu na 0,75 metara modelirano).

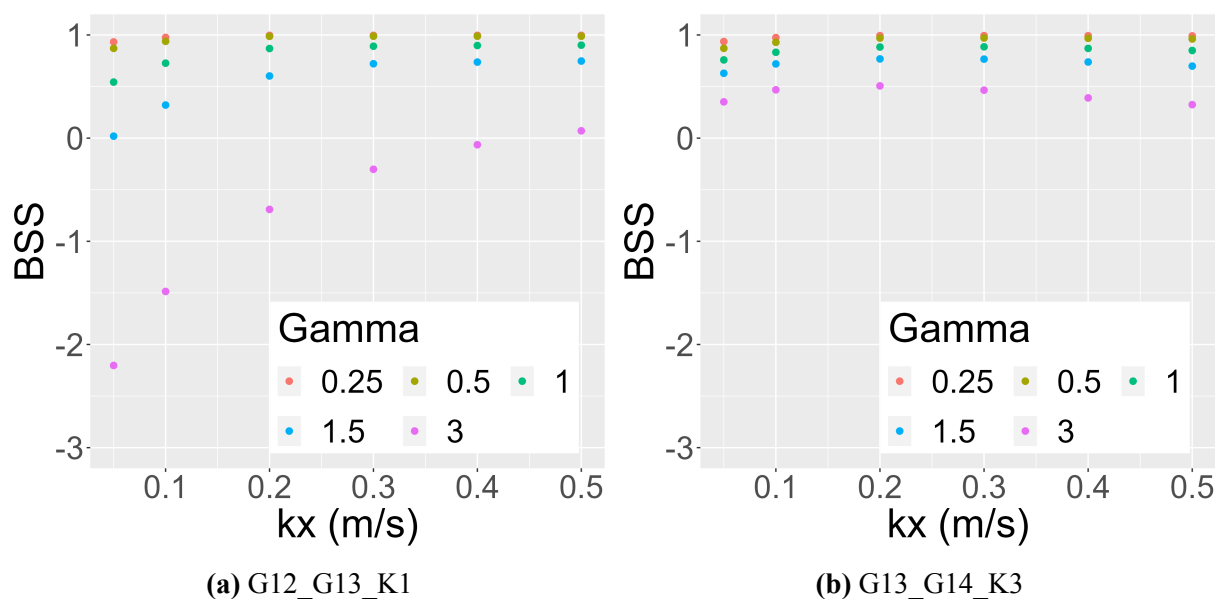
Prema podacima dostupnim u literaturi, XBeach-Gravel model bez kalibracije sposoban je u kvalitativnom smislu opisati formiranje berme prilikom pojave valova niske energije, ali kvantitativno postiže tek dobar BSS od 0,54 (McCall i dr., 2015). Međutim, rezultati prethodno prikazani za slučaj valnog kanala s valovima niske energije, odnosno niske značajne visine valova, ukazuju na to da je kalibracijom modela moguće postići i odličan BSS u iznosu od 0,9 za slučaj formiranja berme. Pri tome je ovdje korišten koeficijenta transporta γ u iznosu 3, dok se u radu (McCall i dr., 2015) koristi iznos 1. Moguće obrazloženje je u upotrebi riječnog šljunka za fizikalni model u valnom kanalu gdje je takav šljunak ipak pokretljiviji u odnosu na onaj prirodno prisutan na plaži. Dodatno, valni kanal sprječava raspršenje energije kakvo bi se postiglo na stvarnoj obali, što može dovesti do pomicanja šljunka u većoj mjeri.

3.3.2. Rezultati kalibracije za plažu Ploče

Analogno kao i za slučaj valnog kanala, određen je BSS za različite kombinacije parametara hidrauličke vodljivosti k_x i koeficijenta transporta γ za dva valna događaja, koji su prikazani na slici 3.17. Raspon k_x iznosio je 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5 dok je za γ iznosio 0,25; 0,5; 1; 1,5 i 3. Cijeli popis korištenih parametara za kalibraciju provedenu na plaži Ploče za slučaj valnih događaja G12_G13_K1 i G13_G14_K3 nalazi se u dodatku A.

Za slučaj valnog događaja G12_G13_K1 na slici 3.17a BSS raste porastom hidrauličke vodljivosti i padom iznosa koeficijenta transporta. Model se pokazao najosjetljivijim na koeficijent transporta te je BSS loš za γ od 3, u rasponu od loše do vrlo dobro za γ od 1,5 te odličan za sve koeficijente γ jednake ili manje od 1. Odabir hidrauličke vodljivosti pokazao se bolji iznad $0,2 \frac{m}{s}$, ali razlike nisu značajne. U kontekstu promjena na profilu (prikazanih na slici 3.12b) koje su utvrđene topografskim mjerenjima, upotreba previsokog koeficijenta transporta u ovom slučaju nije pogodna, jer tada sediment postaje previše mobilan.

Za valni događaj G13_G14_K3, BSS prikazan na slici 3.17b, model je manje osjetljiv na odabir koeficijenta transporta, a podjednako na hidrauličku vodljivost kao u prošlom slučaju. Ipak, ponovno se vidi da je odabir koeficijenta transporta od 1 ili manje bolji za postizanje



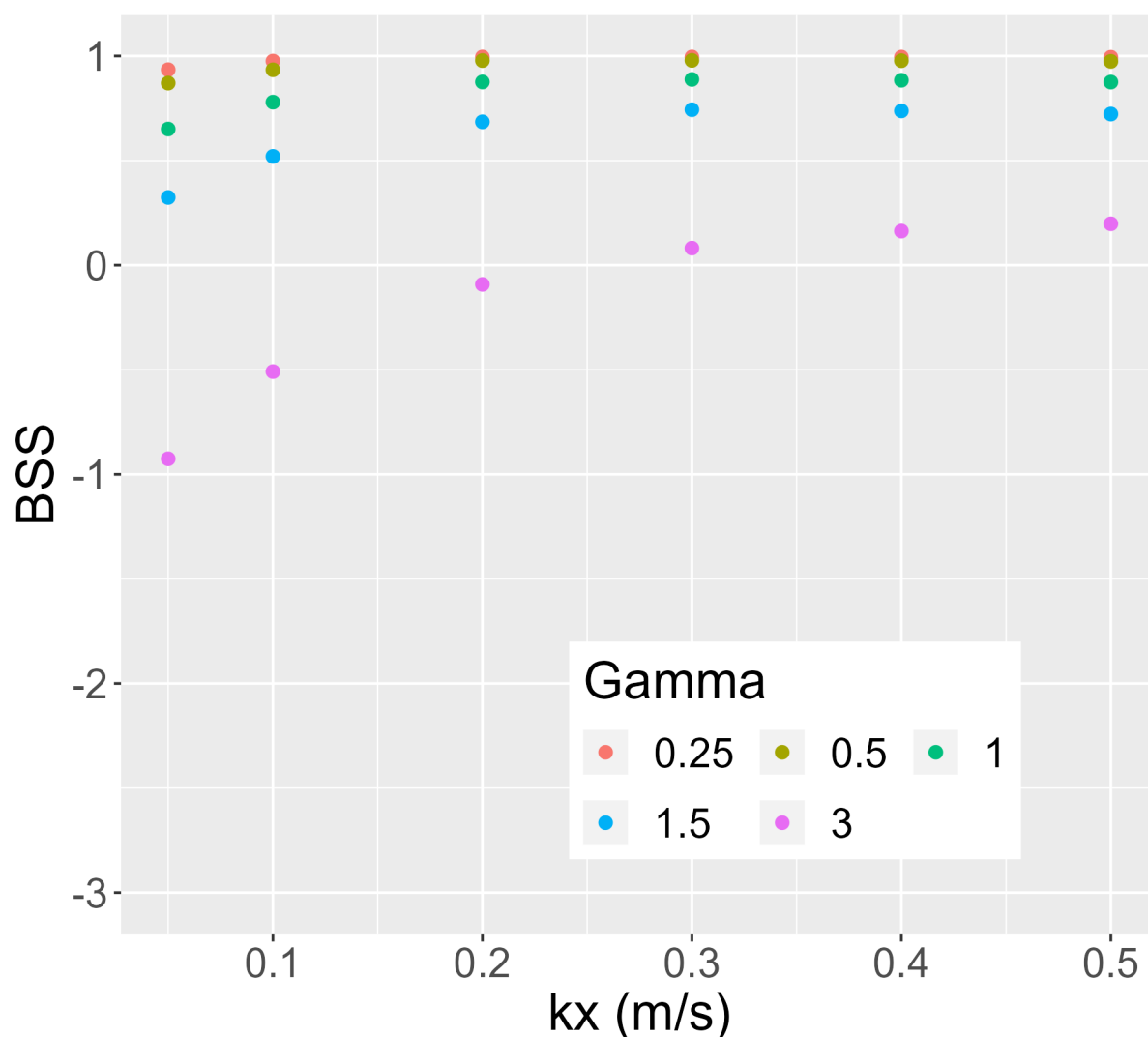
Slika 3.17. Izračunati BSS u ovisnosti o hidrauličkoj vodljivosti k_x i koeficijentu transporta γ za valni događaj 3.17a G12_G13_K1 i 3.17b G13_G14_K3.

visoke ocjene BSS-a - gotovo sve simulacije s γ od 1 ili manje postižu ocjenu odličan. Također, iz izgleda krivulje u ovisnosti o promjenama k_x vidi se da model za slučaj plaže Ploče postiže najbolje rezultate za hidrauličku vodljivost između 0,2 i 0,3 $\frac{m}{s}$.

Sličan zaključak slijedi i za slučaj kad se odredi usrednjeni BSS-a za oba valna događaja, što je prikazano na slici 3.18. BSS je ocijenjen odličnim za sve odabire γ ispod 1 u kombinaciji s bilo kojim iznosom hidrauličke vodljivosti od testiranih. Najviši BSS postignut je za kombinaciju k_x u iznosu od 0,3 $\frac{m}{s}$ i γ od 0,25, a iznosi 0,9950. Za γ u iznosu od 1,5 BSS postiže tek vrlo dobru ocjenu od 0,7432 ili niže, dok za isnos γ od 3 BSS ne prelazi 0,3 tj. ocjenu slabo. Odabir hidrauličke vodljivosti nije toliko značajno utjecao na iznos BSS-a koliko odabir koeficijenta transporta, stoga su prihvatljive i vrijednosti od 0,2 do 0,5 $\frac{m}{s}$ s obzirom na testirani raspon, uz γ od 1 ili manje.

Kao što je ranije navedeno, valni događaj G12_G13_K1 s pripadnom značajnom visinom valova od 0,6 metara uzrokuje tek male promjene na profilu prikazanom na slici 3.19a. To je u suprotnosti s rezultatima Testa 1 prikazanog na slici 3.16a, gdje ista značajna visina valova uzrokuje puno višu bermu u valnom kanalu. Pri tome je Test 1 proveden u trajanju od 2,5 sata, dok je stvarni valni događaj na plaži Ploče trajao 6 sati i imao je najviši H_s u iznosu od 0,6 metara. Također, na slici 3.19b prikazan je zadani H_s , kao i izmjereni i modelirani DUV2%. Doseg uspinjanja valova u modelu pokazuje dobro slaganje s mjerenjima, međutim u drugom dijelu valnog događaja izmjereni DUV nadilazi modelirani i za 0,15 metara.

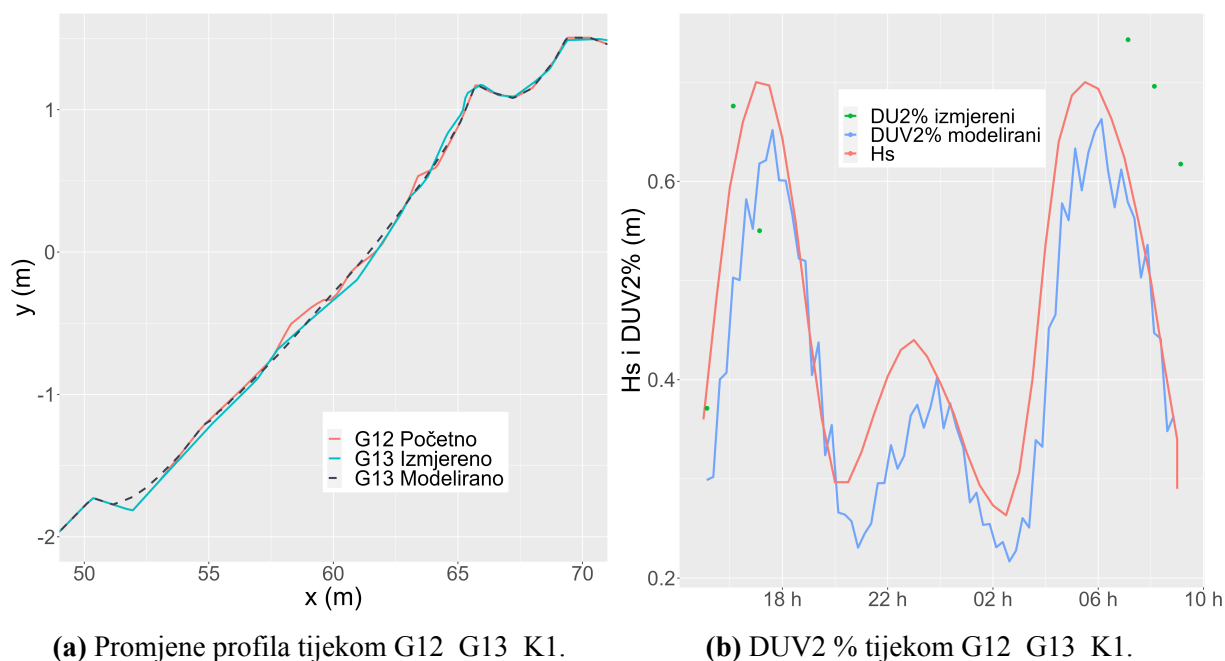
Za slučaj drugog valnog događaja, rezultati su prikazani na slikama 3.20. Tu je značajna visina valova iznosila i 1,25 metara te je kao takva usporediva s Testom 3 i promjenama profila prikazanim na 3.16c. U ovom slučaju su valovi na plaži Ploče prouzrokovali višu bermu nego u



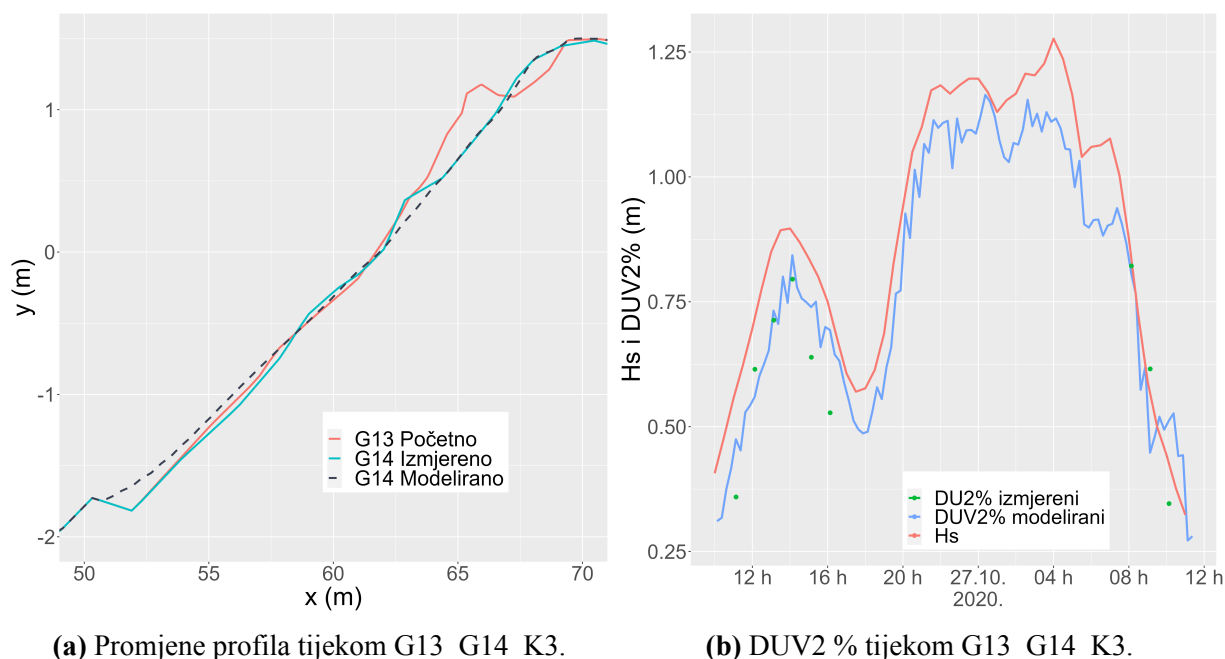
Slika 3.18. Usrednjeni BSS za 2 valna događaja, G12_G13_K1 i G13_G14_K3 u ovisnosti o različitim k_x i γ .

prethodno analiziranom valnom događaju, kao što je prikazano na [3.20a](#). Model uspješno reproducira takvu bermu uz pomak dijela sedimentnog materijala u dubinu, tj. niz profil. Pri tome je izmjereni DUV2% prikazan na slici [3.20b](#) pokazao dobro slaganje s modeliranim vrijednostima, prateći i trend i iznose.

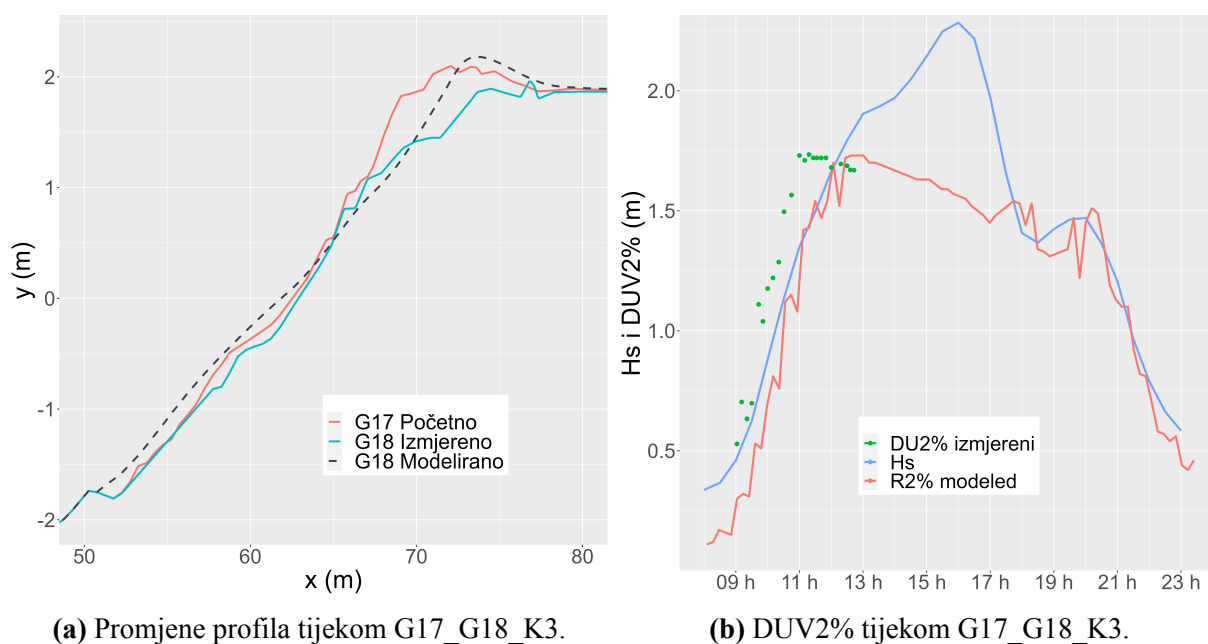
Na prethodno pokazanim primjerima zaključeno je da kombinacija parametara hidrauličke vodljivosti k_x u iznosu od $0,3 \frac{m}{s}$ i koeficijenta transporta γ od 0,25 omogućuje modelu da adekvatno opisuje promjene na profilu umjetne šljunčane plaže Ploče. S takvim postavkama model može opisati promjene na profilu s odličnim BSS-om, a pokazuje i dobro slaganje s izmjerenim vrijednostima DUV2%.



Slika 3.19. Valni događaj G12_G13_K1: na slici 3.19a nalaze se promjene profila nastale djelovanjem olujnog događaja (crveno - izmjereni početni profil, tj. topografsko mjerenje G12, svjetloplavo izmjereni krajnji profil, tj. G13, svjetloplavo i isprekidano modelirani krajnji profil tj. G13 i 3.19b prikaz značajne visine valova H_s (crveno), modelirani (plave) i izmjereni DUV 2 % (zelene točke).



Slika 3.20. Valni događaj G13_G14_K3: na slici 3.20a nalaze se promjene profila nastale djelovanjem olujnog događaja (crveno - izmjereni početni profil, tj. topografsko mjerenje G13, svjetloplavo izmjereni krajnji profil tj. G14, svjetloplavo i isprekidano modelirani krajnji profil, tj. G14 i 3.20b prikaz značajne visine valova H_s (crveno), modelirani (plave) i izmjereni DUV2 % (zelene točke).



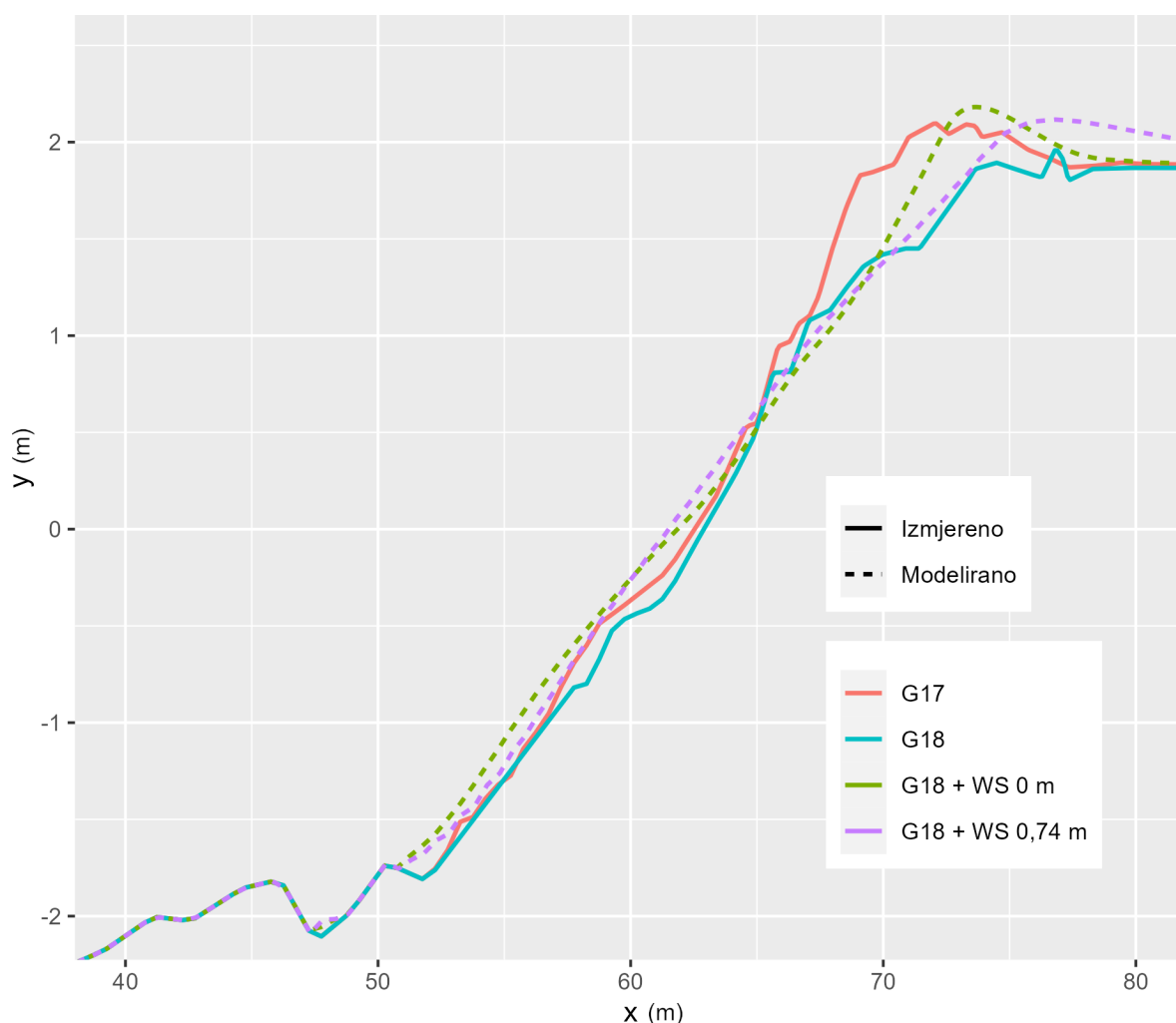
Slika 3.21. G17_G18_K3: [3.21a](#) promjene profila nastale djelovanjem olujnog događaja (crveno - izmjereni početni profil, tj. topografsko mjerenje G17, svjetloplavo izmjereni krajnji profil, tj. G18, svjetloplavo i isprekidano modelirani krajnji profil tj. G18) i [3.21b](#) značajne visine valova H_s (crveno), modelirani DUV (plavo) i izmjereni DUV (zelene točke).

3.3.3. Validacija kalibriranog modela za valni događaj G17_G18_K3

Rezultati validacije modela pri valnom događaju G17_G18_K3 prikazani su na slici [3.21](#). Promatrajući DUV, na slici [3.21b](#), i model i mjerenja pokazuju dobro slaganje i porast DUV-a do 1,75 metar oko 11 sati, kada zbog djelovanja privremenog porasta razine mora u iznosu od 0,4 metra dolazi do prelaska valova preko berme, odnosno *overtoppinga*.

Model je predvidio i pomicanje postojeće berme na profilu k obali, kao što se vidi na slici [3.21a](#), dok je dio materijala erodiran s berme i odvučen na dubinu do 1 metar. To se djelomično poklapa sa zaključcima pojedinih radova (npr. Lončar i dr. (2020) i Lončar i dr. (2021)) gdje autori navode akumulaciju šljunka na obali. Može se pretpostaviti da bermu formiranu na plaži Ploče nakon olujnog događaja G17_G18_K3 nije moguće uočiti na topografskom mjerenju 18 jer su akumulirani materijal uklonili komunalni radnici Grada Rijeke pet dana prije mjerenja.

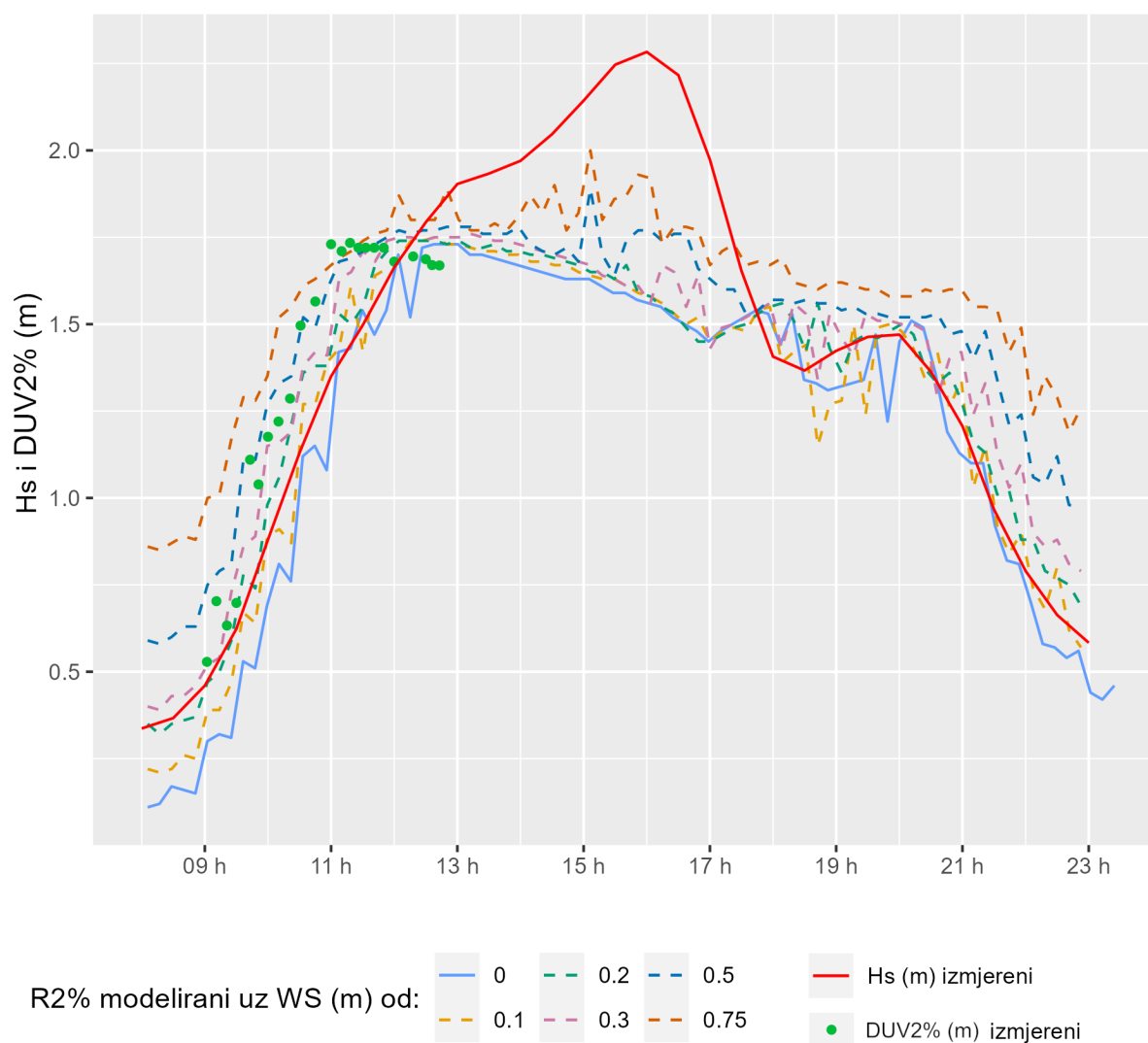
Međutim, po zaključcima ranije navedenih radova (Lončar i dr., 2020; Lončar i dr., 2021), ali uvažavajući činjenicu da je plaža Ploče tzv. džepna plaža, može se pretpostaviti da je rezultat modela na slici [3.21a](#) podcijenio pomak sedimenta prema kopnu te da je on u stvarnosti bolje odgovarao profilu prikazanom na slici [3.22](#) kada se u simulaciji poveća razina mora za dodatnih 75 centimetra. To povećanje odgovaralo bi pretpostavljenom iznosu podizanja (srednje razine) mora uslijed djelovanja valova, *engl. wave setup* i skraćeno WS, a time bi se uvažilo svojstvo plaže Ploče kao džepne plaže, što doprinosi dodatnom lokalnom porastu morske razine prilikom djelovanja visokih valova (Poulos i dr., 2012). XBeach-Gravel to svojstvo ne uvažava u simula-



Slika 3.22. Promjene profila tijekom valnog događaja G17_G18_K3 za slučaj kada se koristi i wave setup: crveno početni profil iz topografsko mjerenja 17, svjetloplavo krajnji profil iz topografskog mjerenja 18, isprekidano zeleno modelirani krajnji profil bez korištenog wave setupa, isprekidano ljubičasto modelirani krajnji profil dobiven uz korišteni wave setup u iznosu od 0,75 metra.

ciji, ali se ono može uvažiti dodatnim povećanjem razine mora u modelu. Tom prilikom razina mora zadana modelu uvećava se za željeni WS, a DUV se potom nastavlja računati od razine mora koja nije uvećana za WS, a potom i DUV2%. Time je efektivno DUV iz modela uvećan za iznos pretpostavljenog WS te se u ovom slučaju približava i DUV-u dobivenim mjerenjem putem kamere. Na slici 3.21b valni uspon koji je izmjeren (zelene točke) viši je od valnog uspona koji predviđa model (plava linija). Ukoliko se ponove simulacije s različitim fiksnim WS-om zadanim tijekom cijelog olujnog događaja, doći će do porasta valnog uspona na plaži linearno sa zadanim WS-om.

Na slici 3.23 prikazan je valni uspon u ovisnosti za različiti zadani WS. U usporedbi s izmjerenim valnim usponom, modelirani uspon za značajne visine valova oko 0,5 metara odgovara izmjerenom usponu kada se uvaži WS u iznosu od 0,2 do 0,3 metra. Takav zaključak ide u prilog i rezultatima za valni događaj G12_G13_K1. Na slici 3.19b je valni uspon dobiven mo-



Slika 3.23. Valni uspon na plaži Ploče određen XBeach-Gravel modelom tijekom valnog događaja G17_G18_K3 (značajna visina valova H_s prikazana crvenom linijom) za različiti WS (puna plava linija bez WS, crtkane linije s valnim WS od 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 i 0,75 metara) i u usporedbi s izmjerenim valnim usponom (zelene točke).

delom manji od izmjerenog te bi porast od približno 0,25 metra nadoknadio tu razliku. Za slučaj G13_G14_K3 na slici 3.20b WS u tom iznosu bi pak pridonio precjenjivanju modela.

Tijekom viših visina vala, od 1 pa do 1,5 metar, dobro slaganje izmjerenog i modeliranog uspona postiže se za WS u iznosu od 0,5 metara. Nakon 12 sati valnog događaja valni uspon stagnira u odnosu na rast značajne visine valova, a razlog tome je što tada počinje rasti i morska razina što s već visokim H_s uzrokuje prelijevanja valova iznad krune plaže (engl. *overtopping*).

Za očekivati je da bi daljnjim porastom značajne visine valova u slučaj plaže Ploče rastao i iznos WS-a potrebnog da model nadoknadi razliku između simuliranog i mjenog uspona. Stoga slijedi da WS pri značajnim visinama valova do 1 metra iznosi 0,25 metara, do 2 metra poprima vrijednosti do 0,5 metara, a za valne visine do 3 metra može iznositi i 0,75 metara. Vrijednosti su navedene i u tablici 3.5. Posljedica je to karakteristike plaže Ploče kao džepne

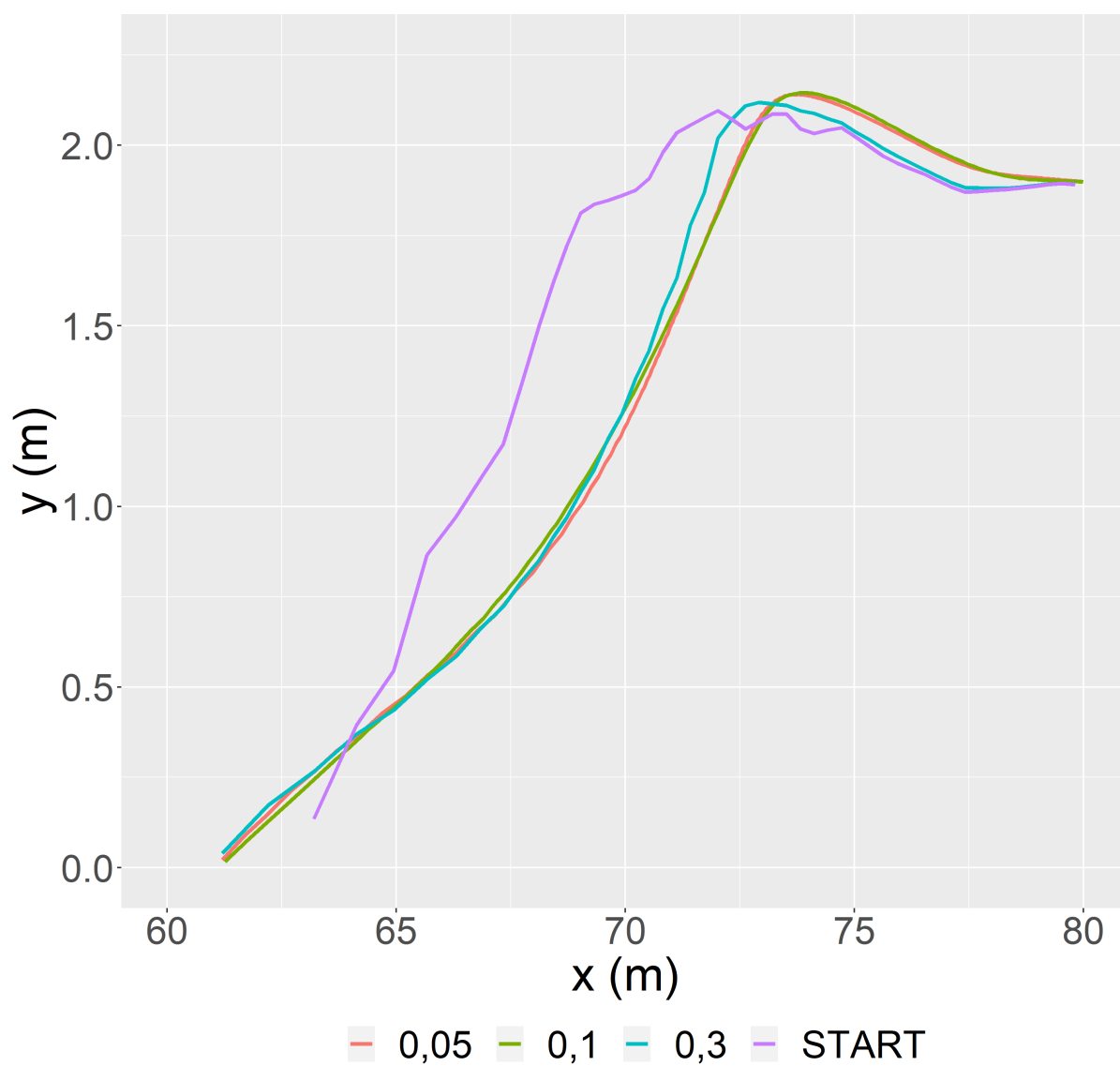
Tablica 3.5. Iznosi pretpostavljenog porasta SRM uslijed djelovanja valova (WS) u ovisnosti o zadanoj značajnoj visini valova H_s za slučaj plaže Ploče

H_s (m)	WS (m)
1	0,25
2	0,5
3	0,75

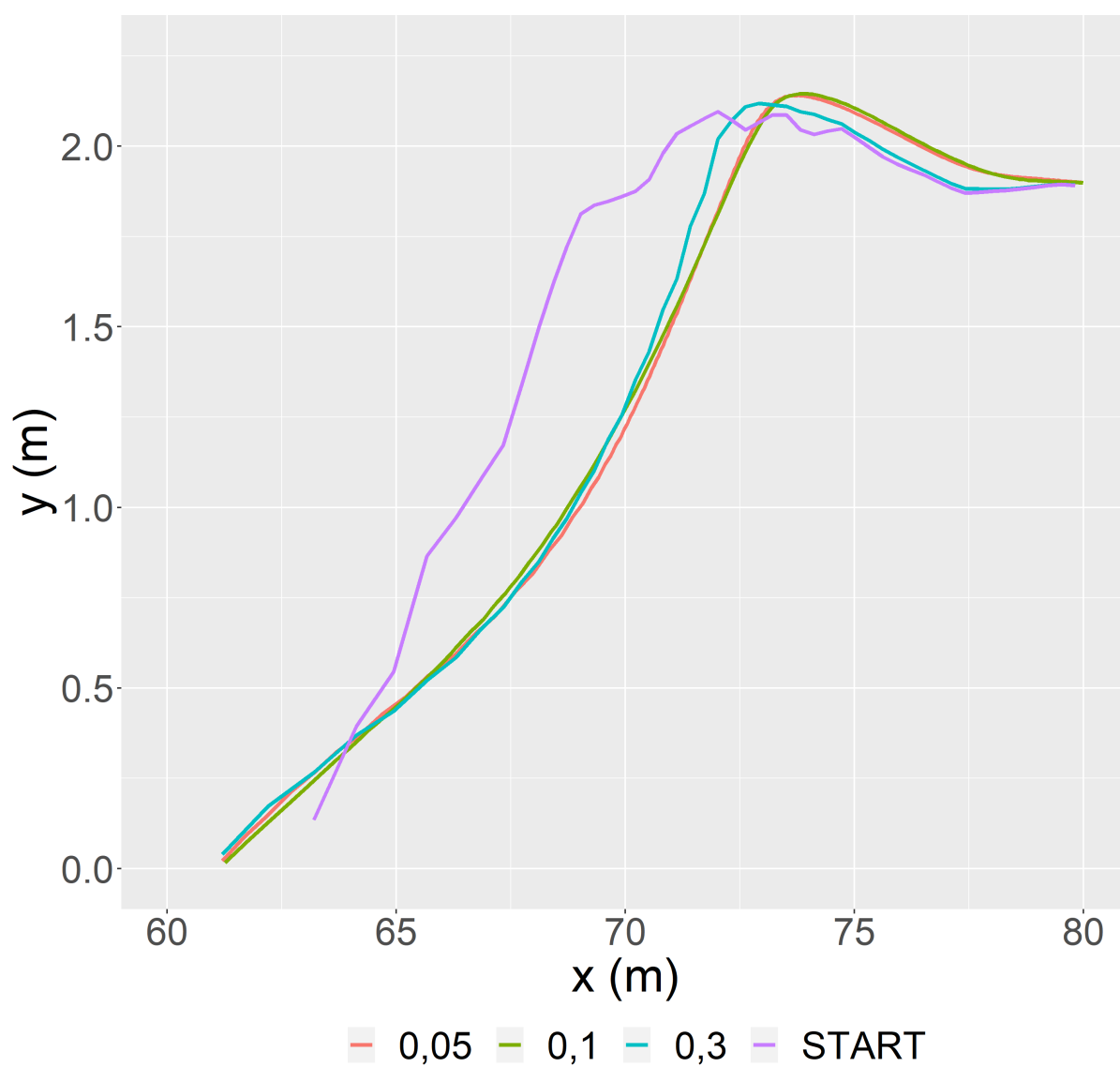
plaže čija zapadna ćelija ima širinu od tek 110 metara. Takav fenomen potrebno je uvažiti i pri simulacijama olujnih događaja u budućnosti s porastom srednje razine mora.

3.3.4. Verifikacija kalibriranog modela za segment valnog događaja G17_G18_K3

U konačnici provedena je i verifikacija usporedbom rezultata modela za segment valnog događaja G17_G18_K3 simuliranog na mreži različite najmanje udaljenosti među točkama: 0,05; 0,1 i 0,3 m. Korišten je segment valnog događaja između 13 i 17 h sa značajnim visinama valova u iznosu od 1,9 do 2,3 m. Rezultati simulacija s različitim gustoćama mreže prikazani su na slikama 3.24 i 3.25 zajedno s početnim profilom označenim sa START. Razlike između simulacija s mrežom gustoće 0,1 i 0,05 su malene u odnosu na razlike između mreža 0,05 i 0,3 m. Mreža gustoće 0,3 m nije predviđela formiranje nove berme na jednakom mjestu kao i dvije gušće mreže, stoga je svakako potrebna upotreba gušće mreže. Korištenje mreže gustoće točaka 0,1 m omogućuje relativno brzu provedbu simulacija, odnosno približno dvostruko bržu nego u slučaju mreže gustoće 0,05 m, a istovremeno pruža približno jednak rezultat kao i mreža veće gustoće.



Slika 3.24. Promjene na profilu izazvane simulacijom segmenta valnog događaja G17_G18_K3 na mrežama s različitom najmanjom udaljenošću među točkama.



Slika 3.25. Promjene na profilu izazvane simulacijom segmenta valnog događaja G17_G18_K3 na mrežama s različitom najmanjom udaljenošću među točkama, uvećano samo na segment gdje se ostvaruju najznačajnije promjene.

3.3.5. Pregled kalibriranih parametara i diskusija

Nakon provedene kalibracije, u tablici 3.6 navedeni su parametri k_x i γ postignuti kalibracijom modela XBeach-Gravel za potrebe simulacije valnih događaja na plaži u valnom kanalu u Hannoveru i za prirodnu plažu Ploče, u usporedbi s korištenim parametrima iz rada autora McCall i dr. (2015) kao i pripadnim parametrima plaža i valova na kojima su simulacije obavljene. Za slučaj formiranja berme, tj. slabo energičnih uvjeta, rezultati simulacija bez kalibracije za pojedinačnu plažu u slučaju rada (McCall i dr., 2015) pokazivali su vrijednosti BSS-a u prosjeku od 0,54 (za slučajeve iz tablice pod oznakom BAB3 i CB01). U odnosu na slučaj BAB3, kada prevladava isključivo formiranje berme, postignut BSS iznosio je 0,38. Kalibracijom model za slučaj plaže Ploče i valnog kanala u Hannoveru ovdje je pokazano da je moguće postići i iznos BSS-a u rasponu od 0,84 do 1, što predstavlja značajno unaprijeđenje (Bogovac i dr., 2023a). Nedostatak rezultata simulacije BAB3 leži u podcjenjivanju volumena berme pri njenom stvaranju, stoga se povećanje BSS-a modela primarno odlikuje u boljem predviđanju volumena berme pri stvaranju bermi prilikom valnih događaja niske energije. Taj rezultat bio je posebno uočljiv za simulacije u valnom kanalu u Hannoveru, tj. za Testove 1, 2 i 3.

Kalibrirani parametri također ukazuju na to da je za potrebe opisa uvjeta u valnom kanalu u Hannoveru potrebna upotreba značajno većeg koeficijenta transporta, u ovom slučaju čak u iznosu od 3. Tek tada se postiže odličan BSS te pravilno opisuje i volumen formirane berme u valnom kanalu. To je u skladu s prethodnim napomenama za slučaj Bardex, gdje je mobilnost sedimenta povećana na 1 uz obrazloženje da je riječni sediment korišten u eksperimentalnom postavu Bardex eksperimenta zbog zaobljenosti i oblika bio pomičniji od sedimenta morskog podrijetla kakav se očekuje na plažama (McCall i dr., 2015).

Za uvjete na plaži Ploče potreban je manji γ u iznosu od 0,25 iako se i za iznos od 0,5 mogu postići dobri rezultati bez značajne razlike u ocjeni BSS-a. To je suprotno činjenici da je na plaži Ploče prisutan sferičan i dobro zaobljen sediment, a što bi trebalo doprinijeti njegovoj pokretljivosti. Simulacije na plaži Ploče s γ od 0,5 provedene su u radu (Miličević i dr., 2025) i potvrdile su prethodno navedeni zaključak o fleksibilnosti odabira parametra γ . U tom radu koristili su se stacionarni valni uvjeti preuzeti od izmjerenih valnih događaja koji su zadesili plažu Ploče. Iako se takvim odabirom valnih uvjeta dobije ipak nešto niži BSS nego u slučaju kada se u simulaciji koristi cijeli izmjereni valni zapis valnog događaja, BSS se i dalje ocjenjuje s odličan. Time se ušteda u proračunskom vremenu i kompleksnosti modela pokazuje opravdana.

Tablica 3.6. Pregled olujnih događaja i simulacija XBeach-Gravel modelom preuzetih iz rada (McCall i dr., 2015) (Bardex-Sillon de Talber), provedenih u sklopu ove disertacije (Hannover-Ploče, označeni podebljano) i preuzetih iz (Miličević i dr., 2025). U tablici je opisan tip plaže, naveden je medijan promjera materijala, koeficijent transporta plaže (pri tome je $k - x$ za Hannover i Ploče određen kalibracijom), koeficijent transporta γ , nagib plaže, potom oznaka pojedine simulacije s njenim početkom i trajanjem te pripadnim topografskim mjerenjima, maksimalni valni uvjeti (H_s , T_p i strmost valova), omjer visine berme plaže R_c i H_s , opis morfodinamičkog odgovora plaže i pripadna vrijednost Brierove ocjene za svaku simulaciju.

Obilježja plaže						Simulacija oluje						Maksimalni zabilježeni valni parametri				Relativno forsiranje i odgovor plaže		
Lokacija	Tip sedimenta	D50 (mm)	k _c (mm/s)	γ	tan(β)	Simulacija	Topografsko mjerenje prije oluje	Topografska mjerenja nakon oluje	Početak simulacije	Kraj simulacije	Trajanje oluje (h)	Hs (m)	Tp (s)	Strmost	Rc/Hs	Morfodinamički odgovor plaže	Ostvareni BSS	
Bardex	Krupni šljunak	11	155	1	0,19	BAB3	3.7.2008.	3.7.2008.	3.7.2008.	3.7.2008.	1,7	0,8	4,3	0,029	2	Formiranje berme	0,38	
						BABR	2.7.2008.	2.7.2008.	2.7.2008.	2.7.2008.	0,1	1	10	0,005	1	Izdizanje krune	0,91	
						BAE9	28.7.2008.	28.7.2008.	28.7.2008.	28.7.2008.	1,2	0,8	8	0,007	1,2	Spuštanje krune	0,77	
						BAE10	29.7.2008.	29.7.2008.	29.7.2008.	29.7.2008.	1,2	0,8	8	0,007	0,5	Pomicanje barijere	0,66	
Chesil Beach	Krupni šljunak	40	400	0,5	0,2	CB01	14.12.2012.	15.12.2012.	14.12.2012.	15.12.2012.	25	2,9	8,6	0,027	2,9	Erozija plaže i formiranje berme	0,69	
						CB02	5.2.2014.	6.2.2014.	5.2.2014.	6.2.2014.	21,5	7,6	13,9	0,025	1	Erozija plaže	/	
Loe Bar	Sitni šljunak	2	10	0,5	0,12	LB01	2.2.2014.	18.2.2014.	2.2.2014.	5.2.2014.	64,5	8	14,5	0,024	0,6	Spuštanje krune	0,93	
Slapton Sands	Srednje krupni šljunak	6	75	0,5	0,15	SS01	21.10.2013.	21.10.2013.	21.10.2013.	21.10.2013.	9,8	2	6,9	0,029	2	Erozija plaže	0,63	
Sillon de Talber	Krupni šljunak	80	400	0,5	0,11	SS02	9.1.2014.	7.2.2014.	4.2.2014.	6.2.2014.	36	4,6	9,5	0,035	0,7	Izdizanje krune i erozija plaže	0,88	
						ST01	7.2007.	7.2008.	9.3.2007.	12.3.2007.	74	9,5	16	0,024	0,2	Pomicanje barijere	/	
Hannover	šljunčana plaža u valnom kanalu	21	400	3	0,125	Test 1						2,33	0,6	3,22	0,05	3	Formiranje berme	0,84
						Test 2						2	1	4,14	0,05	1,8	Formiranje berme	0,96
						Test 3						2,17	1,2	4,48	0,05	1,5	Formiranje berme	0,91
Ploče	umjetna džepna šljunčana plaža	20	300	0,25	0,18	G12 G13 K1	6.10.2020.	13.10.2020.	6.10.2020. 15h	7.10.2021. 9:30h	18,5	0,7	3,61	0,03	2,1	Formiranje berme	1	
						G13 G14 K3	13.10.2020.	2.11.2020.	26.10.2020. 10h	27.10.202. 11h	25	1,28	4,48	0,04	1,2	Formiranje berme	1	
						G17 G18 K3	14.12.2020.	14.1.2021.	28.12.2020. 8h	28.12.2020. 23h	15	2,28	5,66	0,05	0,9	Izdizanje krune	0,76	
Ploče (Miličević i dr., 2025)	umjetna džepna šljunčana plaža	20	300	0,5	0,18	UAV3i4	12.2.2020.	2.3.2020.	/	/	3,5	1,5	4,6	0,05	1,10	Formiranje berme	0,89	
						UAV4i5	2.3.2020.	3.3.2020.	/	/	3,5	1,6	4,6	0,05	1,03	Formiranje berme	0,63	
						UAV5i6	3.3.2020.	10.3.2020.	/	/	3,8	2,1	5	0,05	0,79	Uzdizanje krune	0,79	
						UAV12i13	6.10.2020.	13.10.2020.	/	/	2,7	0,64	3,52	0,03	2,58	Formiranje berme	0,48	

Valni uvjeti korišteni u valnom kanalu u Hannoveru i izmjereni na plaži Ploče su umjereni, H_s iznosi između 0,6 i 3 m te T_p iznosi i do 6 sekundi, a što je u skladu su s prosječnom valnom klimom unutar otočnog pojasa istočnog Jadrana. Takvi valni uvjeti značajno su blaži od uvjeta na obali i plažama kopna, a za kakve se najčešće koristi XBG. Tamo H_s postiže iznos oko 8 m, dok T_p iznosi i do 10 s te model postiže odličan BSS za takve uvjete i procese, ali tek dobar BSS za slučaj umjerenih valnih uvjeta poput onih prisutnih na Jadranu (McCall i dr., 2015). Autori McCall i dr. (2015) ispravno su pretpostavili da se uz provedenu kalibraciju modela može postići bolje predviđanje modela za umjerene valne uvjete, a nakon kalibracije postignut je odličan BSS. Za takav rezultat provedena je kalibracija modela za umjerene uvjete u valnom kanalu u Hannoveru i za plažu Ploče na način da je variran iznos hidrauličke vodljivosti k_x i koeficijenta transporta γ dok se nije postigla odlična ocjena BSS-a. Time je postignuta odlična Brierova ocjena modela, u odnosu na ranije demonstriranu dobru ocjenu (McCall i dr., 2015).

Model je potom validiran na primjeru najsnažnijeg olujnog događaja zabilježenog tijekom mjerenja na plaži Ploče. Validacija je pokazala dobro slaganje kalibriranog modela s promjenama na profilu plaže Ploče uzrokovanim valnim događajem na kojem nije vršena kalibracija. Dobiveni rezultati ukazuju da model, u skladu s hipotezom, zaista može predvidjeti pomicanje sedimenta pod utjecajem olujnih događaja na profilu umjetne šljunčane plaže Ploče u valnim uvjetima trenutne klime. Taj zaključak će se, zajedno s koeficijentima, koristiti i za slučaj plaže Sakarun, s obzirom na nedostatak opsežnih mjerenja za potrebe kalibracije modela za navedenu plažu. Naime, u radu autora McCall i dr. (2015) demonstrirana je uspješnost modela za različite plaže s općim nizom parametara bez kalibracije. Stoga je opravdano pretpostaviti da će niz parametara za potrebe plaže Ploče bolje odgovarati plaži Sakarun nego parametri korišteni u općem slučaju.

4. *Pomak obalne linije na plažama Ploče i Sakarun*

4.1. Metodologija određivanja pomaka obalne linije na plažama Ploče i Sakarun

Ovdje će se detaljno opisati postav numeričkog modela za plaže Ploče i Sakarun koji će se koristiti za procjenu pomaka obalne linije. Opisat će se uvjeti koji će se koristiti za simulaciju na plaži Ploče - odabir profila, porasta SRM i valnih uvjeta, koeficijenta modela i ravnotežnog vremena simulacije. Dalje će se napraviti opis plaže Sakarun (plaža Ploče je već ranije detaljno opisana u poglavlju 3), a potom će se dati i detaljni pregled postava simulacije za plažu Sakarun - ponovno odabir profila, porasta SRM, valnih uvjeta te koeficijenta u modelu. Za kraj će se opisati način određivanja pomaka obalne linije na predmetnim plažama, kao i način obrade tih rezultata.

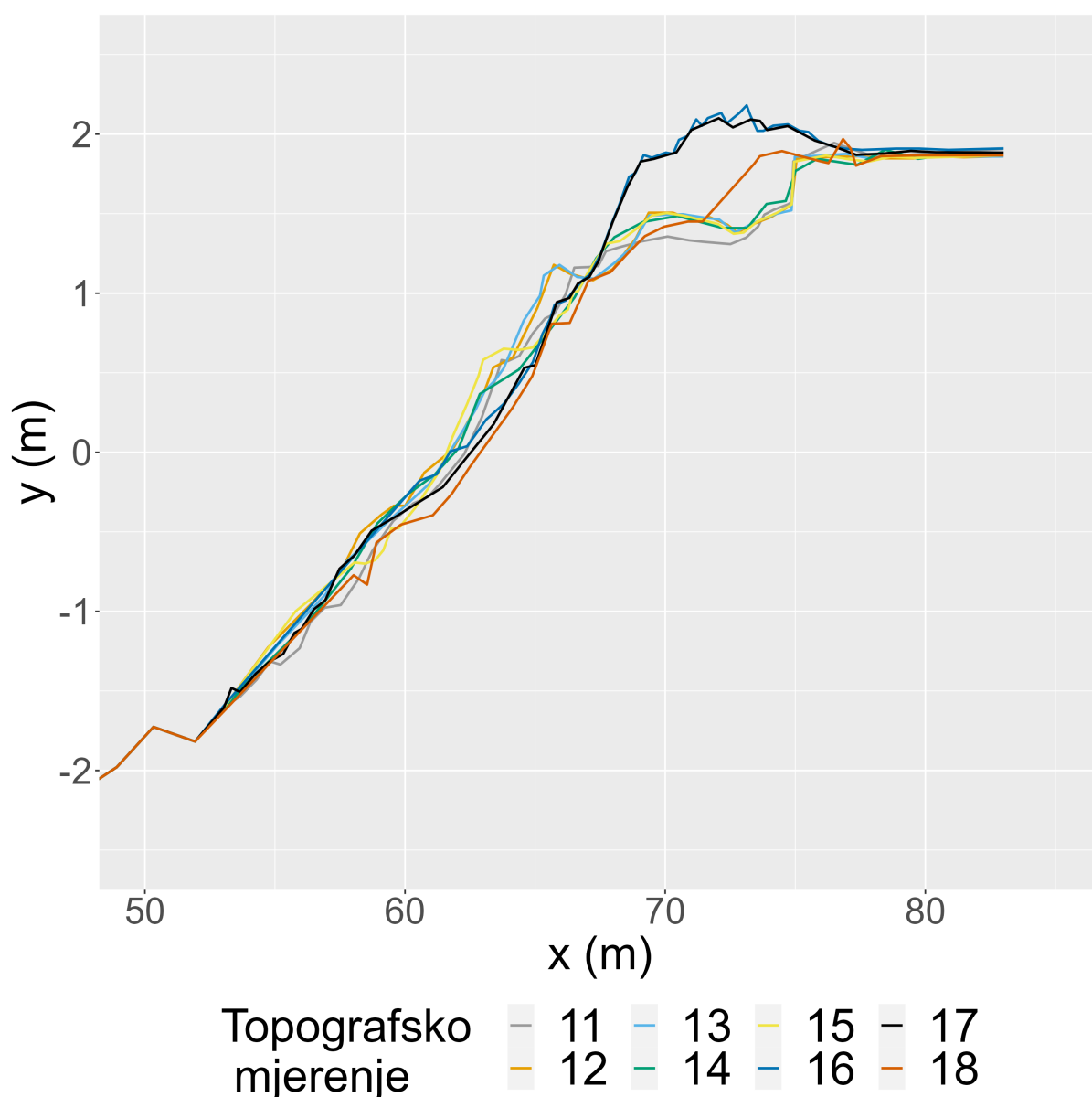
4.1.1. Postav modela XBeach-Gravel za procjenu pomaka obalne linije na plaži Ploče

Detaljan opis plaže Ploče dan je u poglavlju 3.2.4, a ovdje će se opisati isključivo postav modela XBG za potrebe procjene pomaka obalne linije uzrokovanim valnim događajima pri ekstremnim razinama mora kakve je moguće očekivati u budućnosti. Prvo je potrebno odabrati profil na kojem će se procjenjivati pomak.

Evaluacija utjecaja budućih valnih događaja na plaži Ploče provedena je na primjeru profila 1 izmjenenog topografskim mjerenjem 17 provedenim 14. prosinca 2020. godine. Taj profil predstavlja rezultat djelovanja valova koji su stvorili vrh berme na visini iznad 2 metra u odnosu na raniji vrh na približno 1,5 metar, kako je prikazano na slici 4.1. To je posljedica djelovanja valnih događaja između topografskih mjerenja 15 i 16, a kada je jedna od najvećih značajnih visina valova iznosila $H_s = 1,91$ metara. Topografsko mjerenje 16 je izostavljeno jer zbog uvjeta na moru bespilotna letjelica je uspjela izmjeriti profil tek do 30 cm dubine, a mjerenje 17 izvršeno je 4 dana nakon upravo kako bi se dobila precizna izmjera profila i do veće dubine (4.5 m). Parametri valnih događaja prikazani su u tablici 3.4. Odabirom tog početnog profila simulacije

utjecaja valnih događaja izvršene su u nastavku na valni događaj s H_s od 1,91 m, a što predstavlja uobičajeni valni događaj. Po rezultatima Lončar i dr., [2014](#) značajna valna visina od 3 metra može se očekivati s povratnim razdobljem od 5 godina, a od 2,8 s povratnim razdobljem od 2 godine.

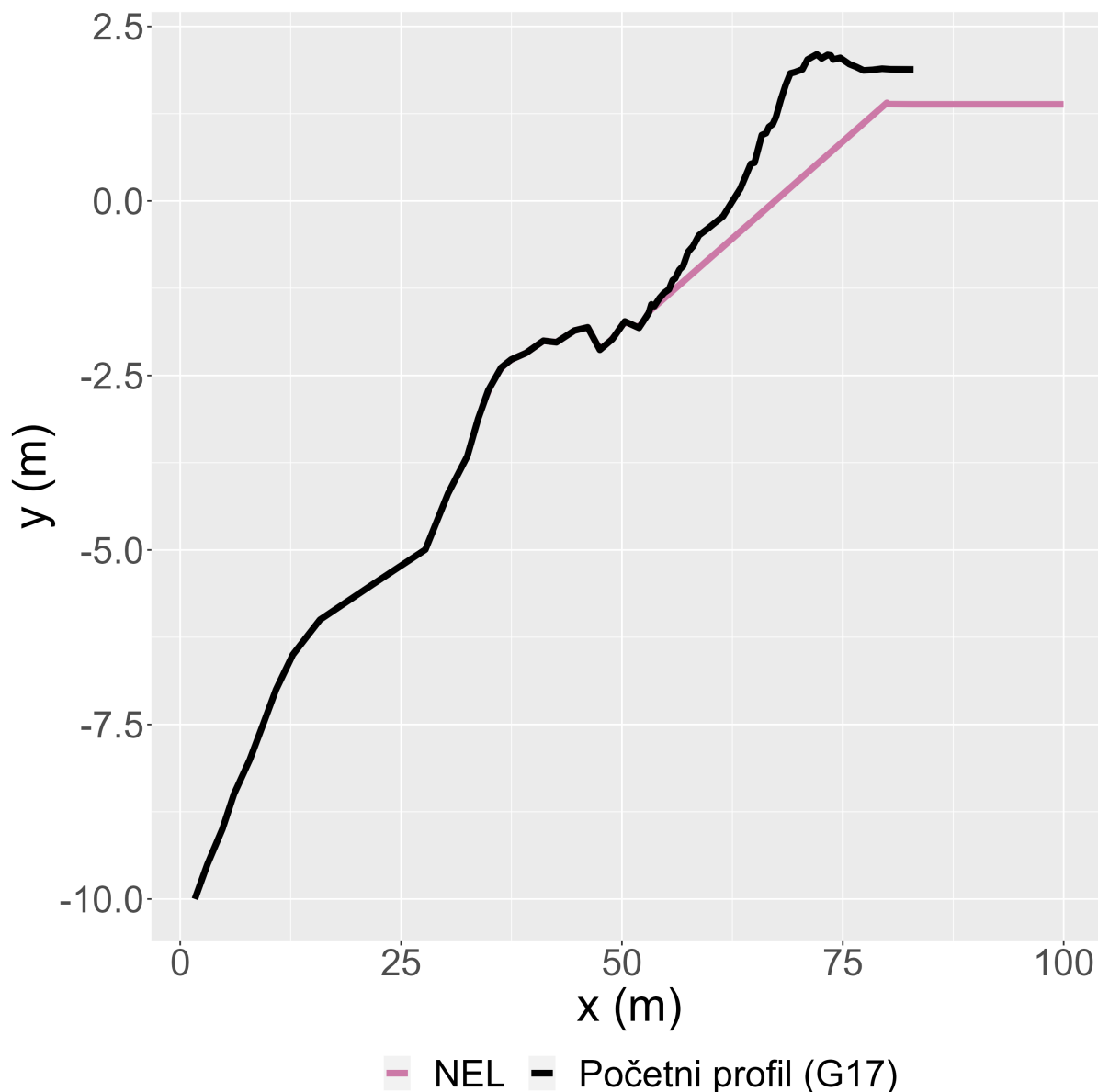
Time i rezultati simulacija odgovaraju zaista ekstremnom slučaju: na plažu preoblikovanu jednim uobičajenim valnim događajem nailazi novi, simulirani, valni događaj s povratnim razdobljem do 5 godina (H_s 3 m) u kombinaciji s ekstremnom razinom mora jednakog povratnog perioda (5 godina i 0,87 m). Takav postav modela opravdan je upravo zbog očekivanog višestrukog porasta učestalosti nastupa ekstremne razine mora (Vousdoukas i dr., [2017](#)).



Slika 4.1. Promjene na profilu 1 na plaži Ploče tijekom topografskih mjerenja 11 - 18 odnosno od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. godine

Na slici [4.1](#) vidi se su valni događaji tijekom razdoblja između topografskih mjerenja 11 i 18

većinu promjena na profilu 1 uzrokovali između -1 do 2 metra vertikalne koordinate. Drugim riječima, materijal na profilu većinski se zadržavao na plaži te ga djelovanje zabilježenih valnih događaja nije premjestilo u dublje dijelova od kuda njegov povrat na nadmorske, odnosno više dijelove plaže, ne bi mogao biti ostvaren.



Slika 4.2. Profil 1 na plaži Ploče izmjeren topografskim mjerenjem 17 i korišten pri modeliranju pomaka obalne linije na plaži Ploče, crvena linija predstavlja položaj neerodibilnog sloja sedimenta.

Korišteni profil 1 izmjeren topografskim mjerenjem 17 izdvojen je i prikazan u punoj duljini na slici 4.2 te seže do dubine od 10 metara. Iako je većina promjena na plaži Ploče u rasponu od 1 metar dubine do 2 metra visine na samom profilu, za adekvatnu simulaciju utjecaja valnih događaja na plažu potreban je profil do dubine od 10 metara. Razlog tome je uvažavanje interakcije valova koji nailaze na plažu s morskim dnom na koje ti valovi počinju djelovati. Na slici 4.2 crno je označen korišteni profil pri modeliranju, a crvenom bojom istaknut je i položaj

neerodibilnog sloja na plaži nakon kojeg počinje opći kameni nasip čija građa ne dozvoljava eroziju materijala. To je predviđeno i preuzeto iz projekta plaže prikazanim na slici 3.7. U modelu je stoga pomičan isključivo tanji sloj šljunka koji se nalazi iznad crvene linije neerodibilnog sloja. Sve ostalo je nepomično, uključujući opći kameni nasip i morsko dno na kojem je istaložen pijesak i mulj. Na kraju profila utvrđenog topografskim mjerenjem (približno od koordinate $x = 80$ m na dalje) u modelu se koristi horizontalno produljeni profil i neerodibilni sloj. U tom prostoru ne dolazi do interakcije valova s neerodibilnim slojem, već isključivo do akumulacije materijala nanesenog djelovanjem valova. Horizontalno produljenje profila odgovara idealnoj situaciji u kojoj iza plaže nema infrastrukture.

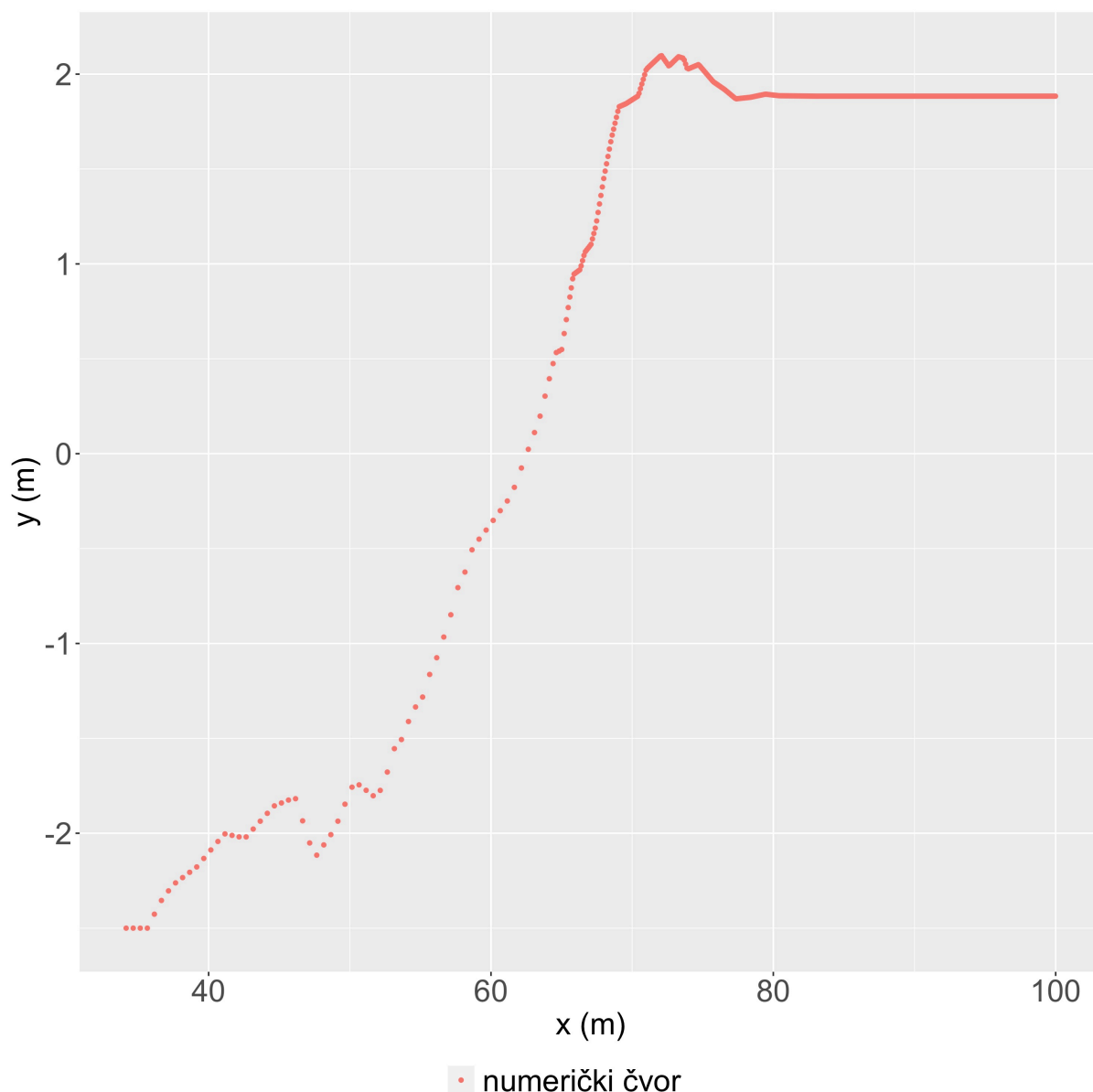
Valni uvjeti korišteni pri simulaciji promjena profila pri porastu srednje razine mora u budućnosti prikazani su u tablici 4.1, a temeljeni su na mjerenjima hidrografskom plutačom ispred grada Rijeke i opisanim u poglavlju 3.2.4. Značajne visine valova H_s korištene su u iznosu od 1, 2 i 3 metra, a prati ih i porast SRM uzrokovan djelovanjem valova, tj. WS, u iznosu od 0,25; 0,5 i 0,75 metara i određen u poglavlju 3.3.3. Strmost valova s_0 zadana je iznosima od 0,03; 0,04 i 0,05 a tim odabirom određen je i vršni period vala T_p jer su strmost, značajna visina valova i vršni period povezane veličine. Odabrani valni parametri simuliraju valne uvjete zabilježene tijekom mjerenja provedenih između listopada 2020. i siječnja 2021. godine, tj. u trenutnoj valnoj klimi. Dodatno, odabir vršnog perioda i značajne visine valova potom utječu na odabir dubine dna modela na rubu, odnosno engl. *bottom offshore depth* ili BOD, a kako je detaljno opisano u priručniku (*XBeach-G GUI User Manual* 2024).

Tako dubina dna modela na rubu mora biti najmanje dvostruko veća od zadane značajne visine valova. Time se izbjegava mogućnost međudjelovanja valova s dnom na samom rubu modela. Dalje, ostatak uvjeta na BOD određen je srednjim periodom T_m koji je izračunat kao $\frac{T_p}{1,1}$. Ovisno o iznosu T_m odabire se BOD na način da početna dubina modela mora biti dovoljna da ne dovodi do razdvajanja u fazi između cijele valne grupe i infratežinskih valova. Jednako tako, ona ne smije biti ni preduboka zbog ograničenja modela u načinu rješavanja jednadžbi u nehidrostatičkim uvjetima. Za uvažavanje tih uvjeta koristi se graf pod brojem 4.3 u priručniku (*XBeach-G GUI User Manual* 2024) te je odabrani BOD za pripadni vršni period T_p unutar zelenog područja. Odabrani BOD koji zadovoljavaju gore navedene uvjete, prikazani su u stupcu istoimenog naziva u tablici 4.1.

Za simulaciju korišten je početni profil plaže Ploče koji je predstavljen mrežom numeričkih čvorova s promjenjivim razmakom, a koji su prikazani na slici 4.3. Na najdubljim dijelovima profila, a gdje se očekuje da ne dolazi do međudjelovanja vala i dna, numerički čvorovi su razmaknuti za 0,5 metara. Model proglašuje mrežu na 0,1 m na djelu profila gdje se očekuje najveća interakcija vala i dna, približno na 0,9 m visine na profilu.

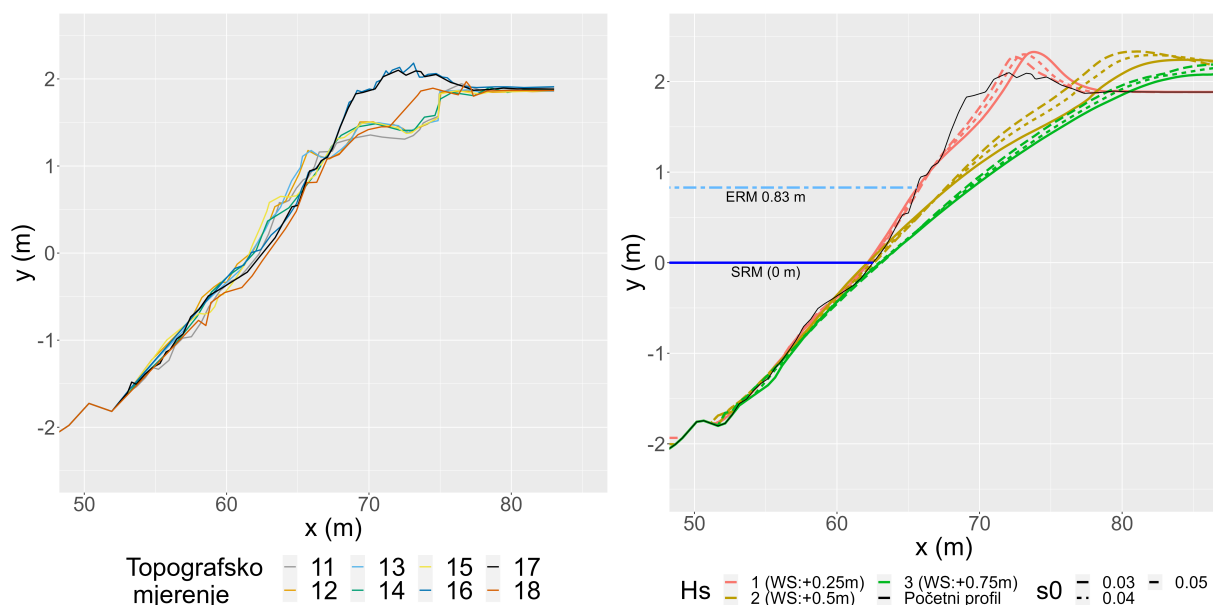
Tablica 4.1. Parametri porasta SRM, ERM, značajne visine valova H_s , wave setupa $WS(m)$, vršnog perioda T_p , strmosti vala s_0 , srednjeg perioda T_m , Iribarrenova broja $Ir(/)$ i dubine na rubnom uvjetu (BOD - engl. *bottom offshore depth*) korišteni prilikom simulacija na plaži Ploče.

Porast SRM (m)	ERM (m)	$H_s(m)$	WS (m)	$T_p(s)$	$s_0(/)$	$T_m(s)$	Ib (/)	BOD (m)
0	0,83	1	0,25	4,62	0,03	4,2	0,94	2,5
0	0,83	1	0,25	4	0,04	3,64	0,82	3
0	0,83	1	0,25	3,58	0,05	3,25	0,73	2
0	0,83	2	0,5	6,53	0,03	5,94	0,94	5
0	0,83	2	0,5	5,66	0,04	5,15	0,82	4
0	0,83	2	0,5	5,06	0,05	4,6	0,73	4
0	0,83	3	0,75	8	0,03	7,27	0,94	7
0	0,83	3	0,75	6,93	0,04	6,3	0,82	6
0	0,83	3	0,75	6,2	0,05	5,64	0,73	6
0,2	1,03	1	0,25	4,62	0,03	4,2	0,94	2,5
0,2	1,03	1	0,25	4	0,04	3,64	0,82	3
0,2	1,03	1	0,25	3,58	0,05	3,25	0,73	2
0,2	1,03	2	0,5	6,53	0,03	5,94	0,94	5
0,2	1,03	2	0,5	5,66	0,04	5,15	0,82	4
0,2	1,03	2	0,5	5,06	0,05	4,6	0,73	4
0,2	1,03	3	0,75	8	0,03	7,27	0,94	7
0,2	1,03	3	0,75	6,93	0,04	6,3	0,82	6
0,2	1,03	3	0,75	6,2	0,05	5,64	0,73	6
0,55	1,38	1	0,25	4,62	0,03	4,2	0,94	2,5
0,55	1,38	1	0,25	4	0,04	3,64	0,82	3
0,55	1,38	1	0,25	3,58	0,05	3,25	0,73	2
0,55	1,38	2	0,5	6,53	0,03	5,94	0,94	5
0,55	1,38	2	0,5	5,66	0,04	5,15	0,82	4
0,55	1,38	2	0,5	5,06	0,05	4,6	0,73	4
0,55	1,38	3	0,75	8	0,03	7,27	0,94	7
0,55	1,38	3	0,75	6,93	0,04	6,3	0,82	6
0,55	1,38	3	0,75	6,2	0,05	5,64	0,73	6
0,84	1,67	1	0,25	4,62	0,03	4,2	0,94	2,5
0,84	1,67	1	0,25	4	0,04	3,64	0,82	3
0,84	1,67	1	0,25	3,58	0,05	3,25	0,73	2
0,84	1,67	2	0,5	6,53	0,03	5,94	0,94	5
0,84	1,67	2	0,5	5,66	0,04	5,15	0,82	4
0,84	1,67	2	0,5	5,06	0,05	4,6	0,73	4
0,84	1,67	3	0,75	8	0,03	7,27	0,94	7
0,84	1,67	3	0,75	6,93	0,04	6,3	0,82	6
0,84	1,67	3	0,75	6,2	0,05	5,64	0,73	6



Slika 4.3. Položaj numeričkih čvorova na profilu plaže Ploče.

Osim valnih parametara navedenih u tablici 4.1, u svim simulacijama korišteni su iznosi slobodnih parametara koeficijenta transporta γ i hidrauličke vodljivosti k_x određeni kalibracijom za plažu Ploče u poglavlju 3 i s pripadnim iznosima od 0,25 (bez dimenzije) i 0,3 m/s (Bogovac i dr., 2023a). Na slici 4.4a prikazane su izmjerene promjene na profilu 1 plaže Ploče za razdoblje od listopada 2020. do 14. siječnja 2021. Usporedno su na slici 4.4b prikazani i rezultati promjena na profilu 1 (izmjenim topografskim mjerenjem 17) uzrokovani valnim događajima navedenim u tablici 4.1 pri ekstremnoj razini mora od 0,83 metra, odnosno u trenutnoj klimi. Za plažu Ploče preuzeta je ekstremna razina mora u iznosu od 0,83 m od mareografske postaje Bakar. ERM u Bakru određena je *peak over threshold* metodom iz Copernicus seta podataka, a za povratno razdoblje od pet godina u radu Lončar i dr. (2022). Modelirani valovi sa značajnom visinom valova od $H_s = 1$ metar na slici 4.4b uzrokuju promjene na profilu na visinama od -2

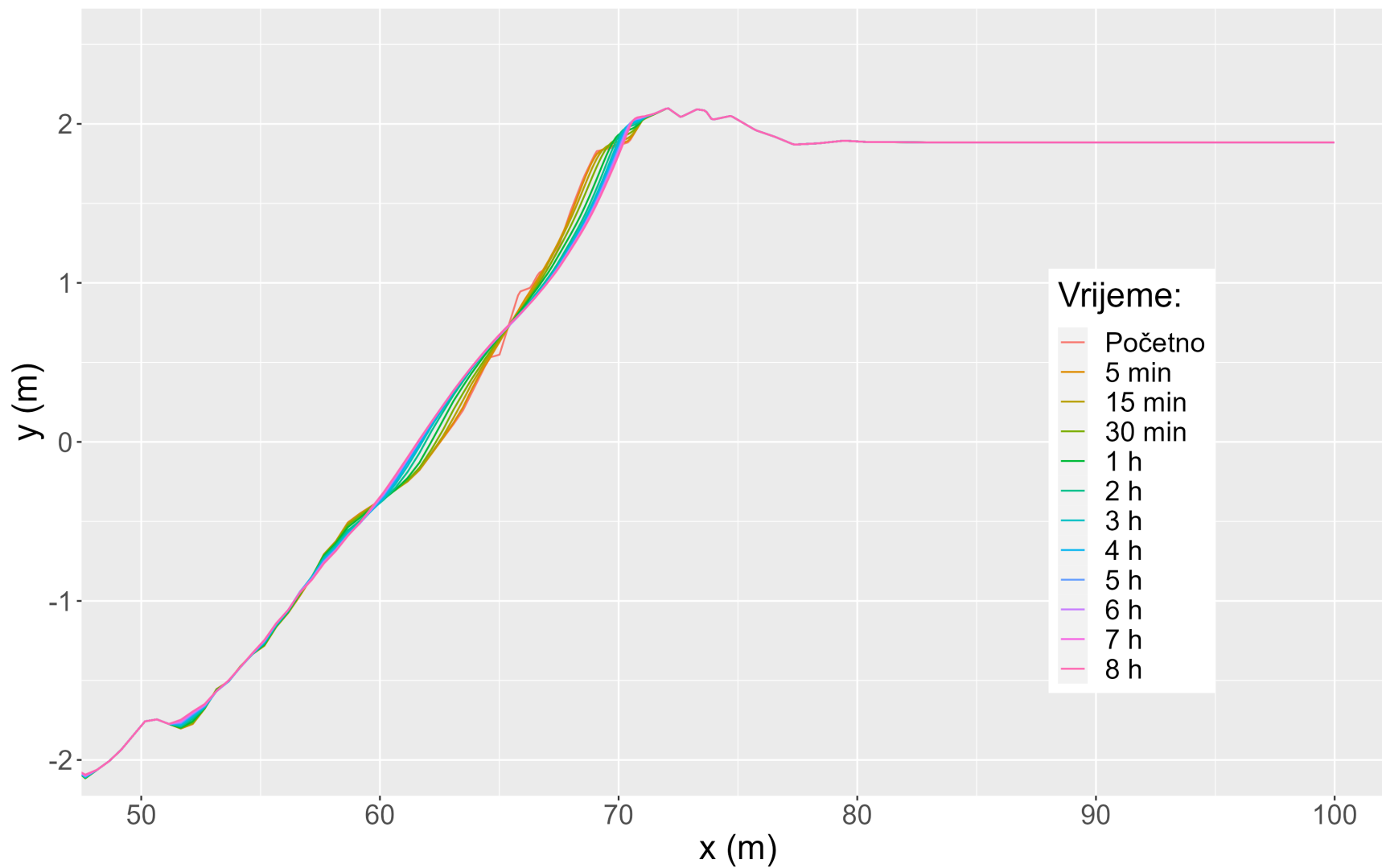


(a) Izmjerene promjene na profilu 1 plaže Ploče (b) Modelirane promjene na profilu 1 plaže Ploče

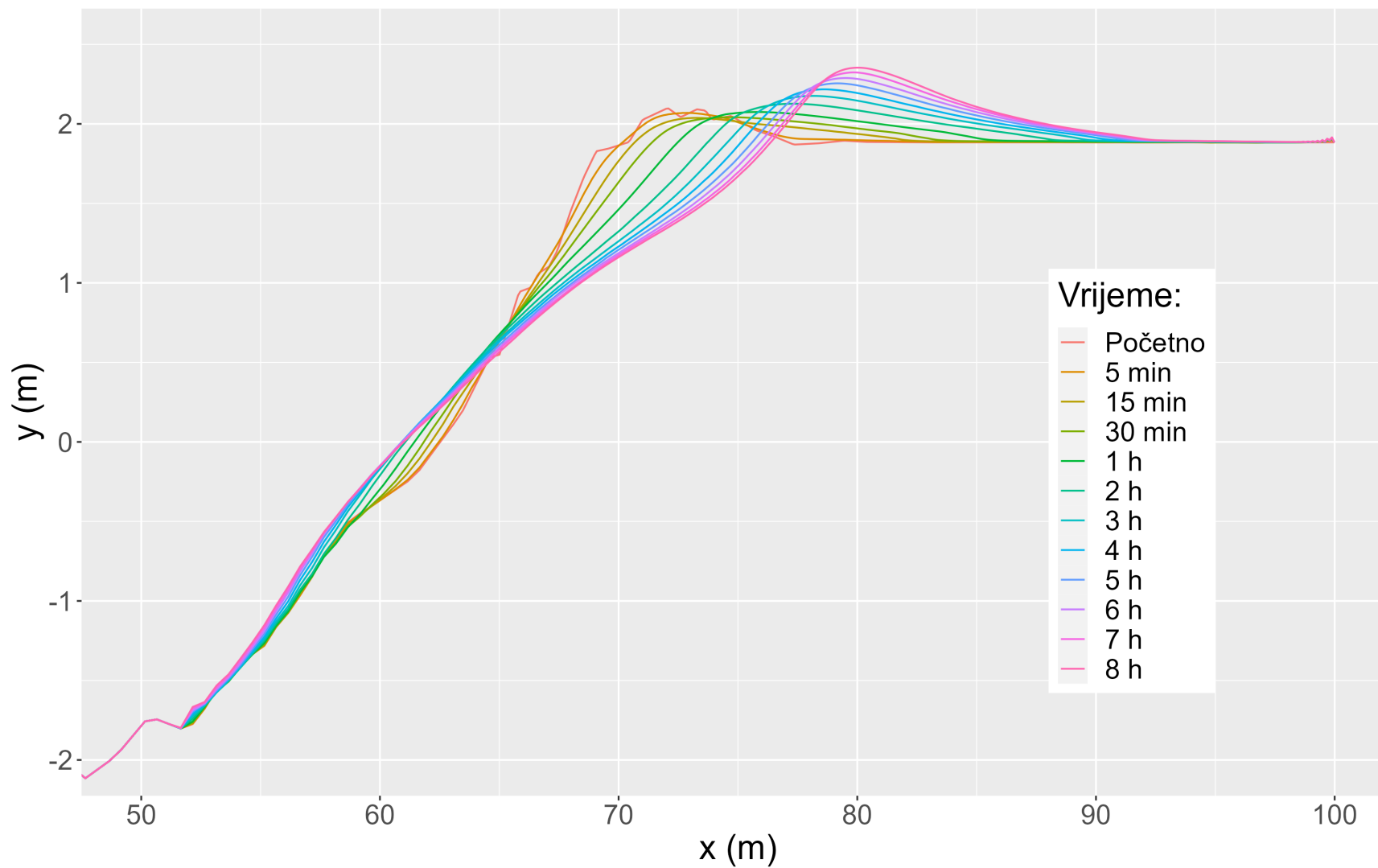
Slika 4.4. Pregled promjena profila 1 na plaži Ploče tijekom 4.4a mjerenja u razdoblju od 1. listopada 2020. do 14. siječnja 2021. i 4.4b modeliranja valnih događaja uz trenutnu ERM bez porasta SRM.

do 1 metar, što približno odgovara promjenama koje su izmjerene na plaži Ploče na slici 4.4a. Značajne valne visine od 2 i 3 metra pri porastu razine mora od 0,83 metra erodiraju središnji dio profila te većinu erodiranog materijala preraspodjeljuju na sam vrh plaže, a dio na dubine do 2 metra, međutim takvi događaji nisu zabilježeni u mjerenjima.

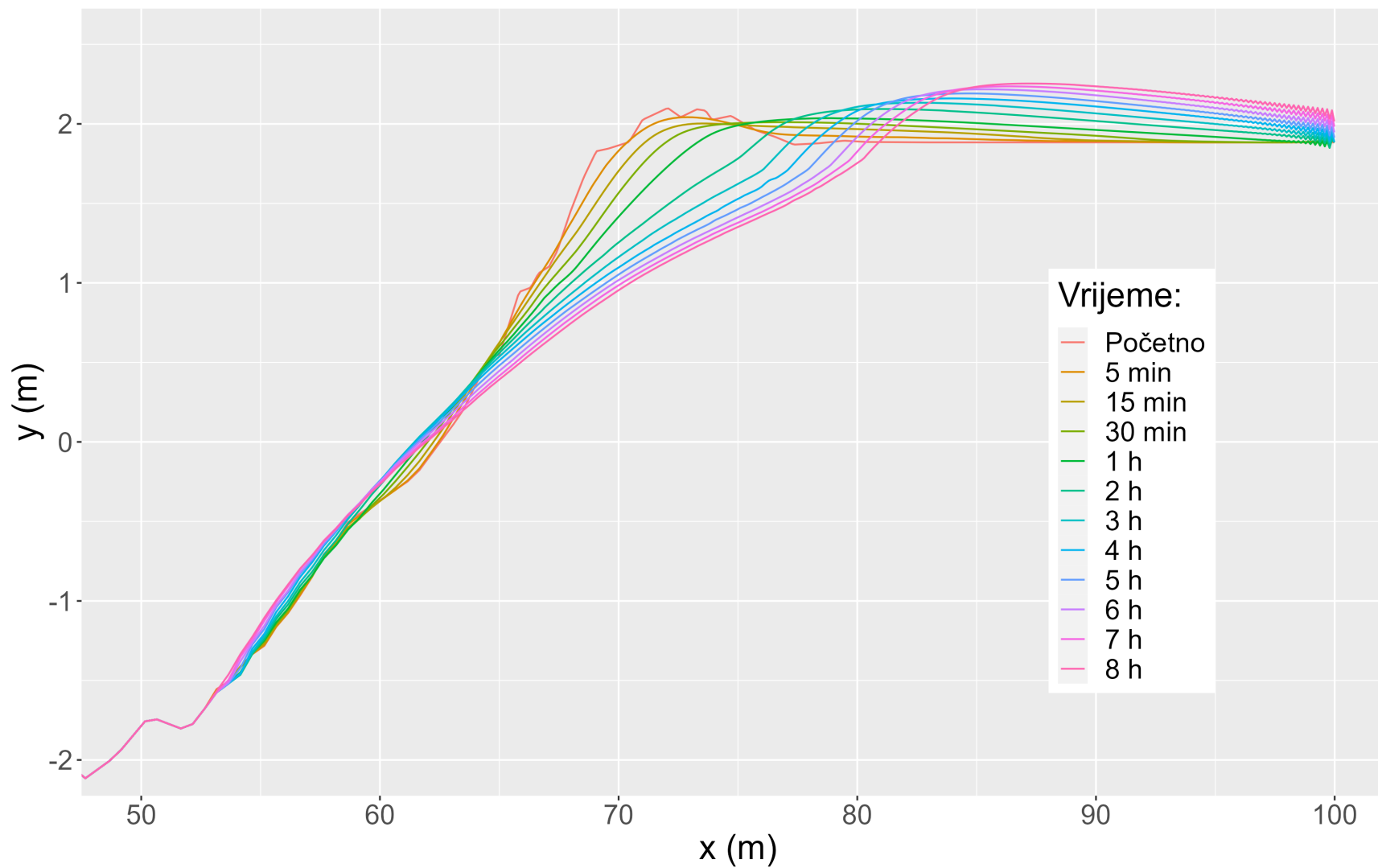
Jedini događaj koji bi bio usporediv sa značajnom visinom valova od 2 metra i ekstremnom razinom mora od 0,83 metra je prethodno analizirani događaj G17_G18_K3 (prikazan na slici 3.14 u poglavlju 3.3.3) kada je zabilježena značajna visina valova u iznosu oko 2,28 metra pri visini razine mora od 0,75 metara, ali bez WS-a (jer je razina mora mjerena u Bakru, a ne na plaži). Značajne visine valova iznad 2 metra mogu se očekivati u prosjeku nekoliko puta godišnje, 2,8 metara ima povratno razdoblje od 2 godine, a H_s od 3 m može se očekivati s povratnim razdobljem od 5 godina (Lončar i dr., 2014). Nastupanje ekstremne razine mora od 0,83 metra je rijetko s obzirom da ono isto ima prosječno povratno razdoblje oko 5 godina za područje Bakra (Lončar i dr., 2022). Ipak, jasno je da takvi valni uvjeti zaista mogu nastupiti na plaži Ploče kao ekstremi u višegodišnjem razdoblju upravo zbog zabilježenog događaja G17_G18_K3, stoga su zanimljivi za daljnje promatranje. A porastom srednje razine mora za očekivati je da će ekstremne razine mora nastupati češće uz jednake valne uvjete kakvi se bilježe i danas.



Slika 4.5. Promjene na profilu 1 plaže Ploče određenom topografskim mjerenjem 17 prikazane prvih 5, 15 i 30 minuta te potom svakih sat vremena tijekom djelovanja valova značajne visine valova H_s od 1 metar i vršnog perioda T_p od 4,62 sekunde pri ekstremnoj razini mora, a u svrhu određivanja ekvilibrijskog vremena.



Slika 4.6. Promjene na profilu 1 plaže Ploče određenom topografskim mjerenjem 17 prikazane prvih 5, 15, 30 i svakih sat vremena tijekom djelovanja valova značajne visine valova H_s od 2 metra i vršnog perioda T_p od 6,53 sekunde pri ekstremnoj razini mora, a u svrhu određivanja ekvilibrijskog vremena.



Slika 4.7. Promjene na profilu 1 plaže Ploče određenom topografskim mjerenjem 17 prikazane prvih 5, 15 i 30 minuta te potom svakih sat vremena tijekom djelovanja valova značajne visine valova H_s od 3 metra i vršnog perioda T_p od 8 sekunde pri ekstremnoj razini mora, a u svrhu određivanja ekvilibrijskog vremena.

Rezultati na slici 4.4b dobiveni su nakon 8 sati trajanja simulacije s fiksnim valnim uvjetima. Trajanje simulacija u iznosu od 8 sati odabrano je stoga što omogućuje postizanje ravnotežnog profila. Ravnotežni profil ostvaruje se kada za zadane valne uvjete promjene na profilu postanu zanemarive, a vrijeme od početka valnih uvjeta do ostvarivanja ravnotežnog profila naziva se ravnotežno vrijeme (engl. *equilibrium time*). Za potrebe određivanja ravnotežnog vremena za slučaj plaže Ploče korištene su simulacije s valnim uvjetima opisanim u tablici 4.1. Neki od rezultata tih simulacija prikazani su na slikama 4.5, 4.6 i 4.7 na kojima se vidi položaj profila plaže Ploče na početku i zatim nakon 5, 15 i 30 minuta te potom nakon 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 sati zadanih valnih uvjeta.

Promjene profila pri djelovanju vala značajne visine valova od 1 metar slabije su nego u slučaju 2 i 3 metra pa je pri višim značajnim visinama valova lakše razlučiti nastupanje ravnotežnog profila. Linije koje predstavljaju profil od 3. sata nadalje izrazito su zgusnute. Stoga ravnotežni profil nastupa približno oko 3 sata od početka simulacije. Nakon 3 sata simulacije, promjene tijekom svakog idućeg sata simulacije značajno su manje nego promjene koje nastupaju tijekom jednog od prva 3 sata simulacije, a na to upućuje i gustoća linija koje predstavljaju profil. Iz tog razloga odabir vremena simulacije u iznosu od 8 sati predstavlja dovoljno vremena da profil postigne ravnotežno stanje uzrokovano zadanim valnim uvjetima.

4.1.2. Opis plaže Sakarun i postav modela XBeach-Gravel za procjenu pomaka obalne linije

Položaj plaže Sakarun prikazan je na slici 4.8, a plaža se nalazi na sjeverozapadnom dijelu Dugog otoka, između naselja Veli Rat i Soline. Sakarun je prirodna, 300 metara duga plaža koja je prvenstveno građena od šljunka, a njen je uzak dio u prostoru niskog supratajdala i intertadjala prekriven pijeskom. Porijeklo ovog pijeska u potpunosti je morsko, a njegovo nakupljanje u istoimenoj uvali posljedica je direktnoj izloženosti uvale i plaže otvorenom moru i valovima. Istim mehanizmom dio pijeska taloži se iznad i u intertadjalu plaže te se smatra da je njegov dugoročni opstanak na plaži uvjetovan naslagama ostatka morske cvjetnice *Posidonia Oceanica*, čije su naslage, tzv. banketi, jedna od glavnih karakteristika ove plaže. Smanjenje količine, odnosno erozija pjeskovite frakcije s plaže, uočeno je tijekom posljednjih desetak godina, a pretpostavlja se da je povezano s uklanjanjem banketa morske trave tijekom proljetne pripreme plaže za turističku sezonu.

Upravo zbog prisutnost pijeska i njegove atraktivnosti za posjetitelje, plaža i uvala Sakarun čine jedinstvenu i poznatu turističku destinaciju na Jadranu. Šljunak je kao primarni materijal nastao direktnom mehaničkom erozijom prirodne karbonatne podloge kredne starosti i to na onim mjestima na kojima valovi dolaze u kontakt s osnovnom stijenom. Jednom odlomljeni fragmenti stijene daljnjim radom valova postaju sve zaobljeniji te se s vremenom ustinjavaju.



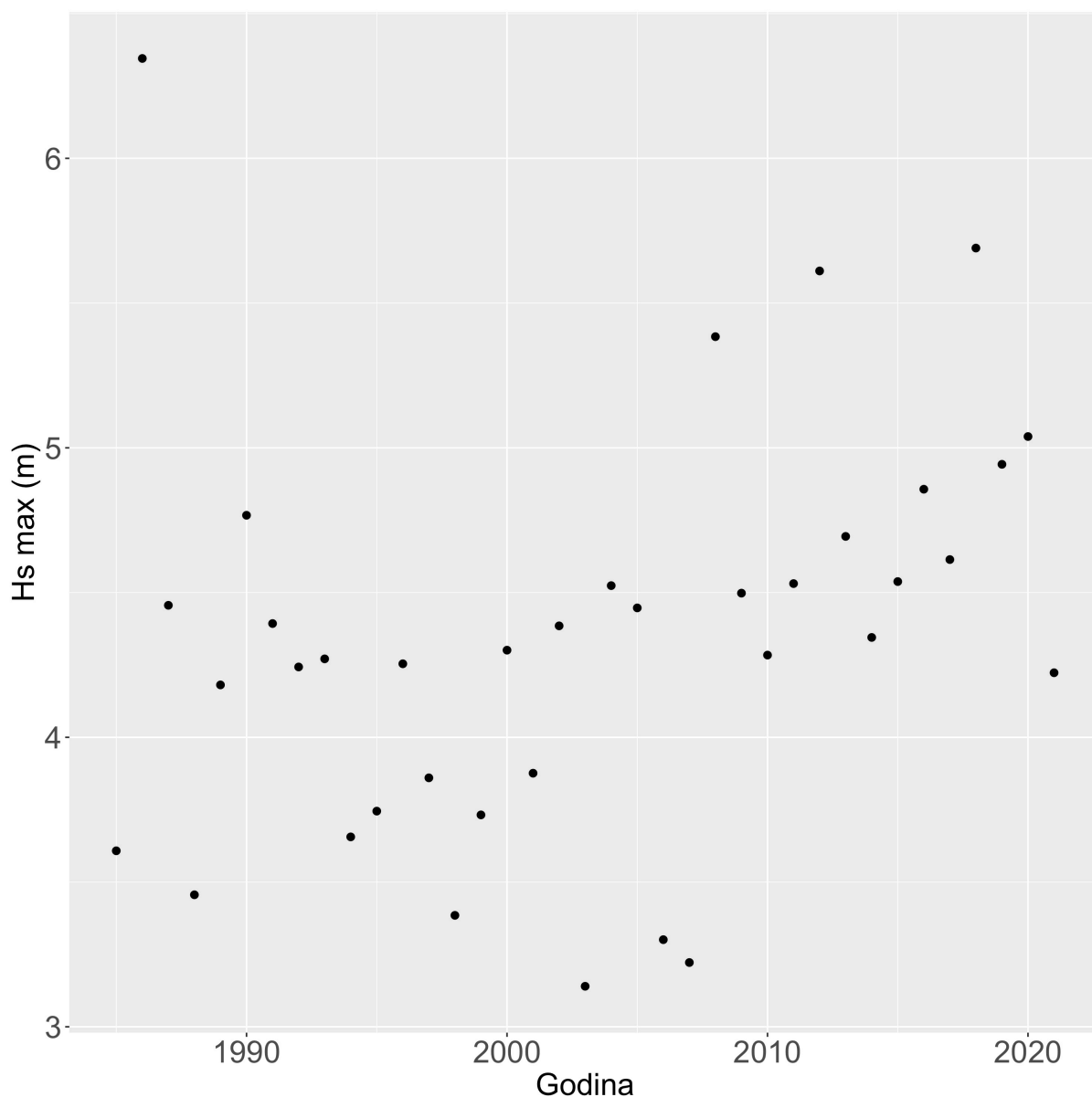
Slika 4.8. Položaj plaže Sakarun u Jadranskom moru i na Dugom otoku (umetnuta karta)

Granulometrijski sastav obje frakcije dobiven je na različite načine. Šljunak je analiziran metodom obrade slike nakon uzastopnog slikanja sedimenta u okviru 50 x 50 cm. Slike su potom obrađene *ImageJ* programom za analizu slika pri čemu je dobivena prosječna veličina zrna od 5,4 cm. Pijesak je analiziran mokrim sijanjem te je prosječna veličina zrna pijeska 0,2 mm (Pikelj i dr., 2022b).

Plaža i uvala su uvučene u obalu otoka i orijentirane prema jugoistoku, što predstavlja i jedini relevantni smjer za valove, slika 4.8. Izračunom efektivnog privjetrišta, koristeći se ranijom metodom preuzetom iz *Shore protection manuala* (Coastal Engineering Research Center (US), 1984) u poglavlju 3 glavi V i softwareskim paketom *waver* (Marchand i dr., 2023), određeno je da vjetar iz smjera jugoistoka može stvarati valove na duljini od 106,5 kilometara, a što je duljina 5 puta veća od privjetrišta za plažu Ploče. Efektivno privjetrište iznosilo bi i više da nije zapadne obale Dugog otoka, a potom i otoka Visa, Biševa i Svetog Andrije koji dodatno ograničavaju privjetrište.

Valni uvjeti na plaži Sakarun nisu mjereni, već su određeni na temelju podataka satnih dubokovodnih uvjeta preuzetih s portala *Copernicus Marine Service* i za razdoblje od 1985. do 2021. godine (Korres i dr., 2021) i rezultat su prognoze *Mediterranean Sea Wave* modela - MedWAV. Preuzete valne visine dobivene iz modela ne odgovaraju u potpunosti stvarnim vrijednostima, već pokazuju podcjenjivanje slabijih valnih visina s boljim slaganjem rezultata za više valove i zimsku sezonu (Zacharioudaki i dr., 2024). Podatci su preuzeti za koordinatu 14.88 ° E i 43.93

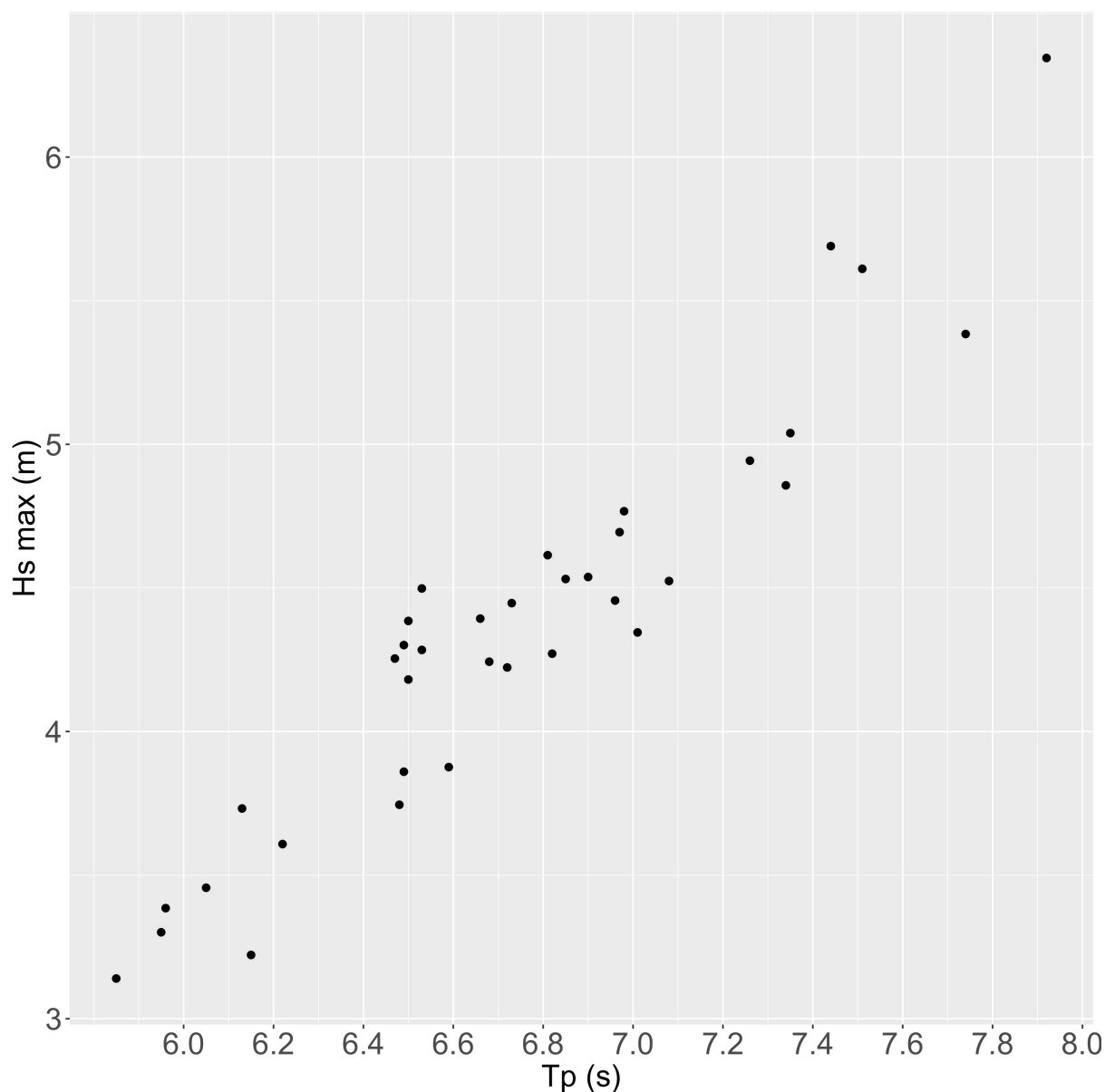
° N. U tom nizu podataka godišnji maksimumi značajne visine valova H_s iz smjera juga (135° - 180°) na slici 4.9 iznosili su između 3,14 i 6,4 m, dok je pripadni vršni period T_p tih ekstrema na slici 4.10 iznosio između 6 i 8 sekundi.



Slika 4.9. Godišnji maksimum H_s uzrokovani jugom pred Sakarunom s pripadnim T_p za razdoblje od 1985. do 2021.

Povratni periodi izračunati programskim paketom (Gilleland i dr., 2016) i funkcijom *fevd* koristeći se metodom *maximum likelihood estimation* za 37 osmotrenih godišnjih maksimuma i prikazani su u tablici 4.2. Temeljem tih rezultata odabran je H_s u iznosu od 5 m s pripadnim povratnim razdobljem od 5 godina, kao i slabiji H_s od 4 m za promatranje pomaka obalne linije plaže Sakarun pri porastu srednje razine mora.

Takav rezultat u skladu je i s očekivanim brzinama vjetra od preko $20 \frac{m}{s}$ nad privjetrištem duljine 106,5 kilometara za plažu Sakarun. Temeljem Gröen and Dorrestein nomograma brzine



Slika 4.10. Maksimalni iznosi H_s pred Sakarunom s pripadnim T_p za razdoblje od 1985. do 2021.

Tablica 4.2. Značajne valne visine ispred Sakaruna s pripadnim povratnim razdobljima.

Povratno razdoblje (god.)	2	5	10	20	50	100
H_s (m)	4.3	4.9	5.3	5.6	6	6.2

i trajanja vjetra s duljinom privjetrišta (Groen i dr., 1976; Bouws i dr., 1998), za očekivati je da prema Sakarunu nailaze dubokovodni valovi značajne visine valova i do 5 metara. To dodatno opravdava odabir navedenih značajnih valnih visina.

4.1.3. Izmjereni i modelirani valni uvjeti na plaži Sakarun korišteni za predviđanje pomaka obalne linije

Od listopada 2020. do lipnja 2021. godine izvršeno je 9 mjesečnih topografskih mjerenja na potezu od 7 profila na plaži Sakarun, a položaj profila prikazan je na slici 4.11 gdje su različiti profili označeni različitom bojom. Profili su izmjereni GPS uređajem metodom preciznog pozicioniranja VRS RTK s korekcijom CROPOS VPPS servisa te je točnost mjerenja iznosila 2 cm horizontalno i 4 cm vertikalno (Pikelj i dr., 2022b). Koraci mjerenja ovisili su o jednoličnosti nagiba plaže i učestalosti promjena morfologije plaže, odnosno uzorkovanje profila odrađeno je na svakoj značajnijoj i primjetnoj promjeni visine plaže. Duljina mjerenog profila mijenjala se svakim terenskim izlaskom u ovisnosti o oscilacijama morske razine, ali i intenzitetu valnih uvjeta. U prosjeku, profiliranje je izvršeno do dubine od 1,2 metra.

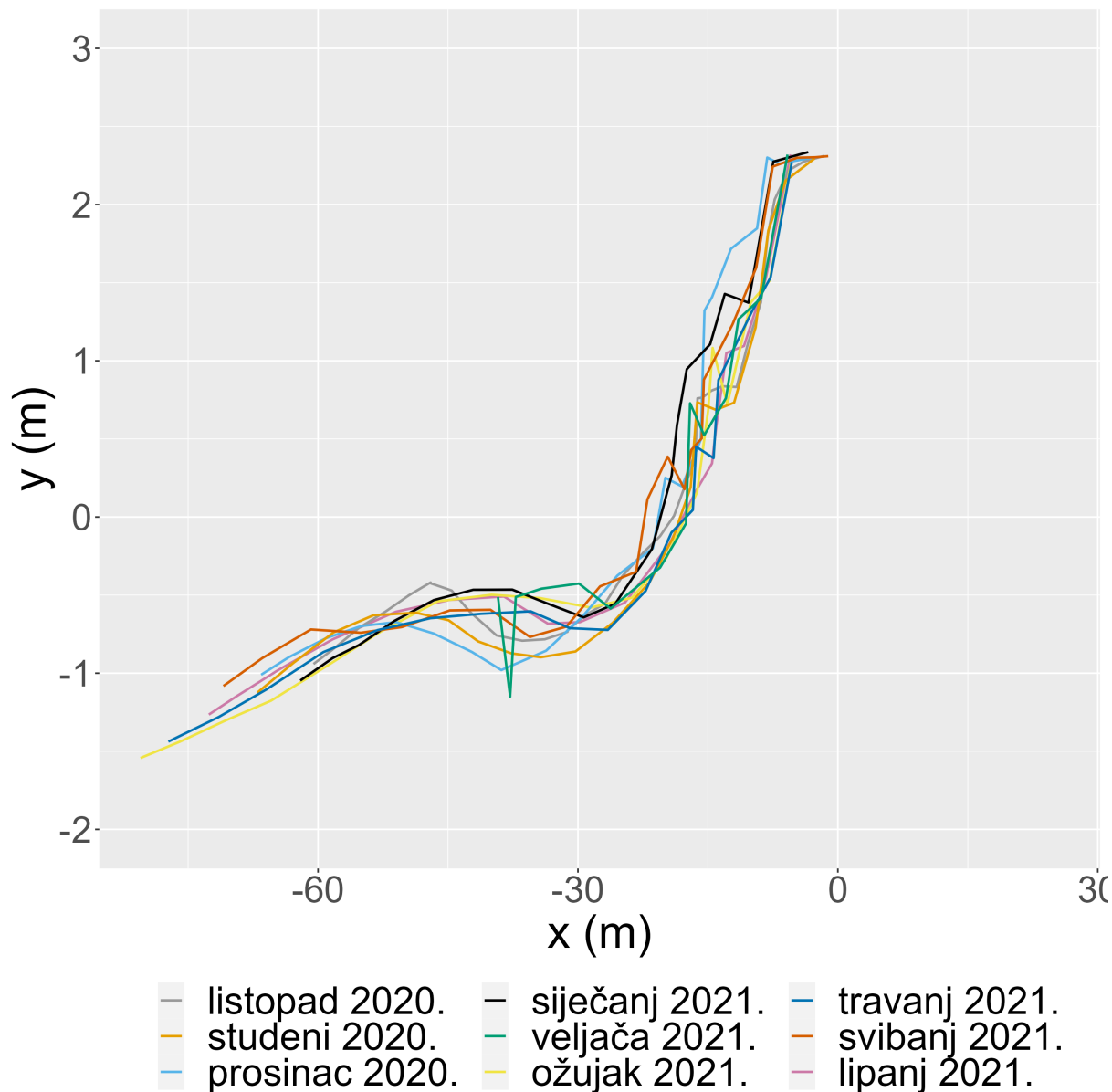


Slika 4.11. Topografska mjerenja 7 profila (svaki u različitoj boji) na plaži Sakarun od listopada 2020. do lipnja 2021.

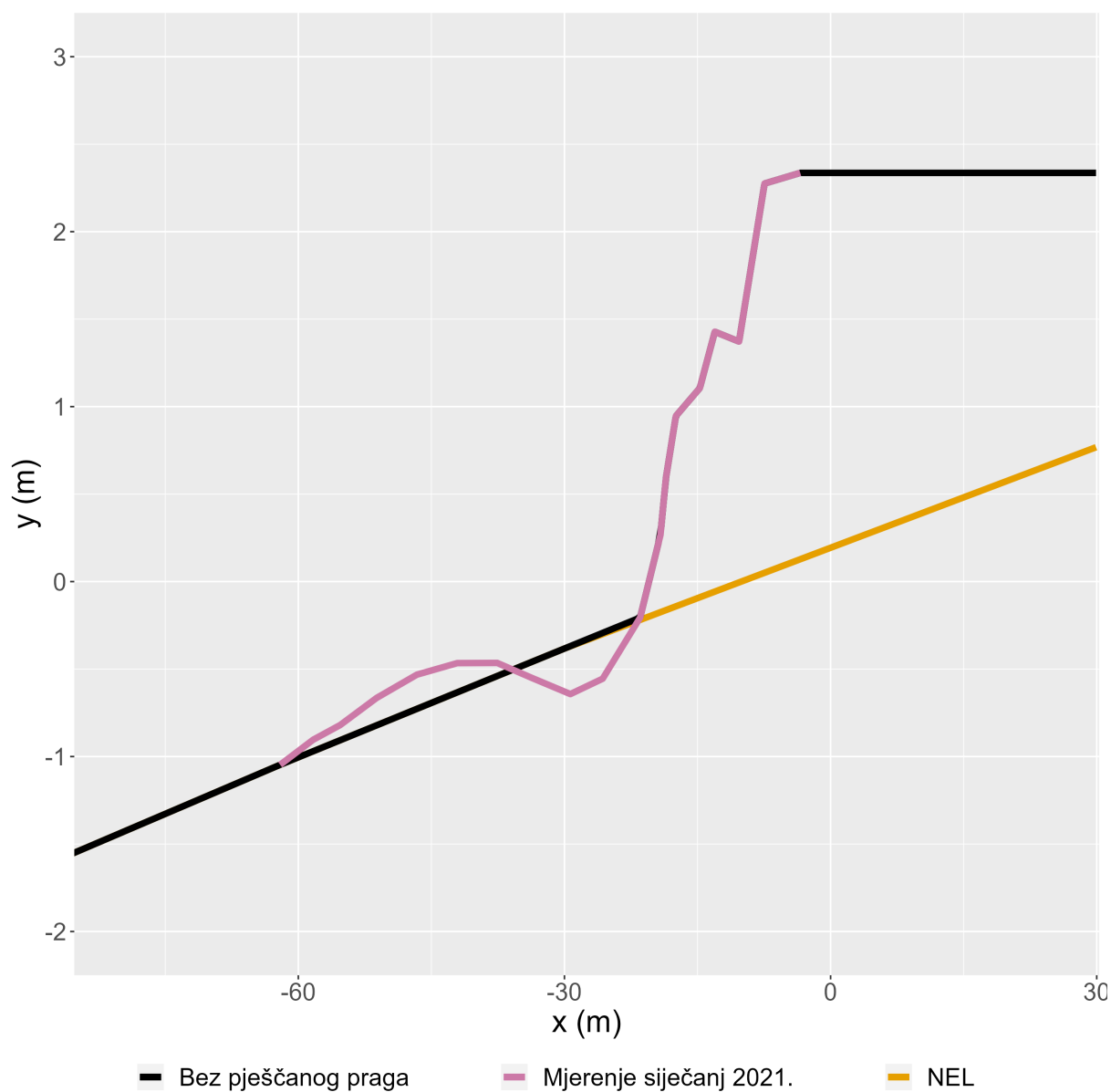
Od izmjerenih profila korišten je 5. profil s lijeva, na slici 4.11 prikazan žutim točkama. Taj profil je centralno mjesto na plaži te je zbog toga odabran kao reprezentativan. Promjene na profilu 5 učestale su duž cijelog profila, kao što je prikazano na slici 4.12. Za potrebe simulacije izmjereni profil iz siječnja 2021. korišten je do 0,25 m dubine, dok je dublje korišten jednoliki nagib, a čime se zanemaruje utjecaj pijeska i uklanjanje pješčani sprud te se plaža tretira kao pojednostavljena šljunčana plaža s medijanom granulacije šljunka od 5 centimetara. Pojednostavljeni profil prikazan je na slici 4.13.

Za simulaciju korišten je početni profil plaže Sakarun koji je predstavljen mrežom numeri-

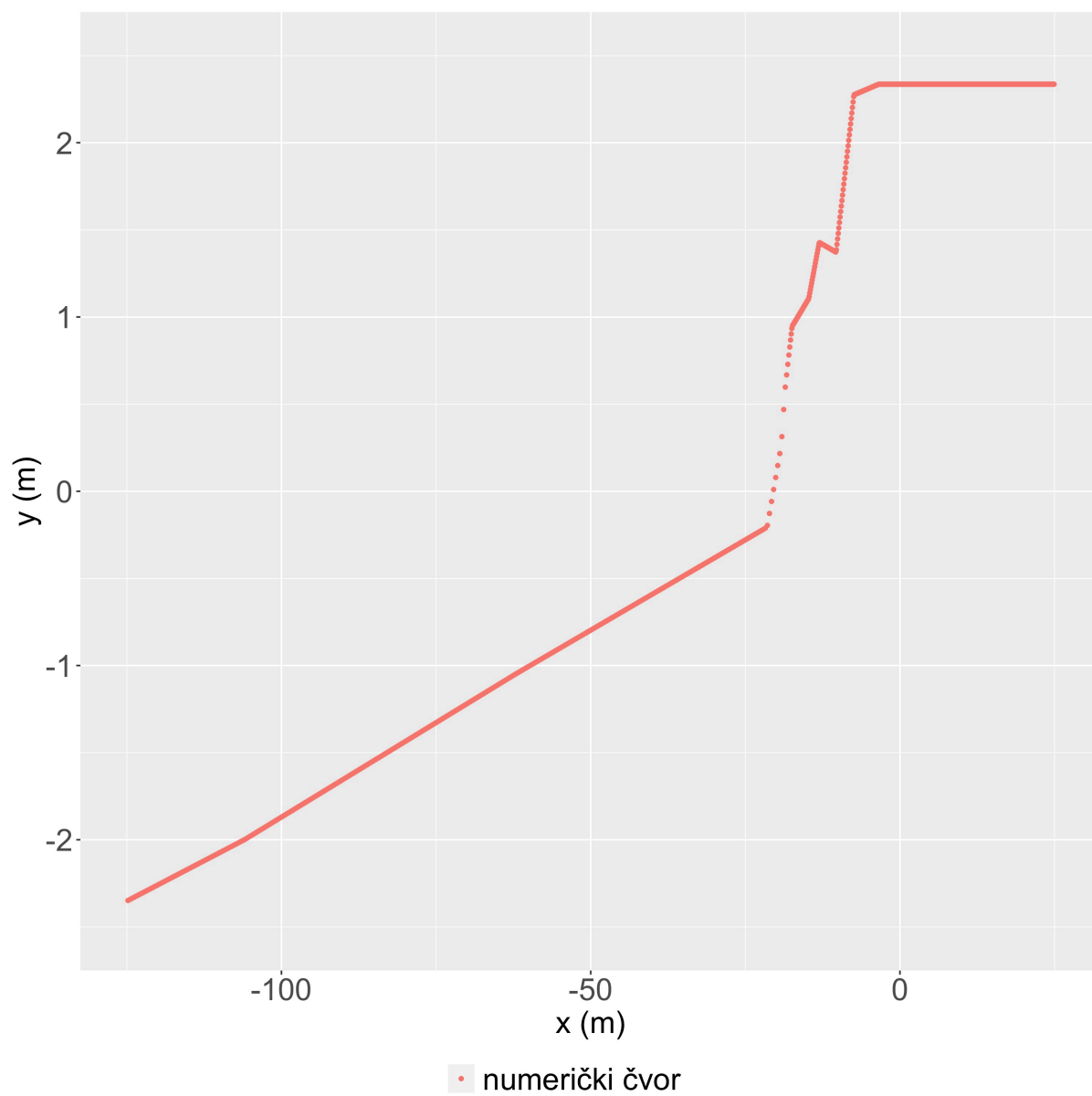
kih čvorova s promjenjivim razmakom, a koji su prikazani na slici 4.14. Na najdubljim dijelovima profila, a gdje se očekuje da ne dolazi do međudjelovanja vala i dna, numerički čvorovi su razmaknuti za 0,33 metara. Model proglašuje mrežu na 0,1 m na djelu profila gdje se očekuje najveća interakcija vala i dna, približno na 0,9 m visine na profilu.



Slika 4.12. Promjene na profilu 5 na plaži Sakarun tijekom 9 mjesečnih topografskih mjerenja.

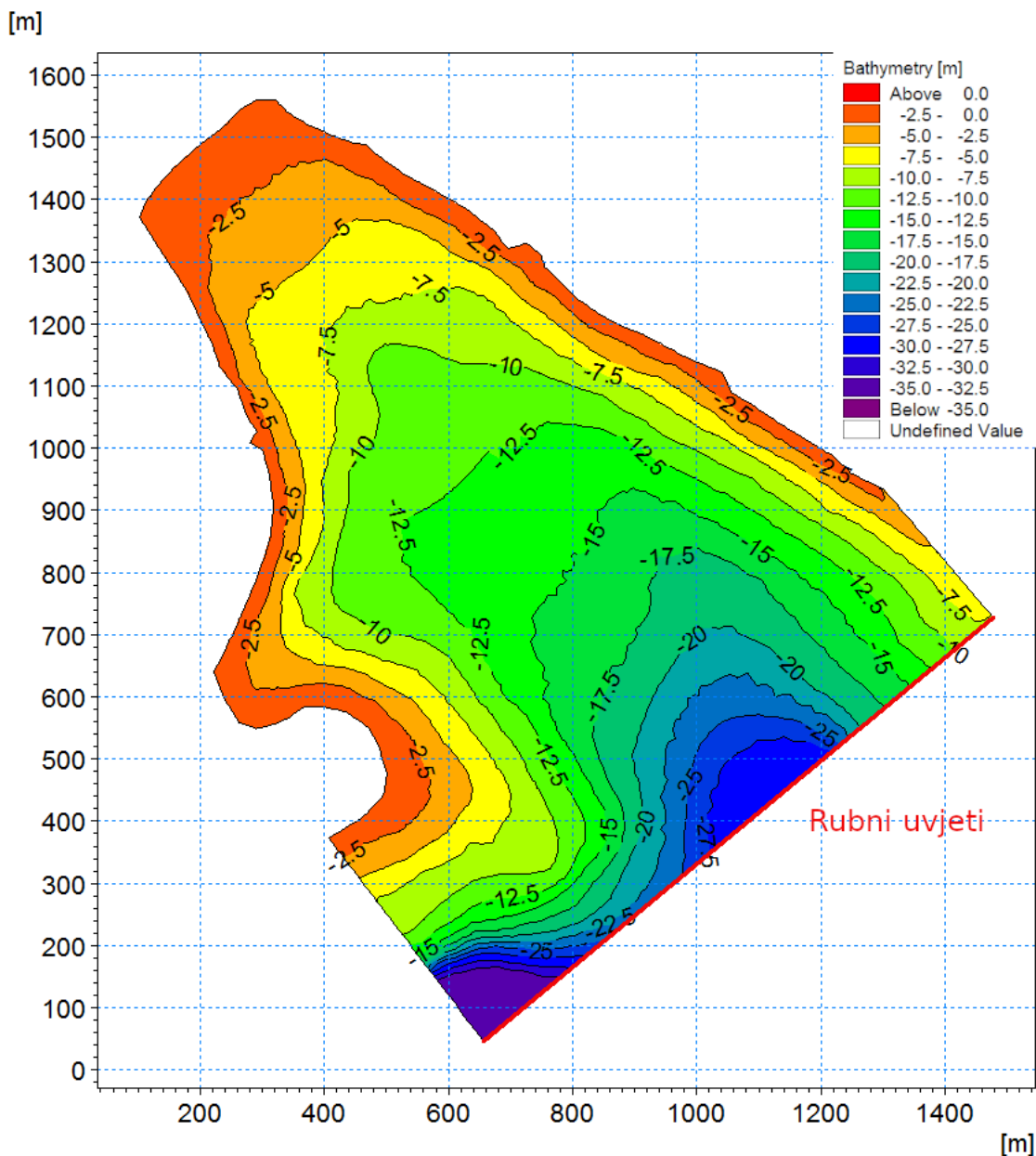


Slika 4.13. Profil 5 na Sakarunu za siječanj 2021. s uklonjenim pješčanim sprudom - umjesto toga korišten je jednoliki nagib morskog dna. Žutom je označen neerodibilni sloj korišten u simulaciji.



Slika 4.14. Položaj numeričkih čvorova na profilu plaže Sakarun.

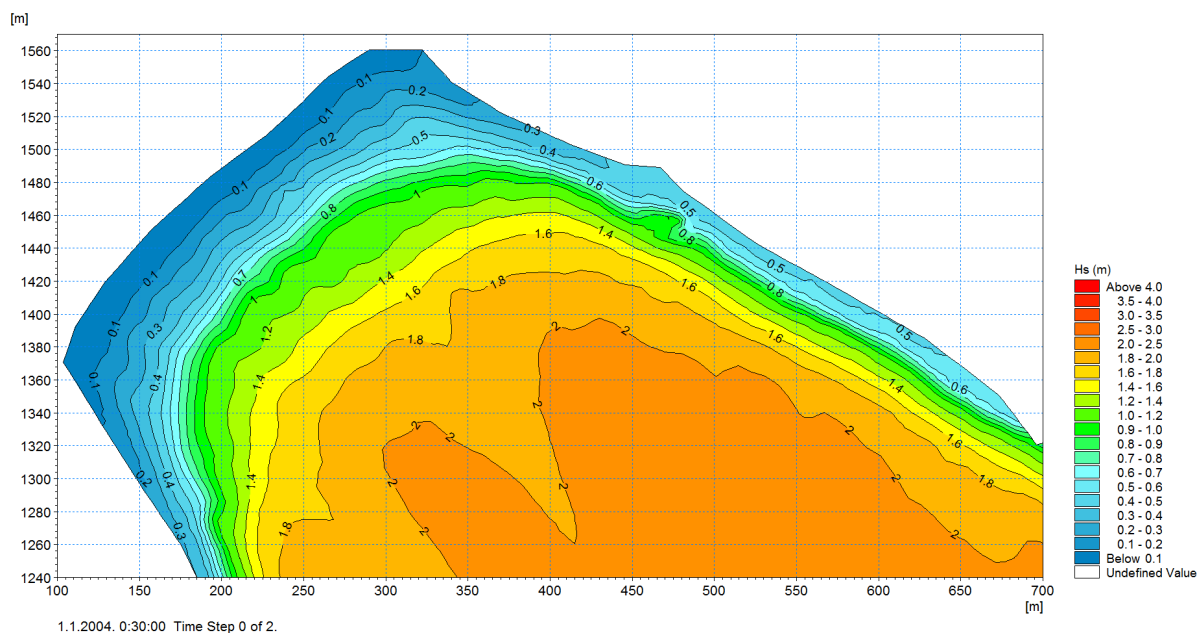
Prije odabira valnih uvjeta napravljena je analiza valnog polja spektralnim numeričkim modelom Mike 21/SW za akvatorij ispred plaže Sakarun u duljini od 1200 metara. Batimetrija morskog dna za ovu analizu preuzeta je s javno dostupnog servisa Navionics, a prikazana je na slici 4.15. Time je određena deformacija dubokovodnih valova zadanih na rubnom uvjetu (koordinate 1200,500 tj. približno na 1400 metara udaljenosti od plaže) u iznosu od H_s od 4 i 5 metara i strmosti s_0 od 0,02; 0,03 i 0,04, a koji se deformiraju približavajući se plaži (koordinate 200,1500).



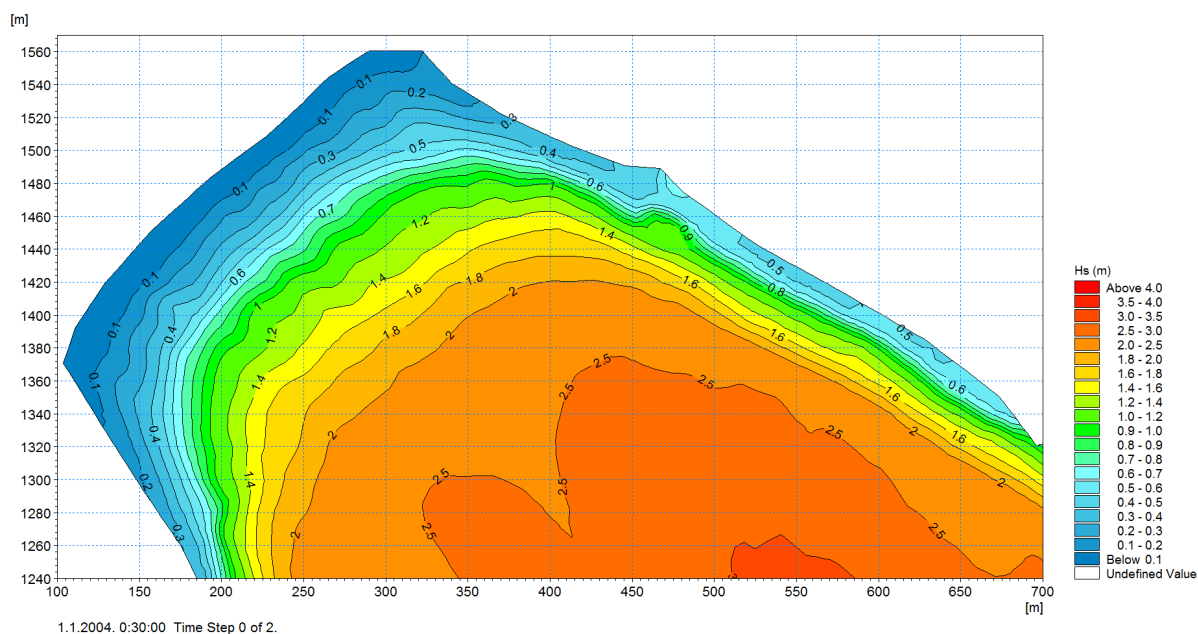
Slika 4.15. Pregled batimetrije akvatorija ispred plaže Ploče s podacima preuzetima sa servisa Navionics

Rezultati valnih deformacija dobivenih modelom Mike prikazani su na slikama 4.16 i 4.17 za slučaj valnih uvjeta sa značajnom visinom valova H_s od 4 i 5 metara i strmošću valova s_0

4. Pomak obalne linije na plažama Ploče i Sakarun



Slika 4.16. Prikaz deformacija značajne visine valova kroz akvatorij neposredno ispred plaže Sakarun za značajnu visinu valova od 4 metra i za strmost od 0,03 na rubnom uvjetu (rubni uvjet se nalazi izvan obuhvata) - rezultat modeliranja Mike 21/SW modelom



Slika 4.17. Prikaz deformacija značajne visine valova kroz akvatorij neposredno ispred plaže Sakarun za značajnu visinu valova od 5 metara i za strmost od 0,03 na rubnom uvjetu (rubni uvjet se nalazi izvan obuhvata)- rezultat modeliranja Mike 21/SW modelom

od 0,03 na rubnom uvjetu koji se nalazi izvan slika 4.16 i 4.17 na koordinatama (500, 1200). U oba slučaja na približno 225 do 250 metara od plaže Sakarun (koordinate oko 380, 1360) valovi se deformiraju i značajna visina valova im se smanjuje za pola te iznosi 2 odnosno 2,5 metra. Zahvaljujući takvoj deformaciji valova, plaža Sakarun, iako ima veliko privjetrište, izložena je blažim valnim uvjetima koji joj omogućuju opstanak na poziciji izloženoj valovima s većeg dijela jadranskog bazena. Posljedično, za valove u modelu XBeach-Gravel odabrane su vrijednosti od 1, 2 i 3 m značajne visine valova s pripadnim strmostima od 0,02; 0,03 i 0,04. Refrakcija valova primjetna je u cijeloj domeni, a na izdvojenom dijelu domene na slikama 4.16 i 4.17 uz izobatu od -10 metara - tu se npr. valovi značajne valne visine od 2 i 2,5 metra zakreću ka rubu uvale s dva kraka (lijevi nije prikazan), a centralni dio valne fronte nastavlja dalje ka Sakarunu. Međutim, i centralni dio fronte potom slabi kako se dalje približava obali.

Kako bi XBeach-Gravel adekvatno prikazao takve valove u modelu, posebna pažnja posvećuje se odabiru dubine morskog dna na rubnom uvjetu modela, tj. parametru *bottom offshore depth*. Koristeći se grafom 4.3 u dokumentaciji XBeach-Gravel modela (*XBeach-G GUI User Manual* 2024), dubina modela na rubnom uvjetu odabrana je u ovisnosti o značajnoj visini valova i vršnom periodu vala. Dubina na rubnom uvjetu mora uvijek biti dvostruko veća od najveće zadane značajne visine valova, a dodatno odnos dubine mora na rubu modela i srednjeg perioda dubokomorskih valova (određenim kao omjer $\frac{T_p}{1,1}$) treba biti u zelenom rasponu danom na grafu 4.3 iz dokumentacije modela (*XBeach-G GUI User Manual* 2024). Takvim odabirom početne dubine osigurano je da model zaista može generirati zadane valne uvjete. Dubina modela na rubnom uvjetu određena je za svaku kombinaciju parametara značajne visine valova i vršnog perioda korištenog pri simulacijama temeljem ovog postupka, a korištene vrijednosti navedene su u tablici 4.3. U tablici su preuzete današnje vrijednosti za ekstremnu razinu mora za najbližu mareografsku postaju u Zadru (30-tak kilometara od plaže Sakarun), a u iznosu od 0,67 m za povratno razdoblje od pet godina. ERM utvrđena je *peak over threshold* metodom iz Copernicus seta podataka u radu Lončar i dr., 2022. Ostali parametri numeričkog modela navedeni su u dodatku B te se koriste jednake vrijednosti slobodnih parametara koeficijenta transporta (γ) i hidrauličke vodljivosti (k_x) kao i za slučaj plaže Ploče (Bogovac i dr., 2023a). U idealnom slučaju bilo bi potrebno izvršiti jednaku kalibraciju modela kakva je provedena za plažu Ploče. Međutim, za plažu Sakarun podatci dubokovodnih valnih parametara nisu bili dostupni (za Ploče su isti izmjereni hidrografskom plutačom) te je vizualno ocijenjena uspješnost numeričkog modela za simulaciju plaže Sakarun s kalibracijskim parametrima korištenima za plažu Ploče.

Odabrane dubine rubnog uvjeta u modelu nalaze se u rasponu od 4 do 20 metara. Na dubinama od 4 metra na koordinatama (400,1300) na slikama 4.16 i 4.17 dubokovodni valovi H_s od 4 i 5 m deformacijama su svedeni na valne visine do 2,5 metra. Time se opravdava odabir značajnih visina valova u rasponu od 1 do 3 metra na plaži Ploče - veće valne visine od toga deformiraju se unutar uvale i kao takve ne dopiru do plaže.

Međutim, iako se dubokovodnim valovima deformacijom smanjuje značajna visina valova, njihov vršni period ostaje nepromijenjen. Posljedica toga je situacija da valovi koji dopiru do

plaže Sakarun imaju i manju strmost u odnosu na dubokovodne valove od kojih nastaju. Zbog toga se u simulacijama koriste strmosti valova u iznosu i od 0,01.

Tablica 4.3. Parametri porasta srednje razine mora (m), ekstremne razine mora (m), značajne visine valova H_s , vršnog perioda T_p , strmosti valova s_0 , srednjeg perioda T_m , Iribarrenova broja $Ir(/)$ i dubine na rubnom uvjetu (BOD - engl. *bottom offshore depth*) korišteni prilikom simulacija na plaži Sakarun.

Porast SRM (m)	ERM (m)	$H_s(m)$	$T_p(s)$	$s_0(/)$	$T_m(s)$	$Ir(/)$	BOD (m)
0	0,67	1	5,56	0,02	5,05	1,01	4
0	0,67	1	4,55	0,03	4,13	0,83	4
0	0,67	1	4	0,04	3,64	0,73	4
0	0,67	2	11,11	0,01	10,1	1,43	15
0	0,67	2	8,33	0,02	7,58	1,07	6,5
0	0,67	2	6,67	0,03	6,06	0,86	6
0	0,67	2	5,56	0,04	5,05	0,71	5
0	0,67	3	14,29	0,01	12,99	1,5	20
0	0,67	3	10	0,02	9,09	1,05	10
0	0,67	3	8,33	0,03	7,58	0,87	8
0	0,67	3	7,14	0,04	6,49	0,75	6
0,2	0,87	1	5,56	0,02	5,05	1,01	4
0,2	0,87	1	4,55	0,03	4,13	0,83	4
0,2	0,87	1	4	0,04	3,64	0,73	4
0,2	0,87	2	11,11	0,01	10,1	1,43	15
0,2	0,87	2	8,33	0,02	7,58	1,07	6,5
0,2	0,87	2	6,67	0,03	6,06	0,86	6
0,2	0,87	2	5,56	0,04	5,05	0,71	5
0,2	0,87	3	14,29	0,01	12,99	1,5	20
0,2	0,87	3	10	0,02	9,09	1,05	10
0,2	0,87	3	8,33	0,03	7,58	0,87	8
0,2	0,87	3	7,14	0,04	6,49	0,75	8
0,55	1,22	1	5,56	0,02	5,05	1,01	4
0,55	1,22	1	4,55	0,03	4,13	0,83	4
0,55	1,22	1	4	0,04	3,64	0,73	4
0,55	1,22	2	11,11	0,01	10,1	1,43	15
0,55	1,22	2	8,33	0,02	7,58	1,07	6,5
0,55	1,22	2	6,67	0,03	6,06	0,86	6
0,55	1,22	2	5,56	0,04	5,05	0,71	5
0,55	1,22	3	14,29	0,01	12,99	1,5	20
0,55	1,22	3	10	0,02	9,09	1,05	10
0,55	1,22	3	8,33	0,03	7,58	0,87	8
0,55	1,22	3	7,14	0,04	6,49	0,75	6

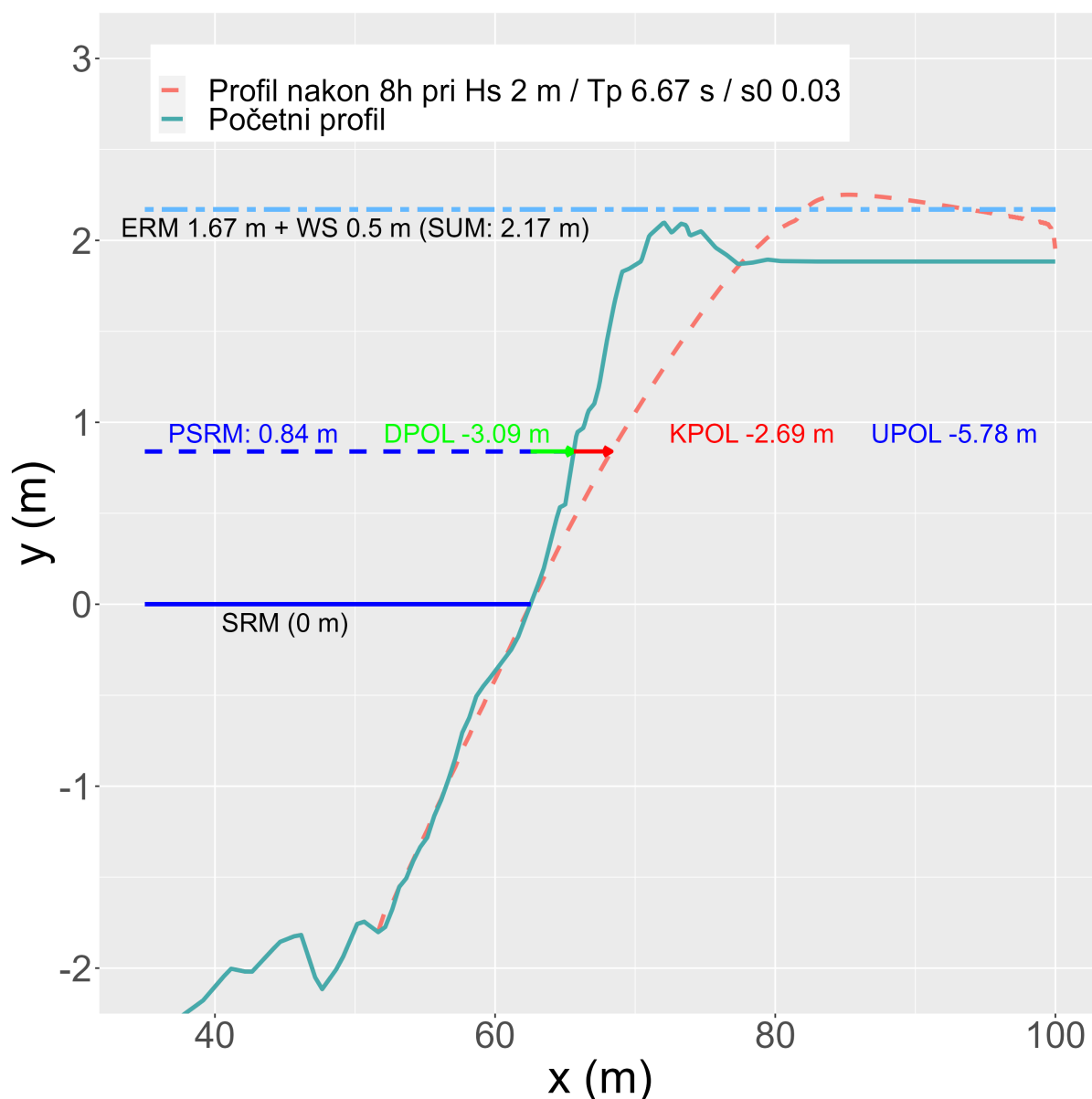
0,84	1,51	1	5,56	0,02	5,05	1,01	4
0,84	1,51	1	4,55	0,03	4,13	0,83	4
0,84	1,51	1	4	0,04	3,64	0,73	4
0,84	1,51	2	11,11	0,01	10,1	1,43	15
0,84	1,51	2	8,33	0,02	7,58	1,07	6,5
0,84	1,51	2	6,67	0,03	6,06	0,86	6
0,84	1,51	2	5,56	0,04	5,05	0,71	5
0,84	1,51	3	14,29	0,01	12,99	1,5	20
0,84	1,51	3	10	0,02	9,09	1,05	10
0,84	1,51	3	8,33	0,03	7,58	0,87	8
0,84	1,51	3	7,14	0,04	6,49	0,75	6

4.1.4. O određivanju dugoročnog, kratkoročnog i ukupnog pomaka obalne linije

Nakon provedenih simulacija valnih događaja na plažama Ploče i Sakarun pri budućim srednjim razinama mora bilo je potrebno odrediti kako se pomaknula obalna linija. Obalna linija na jednodimenzionalnom profilu plaže određena je položajem na kojoj srednja razina mora dotiče profil, a isto i u slučaju porasta srednje razine mora. Ovakav pojednostavljeni pristup korišten je zbog ograničenja na jednodimenzionalni model koji razlučuje isključivo transport sedimenta poprečno obali. Tada zajedno s činjenicom da se promatraju džepne šljunčane plaže dužine oko 200 m, odabir jednog profila dovoljan je da ukaže na promjene koje se mogu očekivati na cijeloj plaži i njenoj obalnoj liniji.

Odabir smjera u ovoj analizi napravljen je na način da je pomak obalne linije usmjeren ka kopnu označen negativno, a prema moru pozitivno. Odnosno, ukoliko je nastupila akumulacijom materijala na srednjoj razini mora, pomak obalne linije utvrđen je kao pozitivan jer time je i povećana širina plaže. Obratno, erozijom materijala plaže sa srednje razine mora, širina plaže se sužava i nastupa negativan pomak obalne linije.

Također je napravljena distinkcija na dugoročni pomak obalne linije i kratkoročni pomak, te njihov zbroj u obliku ukupnog pomaka. Naime, nastupanjem porasta srednje razine mora nastupa pomak obalne linije ka kopnu jer dio profila biva trajno potopljen. Stoga se u analizi taj dio pomaka posebno izdvojio od kratkoročnog pomaka obalne linije koji nastupa zbog djelovanja jednog valnog događaja. Valni događaji učestala su pojava na plaži te svaki događaj preraspodjeljuje sediment plaže i iznova mijenja njezin profil. Kratkoročni pomak obalne linije stoga je svojstven svakom pojedinačnom valnom događaju te je iz tog razloga promatrana simulacija niza valnih događaja na profil plaže. Zbrajajući ta dva pomaka određuje se ukupni pomak obalne linije kakav će nastupiti na plaži zbog porasta srednje razine mora i nastupanja valnog događaja pri toj novoj srednjoj razini mora. Na primjeru plaže Sakarun, kako bi se odredio dugoročni iznos pomaka obalne linije na plaži, promatrana je udaljenost između točke u kojoj



Slika 4.18. Prikaz pomaka obalne linije za slučaj simulacije s H_s od 2 metra, ERM od 1,67 metara, porast SRM od 0,84 metra, strmosti od 0,03 i T_p od 6,53 sekunde.

početni profil siječe srednju razinu mora bez porasta i s porastom SRM. Na slici [4.18](#) to je označeno zelenom strelicom: kao početna točka strelice korištena je točka u kojoj se križaju srednja razina mora (bez porasta) i početni profil plaže, tj. profil 1 izmjeren topografskim mjerenjem 17 (G17 izmjereno 14. prosinca 2021.), dok je kraj strelice označen na točki u kojoj se siječe razina mora nastupila zbog porasta srednje razine mora (u iznosu od 0,2; 0,55 i 0,84 metra, u ovom slučaju 0,84 metra) i početni profil plaže (ponovno G17). Udaljenost između tih točaka, odnosno duljina strelice, predstavlja dugoročni pomak obalne linije plaže označen s "DPOL" i ostvaren isključivo zbog porasta srednje razine mora, a on iznosi 0 u slučaju kada nema porasta srednje razine mora. Kratkoročni pomak obalne linije, nastao zbog deformacije profila plaže uslijed valnog događaja tijekom ekstremne razine mora, označen je crvenom strelicom i teks-

tkom "KPOL". To je udaljenost od točke u kojoj se siječe početni profil sa srednjom razinom mora uvećanom za porast SRM pa do točke u kojoj se ta ista porasla srednja razina mora siječe s konačnim profilom nakon olujnog djelovanja. Kratkoročni pomak obalne linije tako opisuje pomak ostvaren zahvaljujući djelovanju valnih uvjeta na plažu, a iznosi 0 samo ukoliko nije došlo do promjene na profilu u razini (trenutne ili buduće) srednje razine mora. Ukupni pomak utvrđen je zbrojem dugoročnog i kratkoročnog pomaka i označen je s "DPOL".

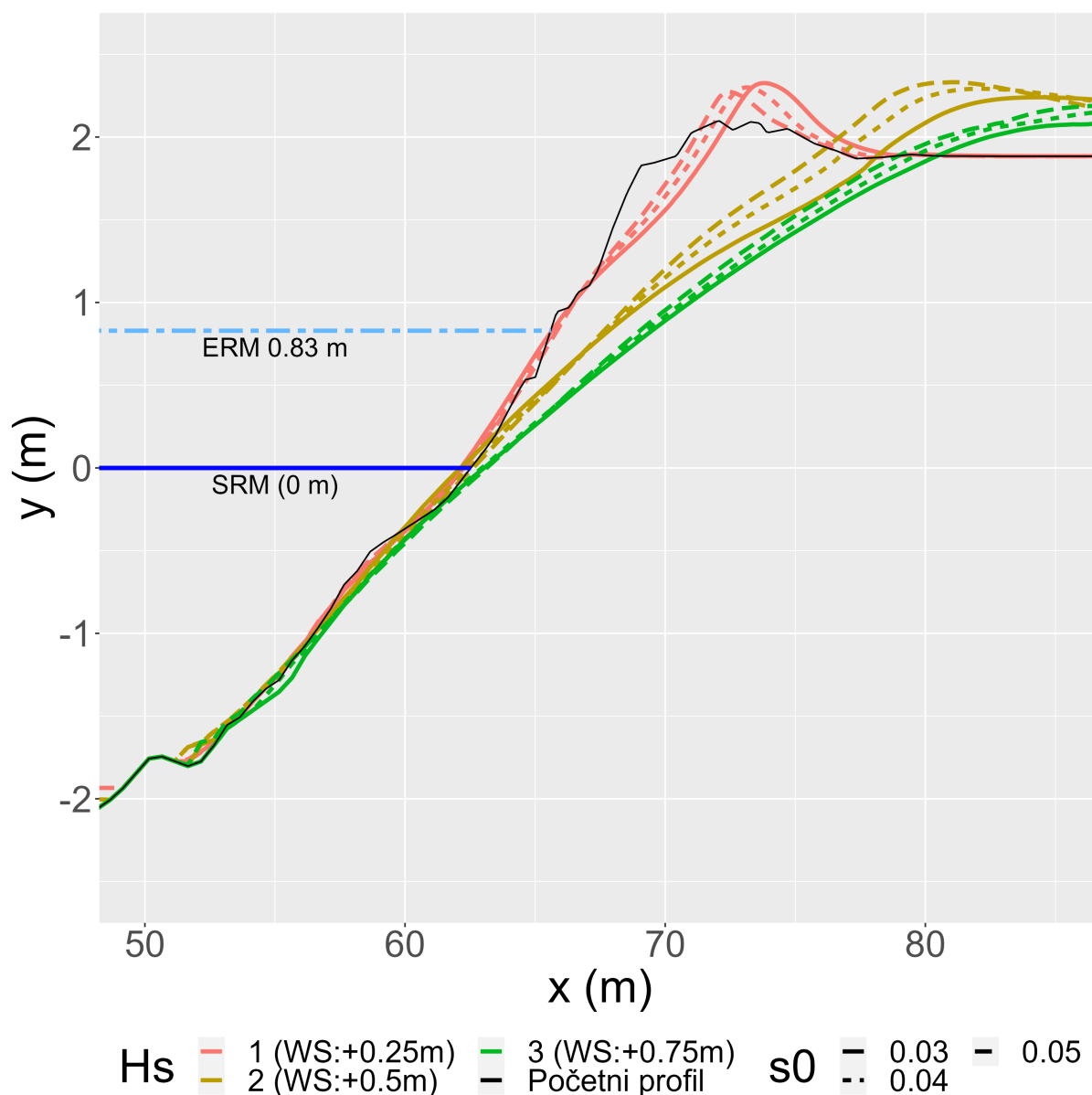
U konačnici je provedeno i usrednjavanje ukupnog pomaka obalne linije za svaki porast srednje razine mora. Naime, u stvarnosti plažu tijekom olujne sezone pogađa određeni broj valnih događaja čiji utjecaj na raspodjelu sedimenta na profilu je donekle neovisan, makar svaki uzastopni olujni događaj nastupa na početnom profilu koji je uzrokovao prethodni valni događaj. Dok bi simuliranje takvog seta valnih događaja tijekom jedne zimske sezone zahtijevalo nekoliko setova nizova uzastopnih simulacija s drukčijim valnim parametrima, korištenjem usrednjavanja postupak se pojednostavljuje i izbjegava se izuzetno zahtjevan niz simulacija. Usrednjavanjem se stoga dobiva pomak obalne linije koji je reprezentativan za odabrane valne uvjete.

4.2. Rezultati procjene pomaka obalne linije i rasprava

Na slikama [4.19](#), [4.20](#), [4.21](#) i [4.22](#) prikazane su promjene profila za svaku kombinaciju značajne visine valova i strmosti valova za različite ekstremne razine mora u ovisnosti o budućim porastima srednje razine mora na plaži Ploče. Promotri li se ponovno slučaj trenutne klime: na slici [4.19](#) prikazane su promjene na profilu plaže Ploče kakve je moguće očekivati danas za nastupanja ekstremne razine mora s povratnim razdobljem u iznosu od pet godina u prosjeku u međudjelovanju sa značajnom visinom valova od 1, 2 ili 3 metra, a od kojih H_s od 3 m je također moguće očekivati s povratnim periodom od 5 godina (Lončar i dr., [2014](#)).

Dominantne promjene na profilu očekuju se u obliku preraspodjele materijala na više dijelove profila. Za slučaj značajne visine valova od 1 metar promjene su vidljive na postojećoj bermi profila koja je zadana početnim profilom izmjerenim topografskim mjerenjem 17, ali za značajne visine valova u iznosu 2 i 3 metra formira se nova berma na višem nadmorskom dijelu plaže. Utjecaj strmosti valova na resultantni profil je malen, a u pravilu strmost vala dodatno određuje položaj novoformirane berme za više značajne visine valova. Međutim, kako se u ovom slučaju prati promjenu položaja profila plaže na postojećoj srednjoj razini mora, vidi se da u gotovo svim slučajevima prevladava pomak obalne linije prema kopnu na SRM. To je donekle i očekivani rezultat s obzirom na to da je plaža Ploče trenutno postojana te se učestalo dohranjuje kako bi se dodao novi materijal zbog eventualnog gubitka sedimenta. Istovremeno, tim postupkom plaža se i poravna kako bi se materijal koji je nagomilan na bermama na višoj koti plaže preraspodijelio na niže dijelove plaže i postigao "ugodniji" profil za posjetitelje.

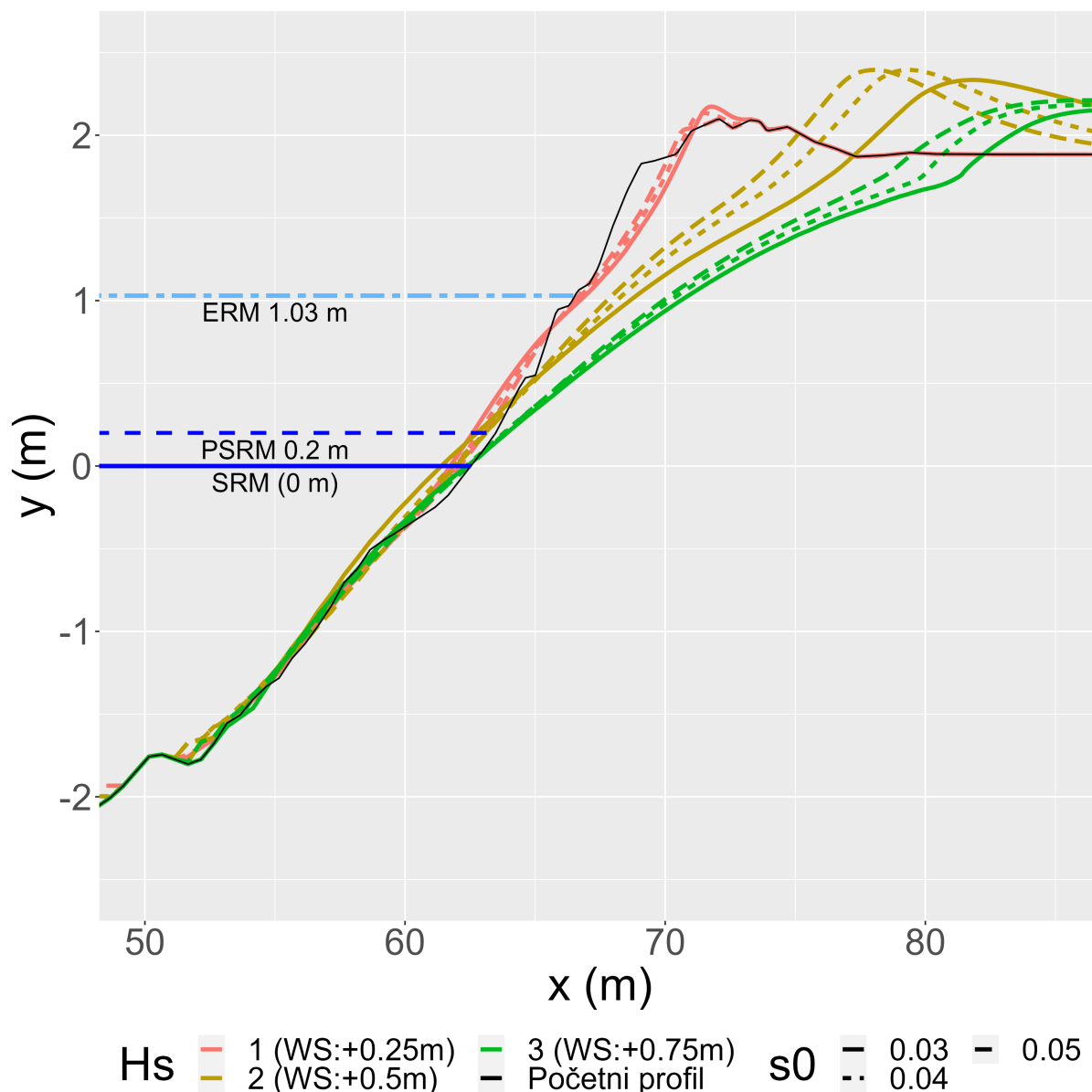
Porastom srednje razine mora na polovici stoljeća u iznosu od 0,2 metra na slici [4.20](#) novoformirane berme se nakon olujnih događaja također pomiču bliže kopnu, ali dosežu i nešto više razine. Pri tome se smanjuje i količina materijala koja se akumulira na nižim dijelovima



Slika 4.19. Promjene na profilu 1 određenom topografskim mjerenjem 17 na plaži Ploče uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,03 do 0,05 pri ekstremnoj razini mora u iznosu od 0,83 metra, a kakva se može očekivati u trenutnoj klimi.

profila te se budući profili sve više približavaju početnom profilu idući u dublje dijelove plaže. Ovakav odgovor plaže može se očekivati na polovici stoljeća, neovisno o budućim klimatskim emisijama jer je porast srednje razine mora u ovom slučaju jednak i za umjereni RCP4.5 i za *business-as-usual* RCP8.5 scenarij. Ekstremna razina mora od 1,03 m i danas i sredinom stoljeća imat će povratno razdoblje od pet godina, međutim njen iznos će se u tom razdoblju povećati za približno četvrtinu. U ovom slučaju vide se i pomaci obalne linije plaže k obali u nekim od valnih situacija. Kako se berme formiraju na sve višim dijelovima plaže, odnosno na dijelovima plaže sve bliže kopnu, tako je materijal povučen s dijela profila na kojem će se nalaziti buduća srednja razina mora i dolazi do pomaka obalne linije ka kopnu. Drugim riječima, valovi

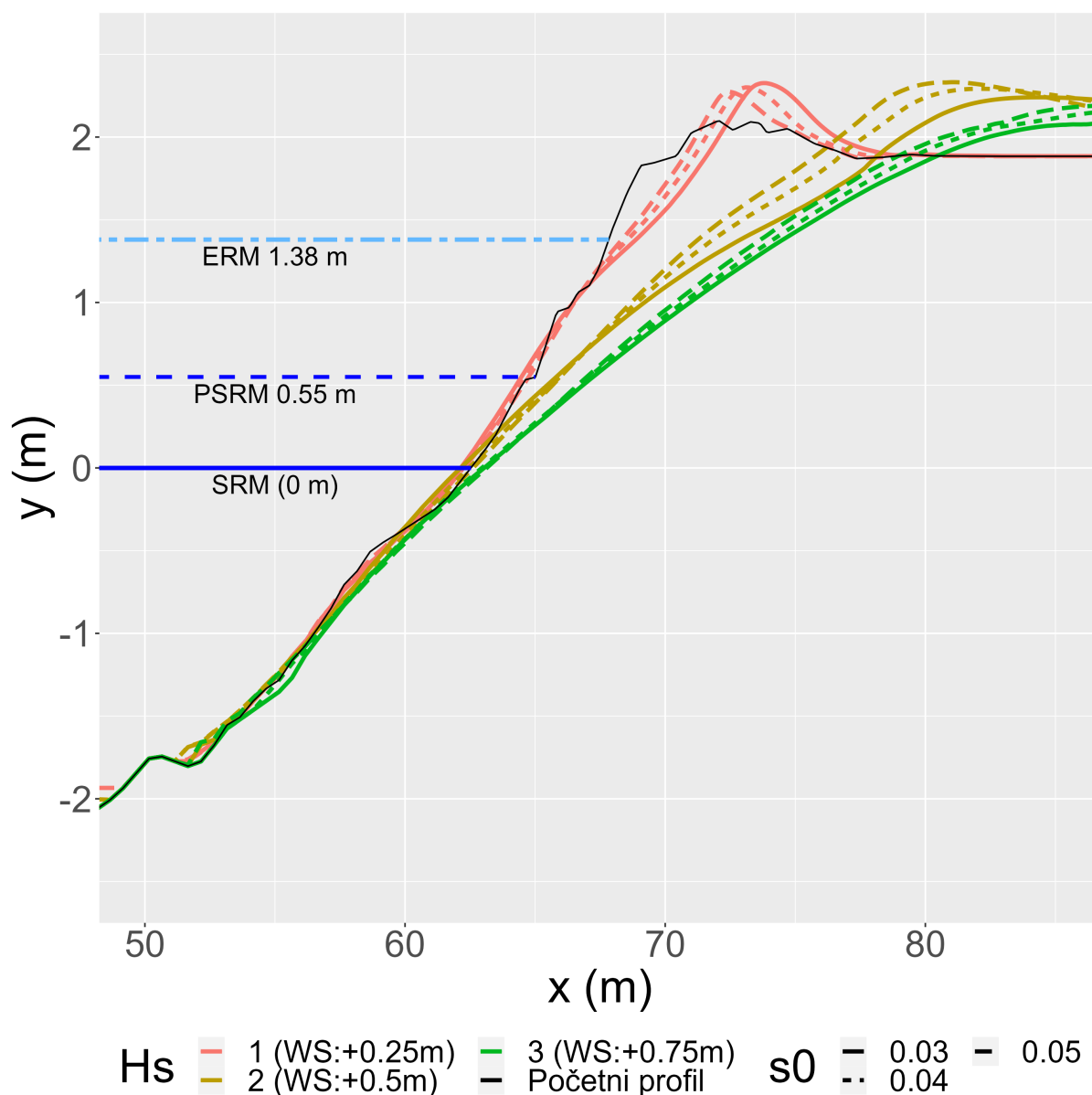
značajnih visina valova od 1 i 2 metra pomiču obalnu liniju k moru, a valne visine od 3 metra pomiču je k obali. Dakle, pomak obalne linije (skraćeno POL) ostaje pozitivan, odnosno obalna linija plaže pomiče se k moru i na polovici stoljeća, uz tek najsnažnije olujne događaje koji bi uzrokovali POL ka kopnu. Može se očekivati da bi ulaganje u održavanje plaže u vidu nadohrane i ravnjanja potencijalno raslo s obzirom na povećanje intenziteta ekstremnih događaja koji bi češće uzrokovali promjene profila na plaži kakvi nisu pogodni za posjetitelje.



Slika 4.20. Promjene na profilu 1 određenom topografskim mjerenjem 17 na plaži Ploče uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,03 do 0,05 pri ERM u iznosu od 1,03 metra, a kakva se može očekivati u klimi na polovici stoljeća u umjerenom (RCP4.5) i *business as usual* (RCP 8.5) klimatskom scenariju zbor porasta srednje razine mora od 0,2 m.

Na slici 4.21 prikazani su rezultati simulacija za 2100. godinu u umjerenom scenariju emisija stakleničkih plinova kada je očekivani porast SRM od 0,55 m. Takav porast SRM dovodi do

toga da ERM iznosi 1,38 m, a zadržava svoje povratno razdoblje od pet godina. U slučaju takve ERM i učestali valni događaji sa značajnom visinom valova od 1 metar stvaraju visoku bermu na plaži i materijal gomilaju bliže kopnu. Na budućoj srednjoj razini mora ostvaruje se pomak obalne linije ka kopnu u slučajevima značajne visine valova od 2 i 3 metra, dok je pri 1 metru H_s za očekivati da obalna linija ostane pri postojećem položaju. Dakle, svaki jači valni događaj pri ekstremnoj razini mora ovdje uzrokuje značajno povlačenje obalne linije ka kopnu. Ovakva ekstremna razina mora oko 2100. godine nastupat će svakih pet godina u prosjeku, a danas nastupa s p.r. od 500 godina. Riječ je o krajnje ekstremnom događaju kakav će biti učestao u budućnosti, a uzrokuje dominantan pomak obalne linije ka kopnu.



Slika 4.21. Promjene na profilu 1 određenom topografskim mjerenjem 17 na plaži Ploče uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,03 do 0,05 pri ERM u iznosu od 1,38 metra, a kakva se može očekivati u klimi na kraju stoljeća u umjerenom (RCP4.5) klimatskom scenariju pri porastu SRM od 0,55 m.

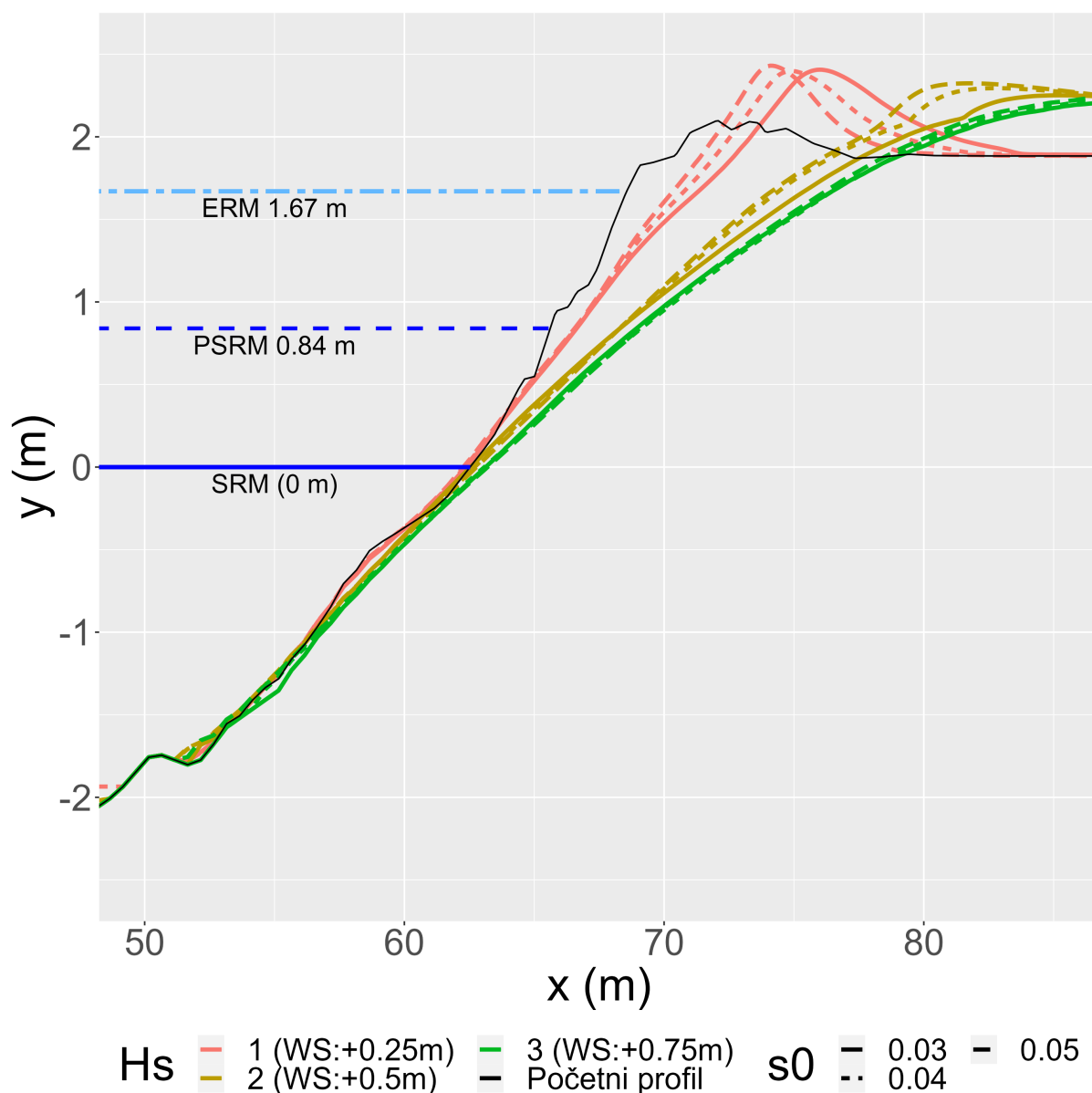
U scenariju emisija stakleničkih plinova RCP8.5, odnosno pri porastu SRM od 0,84, svi simulirani valni događaji nastupaju pri ERM od 1,67, prikazano na slici 4.22 te uzrokuju značajno povlačenje obalne linije ka kopnu. Takva ekstremna razina mora također će imati p.r. od približno pet godina. Međutim, njen iznos je udvostručen u usporedbi s ERM koja bez porasta SRM nastupa s povratnim razdobljem od pet godina, a iznosi i više nego ERM bez porasta SRM i s p.r. većim od 1000 godina. Uvažavajući da će u ovom scenariju pojavnost ERM u iznosu od 1,67 m biti redovita s p.r. od pet godina u prosjeku, zasigurno dolazi do značajnih promjena na profilu plaže i do pomaka obalne linije ka kopnu, s gomilanjem materijala na vrhu plaže. Time nastupa i takozvani *coastal squeeze*, a s obzirom da postojeća infrastruktura, kao što je bazenski kompleks, onemogućuje uspostavu novog ravnotežnog profila plaže na višoj koti kako raste srednja razina mora. Za održavanje ovakve plaže i dalje će biti potrebna upotreba mehanizacije za preraspodjelu sedimenta s viših dijelova plaže i za ravnanje njenog profila. U slučaju kada se, u scenariju RCP8.5, materijal plaže češće bude nalazio na sve višim dijelovima profila za očekivati je da će i kompleksnost takvih radova rasti, a moguća je i šteta na infrastrukturi. Valni događaji simulirani ovdje promatraju se u izolaciji, ali u prirodi takav valni događaj jedan je od niza valnih događaja koji će zadesiti plažu tijekom olujne sezone. Zbor porasta SRM i popratnog povećanja ERM, nastupanje niza takvih događaja potencijalno će imati i razorniji utjecaj na plažu od onih promotrenih ovdje.

Dalje je analiziran pomak obalne linije, dugoročni i kratkoročni te u zbroju ukupan, za svaki od valnih uvjeta iz tablice 4.1 simuliranih modelom XBeach-Gravel na plaži Ploče.

Na slici 4.23 prikazan je dugoročni pomak obalne linije uzrokovan isključivo porastom srednje razine mora. Iznosi POL navedeni su u tablici 4.4 za svaki porast srednje razine mora. Ukoliko porasta SRM nema onda nema ni dugoročnog pomaka. Već do polovice stoljeća porast srednje razine mora od 0,2 metra uzrokuje pomak obalne linije plaže Ploče za skoro 1 metar bliže kopnu.

Umjereni scenarij RCP4.5 tijekom kojeg SRM raste za 0,55 metara do kraja stoljeća uzrokuje pomak od 2,5 metra bliže kopnu. Tako će se od početka do kraja stoljeća u prostoru plaže izgubiti dodatnih 1,5 metara. Međutim, ukoliko emisije budu slijedile *business as usual* scenarij, onda je moguće očekivati dodatnih 2 metra pomaka od polovice do kraja stoljeća, odnosno sveukupno 3 metra pomaka obalne linije bliže kopnu za porast SRM od 0,84 metra. Ovi iznosi predstavljaju trajno povlačenje obalne linije ka kopnu. Kako srednja razina mora raste, dio prostora postaje i ostaje dugoročno potopljen. Jedini način da se takav gubitak obalnog i plažnog prostora nadoknadi jest promjena u upotrebi prostora kroz građevinske zahvate, a kojima bi se iznad nove srednje razine mora gradio prostor nove umjetne plaže.

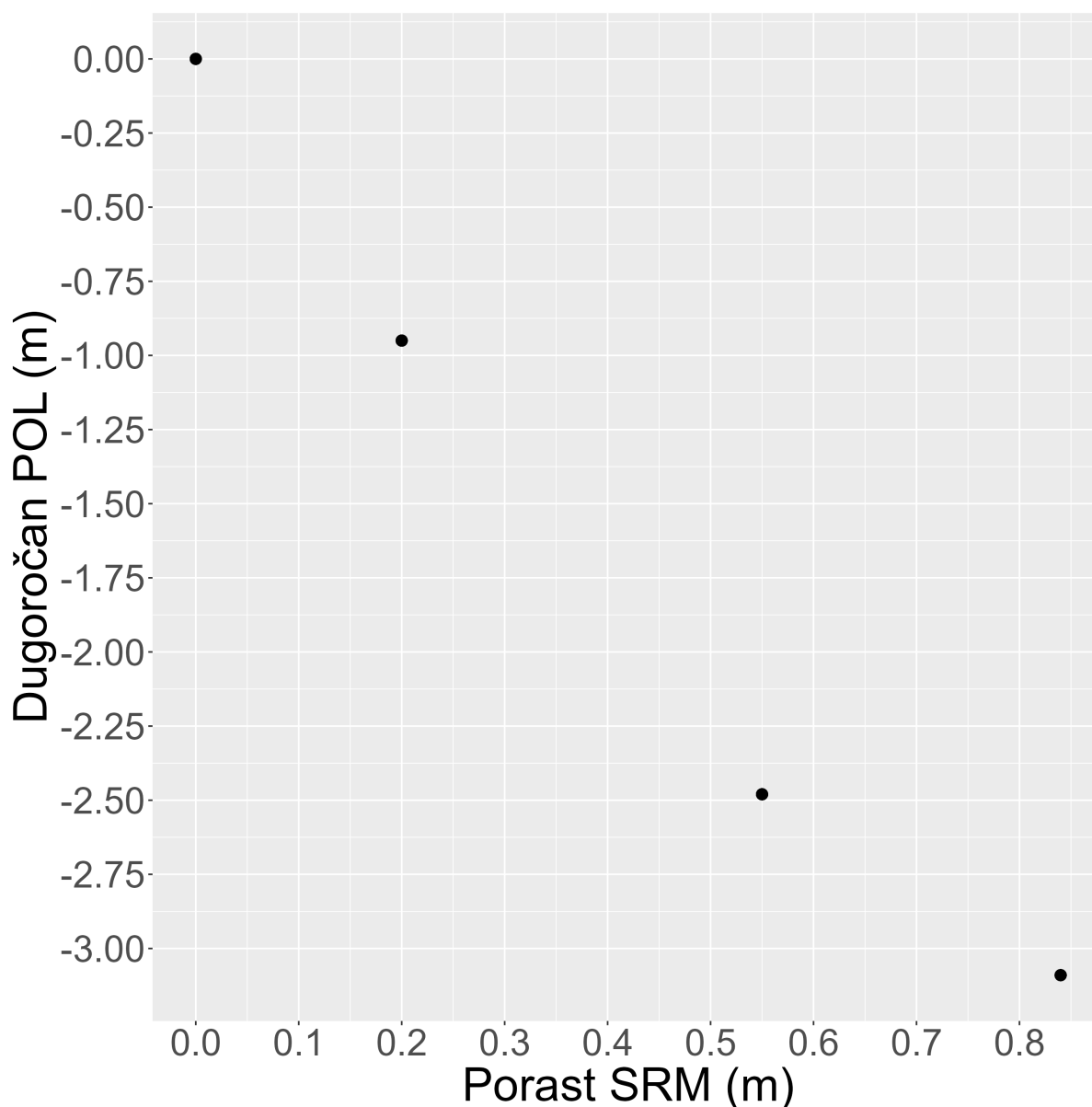
Uvažavajući djelovanje valnih događaja na plažu Ploče, na slici 4.24 su prikazani i kratkoročni pomaci obalne linije koje uzrokuju simulirani valni događaji iz tablice 4.1. Različito su prikazani pomaci za svaku značajnu visinu valova, strmost vala i porast srednje razine mora. U trenutnoj klimi i u slučaju da je porast srednje razine mora 0, ekstremni valni događaji djeluju pomicanjem obalne linije prema moru, a time povećavaju plažni prostor. Posljedica je to pre-



Slika 4.22. Promjene na profilu 1 određenom topografskim mjerenjem 17 na plaži Ploče uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,03 do 0,05 pri ERM u iznosu od 1,67 metra, a što odgovara ERM kakva se može očekivati u klimi na kraju stoljeća u *business as usual* (RCP 8.5) klimatskom scenariju s porastom SRM od 0,84 m.

raspodjele materijala prikazane na slici 4.19: s postojeće berme materijal se prenosi i u dublje dijelove profila, a ne isključivo na više dijelove plaže. Time se more, uvjetno rečeno, zatrpava.

Ovakav morfološki odgovor plaže, koji uzrokuje i pomak obalne linije prema moru, nastaje zbog korištenja fiksnih valnih uvjeta u modelu (objašnjeno u dodatku C). Prilikom mjerenja prikazanih na slici 4.4a pokazalo se da u slučaju navedenog morfološkog odgovora dolazi do preraspodjele sedimenta do dubine od 1 metar. Međutim, ovaj fenomen akumulacije sedimenta u dubljim dijelovima ne prevladava na plaži Ploče. Analizom promjena na profilu plaže Ploče tijekom valnog događaja G13_G14_K3 opisanog u dodatku C pokazalo se da tijekom trajanja

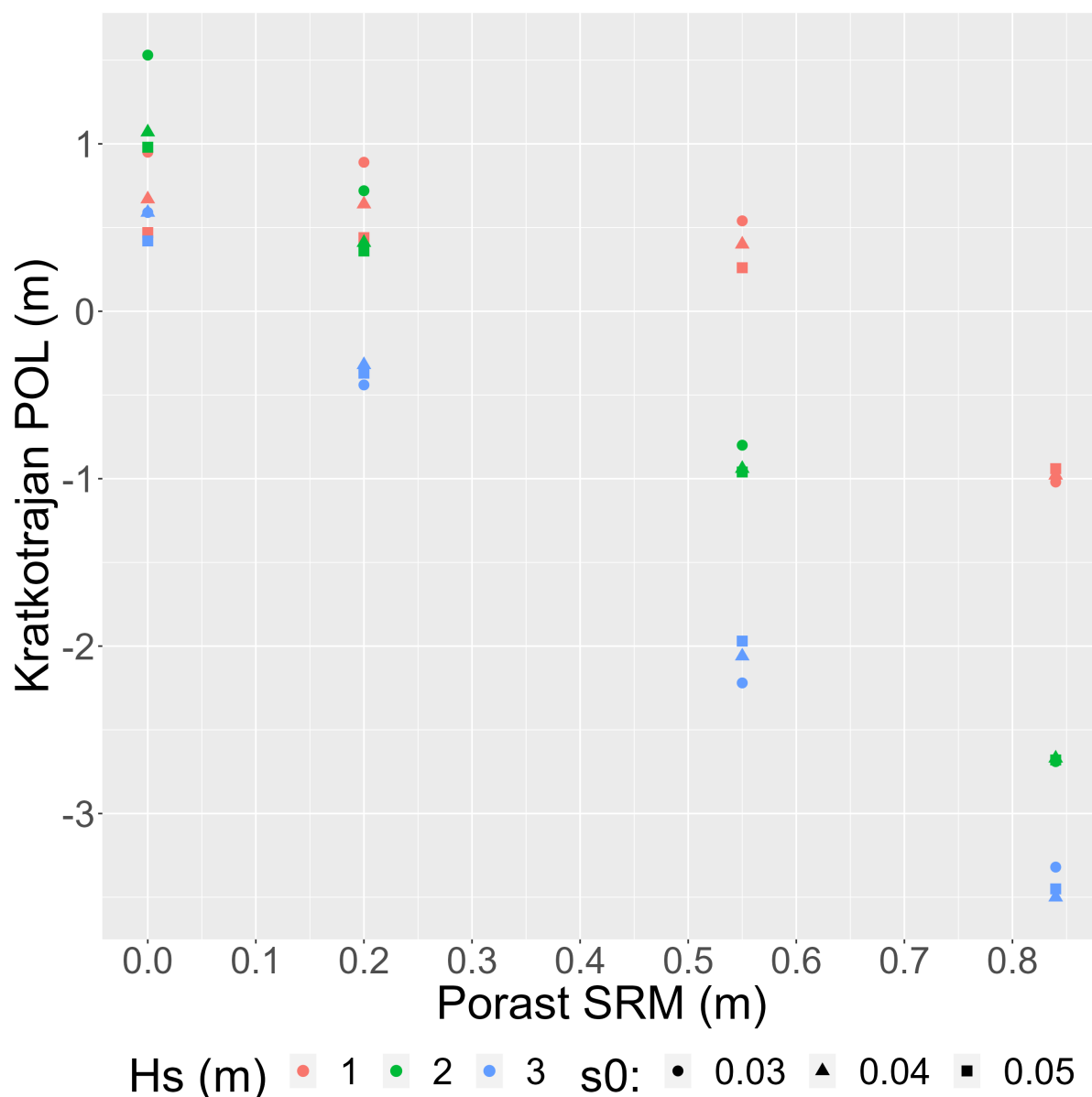


Slika 4.23. Dugoročni pomak obalne linije na profilu 1 određenim topografskim mjerenjem 17 plaže Ploče za različite poraste SRM, a kakve su očekivane na polovici (0,2 m) i do kraja stoljeća (0,55 i 0,84 m).

cijelog valnog događaja upravo opadanje intenziteta valnih uvjeta pri kraju valnog događaja uzrokuje pomak sedimenta s dubljih dijelova plaže nazad na visinu nove berme. Time je spriječen nepovratan gubitak sedimenta dok god se sediment zadržava na dubinama do 1 metar.

Nije za očekivati da će slično vrijediti i za sediment koji se akumulira na vrhu plaže: jednom kada djelovanje snažnih valova uzrokuje pomak sedimenta na sam vrh plaže, blagi valni događaji neće biti u mogućnosti vratiti ga natrag prema moru. Time se obalna linija pomiče ka kopnu i poprima dugoročan karakter, a što je prikazano na slici 4.24 za više poraste srednje razine mora.

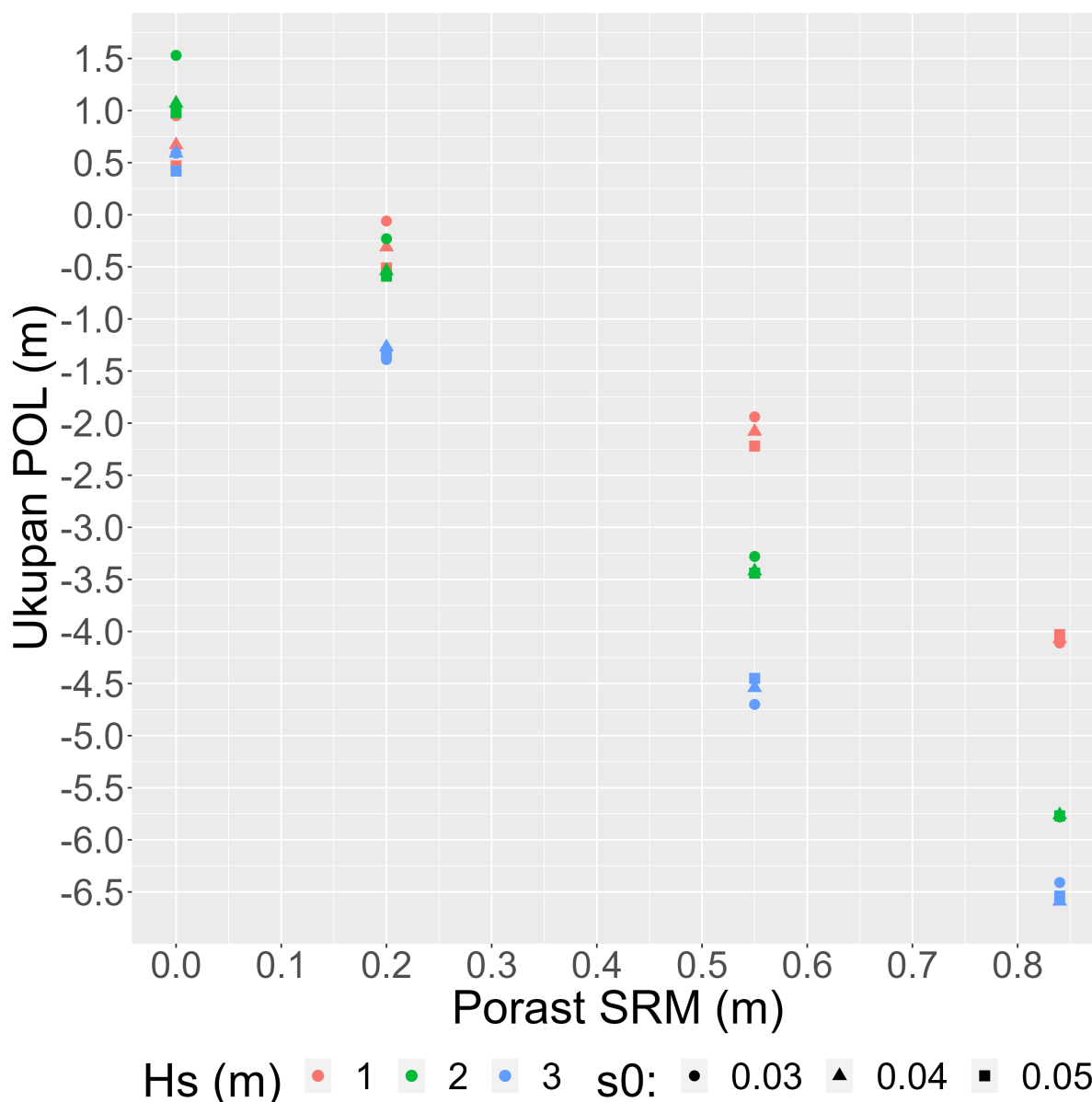
Zbrajajući dugotrajan i kratkoročan pomak obalne linije, odnosno pomak direktno uzrokovani porastom srednje razine mora i indirektno putem mehanizma valnih događaja pri novim ekstremnim razinama mora, već na polovici stoljeća za porast SRM u iznosu od 0,2 metra oče-



Slika 4.24. Kratkoročni pomak obalne linije na profilu 1 određenim topografskim mjerenjem 17 plaže Ploče za različite poraste SRM i u ovisnosti o djelovanju značajnih visina valova H_s od 1 do 3 metra pri različitim strmostima s_0 od 0,03 do 0,05. Pomaci su određeni nakon djelovanja odabranih valnih uvjeta u trajanju od 8 sati.

kivan je ukupan pomak obalne linije ka kopnu. Ukupan pomak za sve kombinacije ekstremnih valnih događaja za različite srednje razine mora, strmosti i značajne visine valova, prikazan je na slici 4.25. Valni događaji s ekstremnom razinom mora nisu u mogućnosti poništiti pomak obalne linije ka kopnu koji uzrokuje porast srednje razine mora čak ni na polovici stoljeća. Na kraju stoljeća očekivan je ukupan pomak obalne linije od preko 2 metra ka kopnu za valne događaje sa značajnom visinom valova već od 1 metra, a i preko 6 metara za slučaj najsnažnijih valnih događaja od 3 metra H_s .

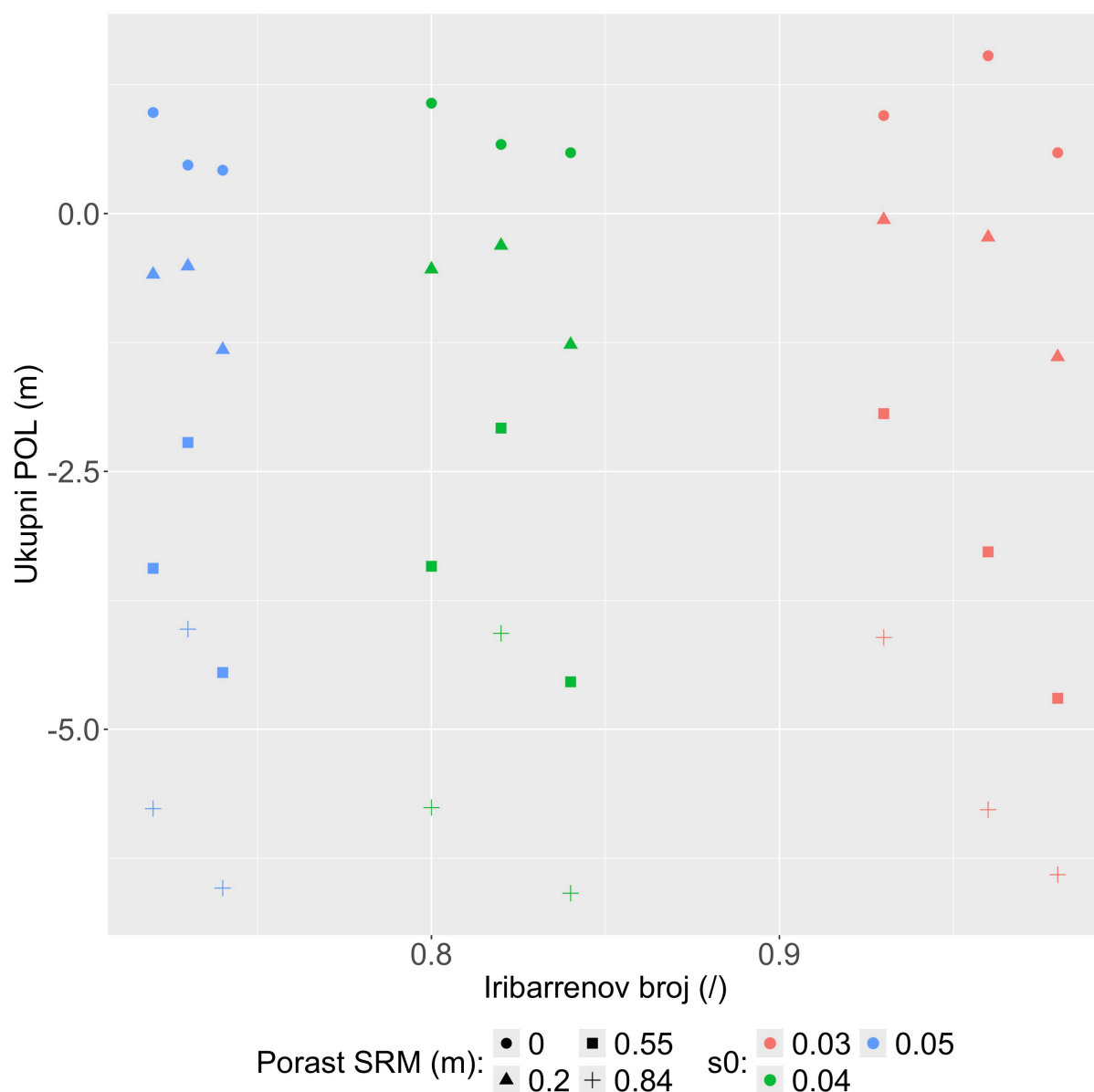
Na slici 4.26 prikazan je i međuodnos Iribarrenova broja i ukupnog POL (m). Za plažu Ploče simulirani valni događaji pokazuju jednako ponašanje za sve Iribarrenove brojeve u korištenom



Slika 4.25. Ukupan pomak obalne linije nastao kao zbroj kratkoročnog i dugoročnog pomaka obalne linije na profilu 1 određenim topografskim mjerenjem 17 plaže Ploče nakon djelovanja 8 sati različitih značajnih visina valova H_s od 1 do 3 metra i strmosti s_0 od 0,03 do 0,05 za različite poraste SRM kakve se očekuje na polovici (0,2 m) i do kraja stoljeća (0,55 i 0,84 m).

rasponu, a što je i očekivani rezultat. Naime Iribarrenovi brojevi u danom rasponu opisuju valove jednakog tipa ponašanja, a po ranijim slikama ujedno valovi najmanje strmosti dopijevaju materijal tj. bermu pomaknuti najdalje k obali. S obzirom da su u simulacijama korištene tri vrijednosti značajne valne visine, najmanja strmost je postignuta upravo za duge valne duljine.

Usrednje li se sve dobiveni pomaci obalnih linija za pojedini porast srednje razine mora, dobiju se srednji (ukupni, kratkoročni i dugoročni) pomaci obalne linije prikazani u tablici 4.4. Dugoročni pomak obalne linije iznosi 1 metar na polovici stoljeća, a 2,5 do 3,1 m do kraja stoljeća - u svim slučajevima prema kopnu. Kratkotrajni pomak uzrokovan valnim događajima u kombinaciji s ekstremnim razinama mora do kraja stoljeća također pokazuje na pomicanje



Slika 4.26. Ukupni POL (m) u odnosu s Iribarrenovim brojem valnih događaja.

obalne linije profila plaže Ploče bliže kopnu s iznosima od 0,9 do 2,4 metra. U zbroju, ukupan pomak obalne linije na plaži Ploče mogao bi iznositi od 3 do 5,5 metara. U najgorem slučaju, pretpostavi li se da je pomak obalne linije na plaži Ploče ostvaren u iznosu od 5 metara, to znači da se gubi trećina od 15 metara plaže. Takva promjena predstavlja li bi značajan gubitak plažnog prostora za veliku većinu plaža u Hrvatskoj čiji je medijan širine 7 m, a k tome treba uvažiti i činjenicu da zbog učestalosti nastupanja valnih događaja s, iz današnje perspektive, krajnje visokim ekstremnim razinama mora, plažni prostor ne gubi samo na površini već i na potencijalu za rekreaciju tijekom cijele godine. Dodatni negativni učinci ovakvog pomaka obalne linije su i u šteti nastaloj učestalim plavljenjem prostora iza plaže, trošku mehanizacije za preraspodjelu materijala nazad na plažu kao i u šteti nastaloj zasipanjem infrastrukture plažnim materijalom.

Tablica 4.4. Usrednjeni pomaci obalne linije za različite poraste srednje razine mora na plaži Ploče.

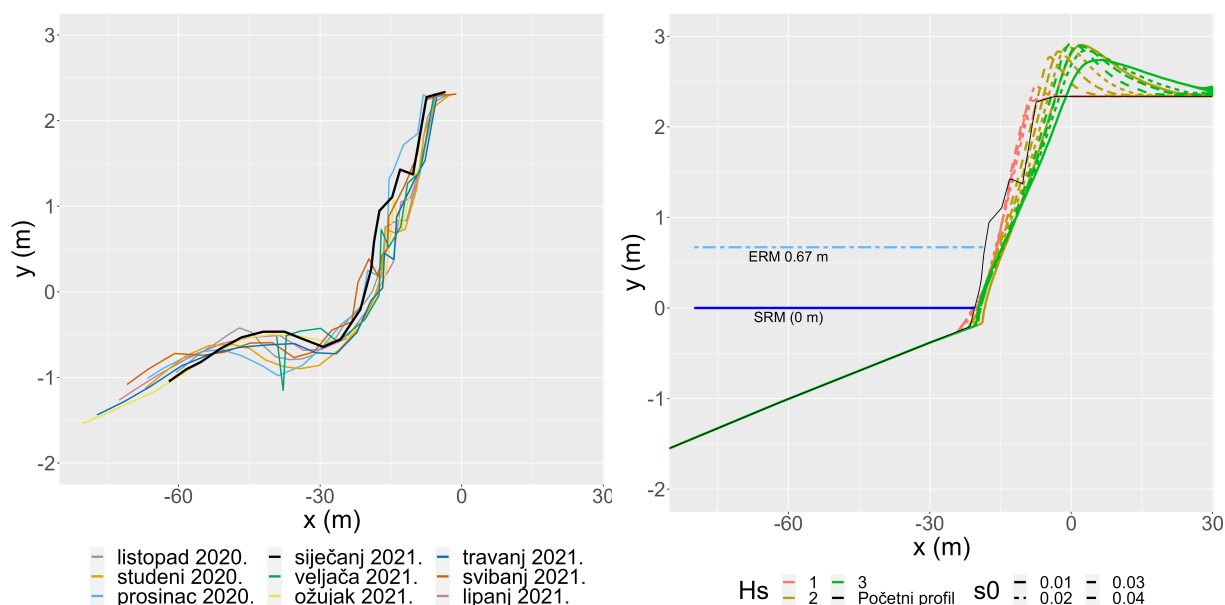
Porast SRM (m)	ERM (m)	Dugoročni POL (m)	Kratkotrajni POL (m)	Ukupni POL (m)
0	0,83	0	0,81	0,81
0,2	1,03	-0,95	0,26	-0,69
0,55	1,38	-2,48	-0,86	-3,34
0,84	1,67	-3,09	-2,36	-5,45

Na plaži Sakarun i profilu 5 prikazanom na slici 4.13 izvršene su simulacije olujnih valova u trajanju od 8 sati, a što predstavlja dovoljno vremena za postizanje ravnotežnog profila, kao što je već raspravljeno za slučaj plaže Ploče u poglavlju 4.1.1. Pri tome je korišten niz različitih valnih uvjeta navedenih u tablici 4.3: kombinacija od 3 značajne visine valova (1, 2 i 3 metra), 4 različite strmosti vala (0,01; 0,02; 0,03 i 0,04) te 4 različite srednje razine mora (0; 0,2; 0,55 i 0,84 m). Time je ukupno izvršeno 36 različitih simulacija, ovisno o kombinaciji 3 prethodno navedena parametra.

Na slici 4.27 prikazane su promjene na profilu kakve su izmjerene na plaži Sakarun 4.27a s rezultatima modela za slučaj olujnih događaja različitih valnih visina i strmosti pri ekstremnoj razini mora u trenutnoj klimi 4.27b. Vizualnom usporedbom rezultata modela i mjerenja, može se reći da model predviđa promjene usporedive s onim kakve su zabilježene između mjerenja. Uvažavajući to da između 2 mjerenja profila može nastupiti niz olujnih događaja koji mogu uzrokovati puno složenije promjene na profilu od modeliranih olujnih događaja, promjene koje prikazuje model prostorno odgovaraju onima koje su zabilježene tijekom 9 mjeseci u mjerenjima. Stoga se zaključuje da je model s ovim postavkama moguće koristiti za simulaciju učinaka olujnih događaja na plažu Sakarun.

Na slici 4.28 prikazan je pregled promjena na profilu plaže Sakarun kakve se mogu očekivati tijekom valnih događaja s ekstremnom razinom mora od 0,67 m pri trenutnoj srednjoj razini mora. Većina promjena na plaži Sakarun pri takvoj ekstremnoj razini mora odvija se duž strmijeg dijela profila, a tek valovi značajne valne visine od 2 metra i strmosti 0,01 prelaze vrh plaže i stvaraju višu bermu. Istovremeno svi valovi s H_s od 3 metra formiraju novu i višu bermu na vrhu plaže. Uvažavajući rijetkost nastupa takvih događaja, odgovor plaže određen modelom i prikazan na slici 4.28 odgovara promjenama zabilježenim mjerenjem na strmom dijelu profila prikazanom na slici 4.27a za valove od H_s 1 m. S obzirom da izostaju podatci o valnim uvjetima ispred Sakaruna za vrijeme kad su mjereni profili, nije moguće znati je li tijekom tog razdoblja nastupio valni događaj s ERM.

Do polovice stoljeća, 2050. godine, rast će srednja razina mora zbog dosadašnjih emisija stakleničkih plinova. U umjerenom scenariju RCP4.5 kao i u RCP8.5 *buisness as usual* scenariju, porast SRM iznositi će približno 0,2 m. Za isti iznos porast će i ekstremna razina mora s 0,67 metara na 0,87 metara. Učinak valnih uvjeta pri ekstremnoj razini mora u iznosu od 0,87 metara prikazan je na slici 4.29. U tim uvjetima povećava se visina berme pri svim značajnim visinama valova, pri čemu H_s od 2 metra sada stvara bermu iznad plaže za svaku odabranu strmost. Valne



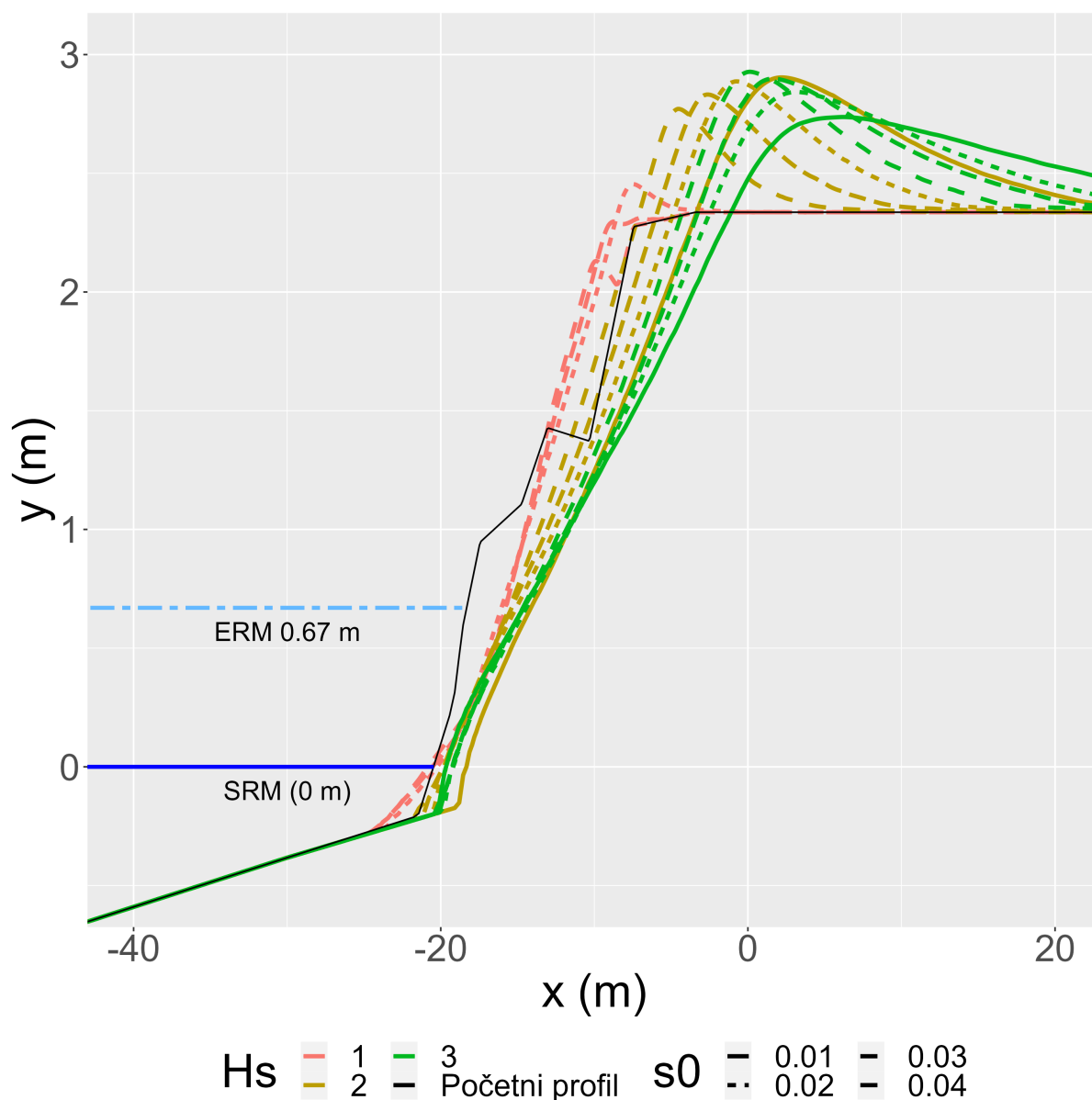
(a) Profil 5 plaže Sakarun tijekom topografskih mjerenja listopad 2020. - lipanj 2021. (b) Profil 5 za siječanj nakon djelovanja simuliranih valnih događaja

Slika 4.27. Usporedba promjena izmjerenih na profilu 5 (4.27a) s promjenama nakon simulacija različitih valnih događaja (H_s od 1 do 3 m i s_0 od 0,02 od 0,04) (4.27b) pri ERM od 0,67 m koji odgovara današnjoj klimi.

visine od 3 metra također postižu višu bermu, međutim berma se ne pomiče značajno više ka kopnu u odnosu na prethodni slučaj kad nije bilo porasta srednje razine mora. Ovakav rezultat je još uvijek usporediv sa slučajem bez porasta srednje razine mora.

Do kraja stoljeća, u umjerenom RCP4.5 scenariju emisija stakleničkih plinova, očekivan je porast srednje razine mora u iznosu od 0,55 metara. Utjecaj valnih događaja pri ekstremnoj razini mora od 1,38, uvećanoj od 0,67 metara na početku stoljeća za 0,55 metara u ovom scenariju, prikazan je na slici 4.30. Svi valni događaji sa značajnom visinom valova iznad 2 metra tada formiraju bermu iznad postojećeg vrha plaže. Čak će i značajne visine valova od 1 metra uspostaviti bermu na vrhu plaže. Značajan dio materijala pri H_s od 3 metra pomiče se sve više ka kopnu, u odnosu na bermu nastalu pri H_s od 2 m i s_0 0,04 pomak je i oko 10 metara bliže kopnu.

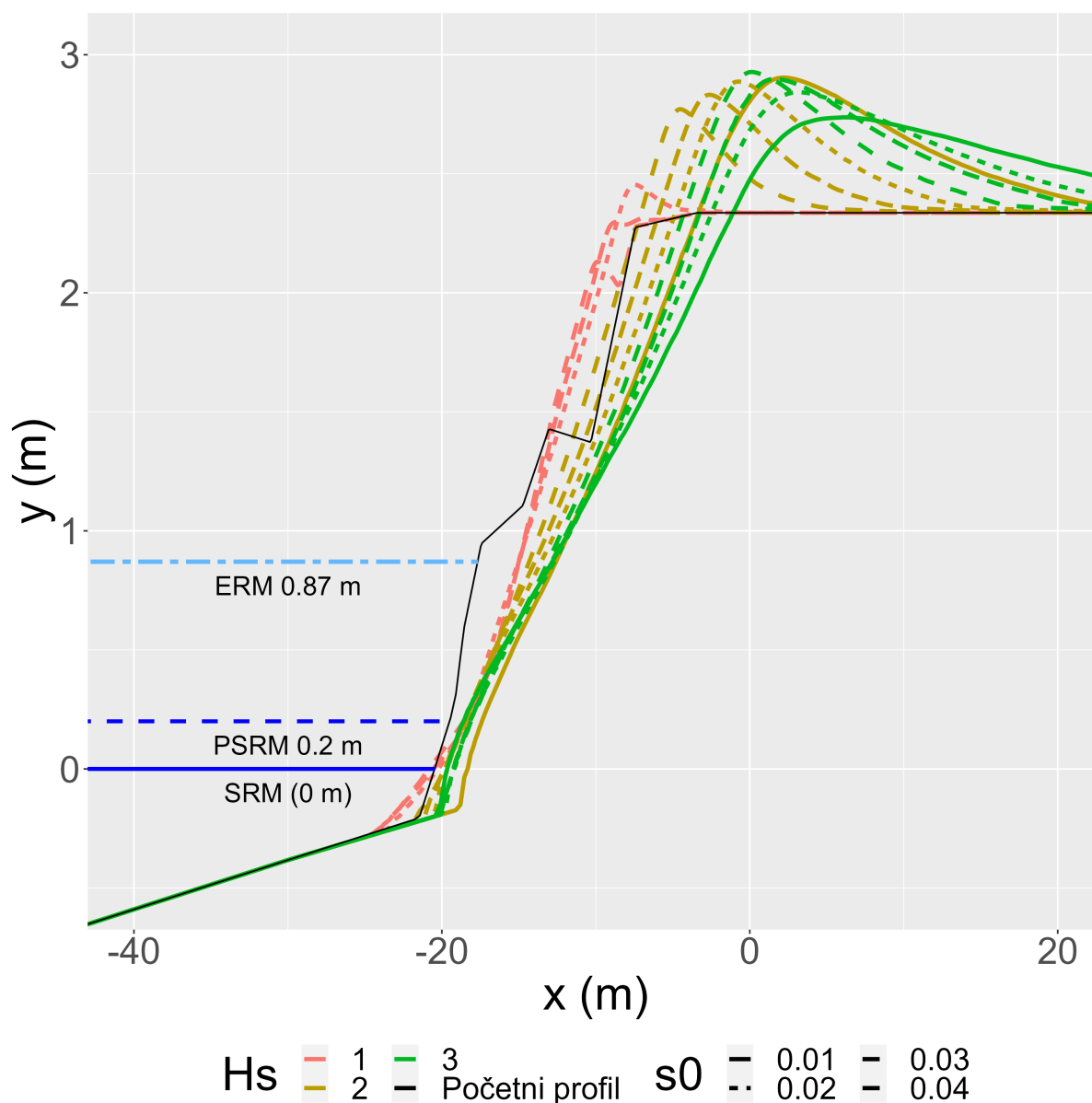
U slučaju emisija stakleničkih plinova u scenariju *business as usual* ili RCP8.5, srednja razina mora raste za 0,84 metra, a ekstremna razina mora postiže iznos od 1,67 metara dok njeno prosječno povratno razdoblje ostaje na približno 5 godina. To je udvostručenje u ERM kakve prevladavaju na početku stoljeća. Naime, ekstremna razina mora u iznosu od 1,67 metara je u ovom scenariju redoviti 5-godišnji događaj u prosjeku, dok je početkom stoljeća takav događaj imao povratno razdoblje veće i od 1000 godina u prosjeku. U slučaju prikazanom na slici 4.31, značajne visine valova od 1 metra nadilaze postojeći vrh plaže, dok H_s od 2 i 3 metra formira bermu plaže na skoro 3 metra visine i to na oko 0,7 metara više od početnog vrha plaže. Značajne visine valova iznad 2 metra redovito će nanositi materijal plaže iznad postojećeg vrha i sve bliže



Slika 4.28. Promjene na profilu 5 izmjenom u siječnju na plaži Sakarun uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,01 do 0,04 pri ERM od 0,67 m, a koja je očekivana u trenutnoj klimi.

kopnu. U odnosu na H_s od 1 metar koji stvara bermu na vrhu plaže, H_s od 2 metra stvara bermu oko 10 metara bliže kopnu, a H_s i oko 13 metra bliže kopnu. Položaj berme koju stvaraju valovi H_s od 2 i 3 metra u ovom slučaju se i preklapaju više nego u prošlom slučaju s manjim porastom SRM.

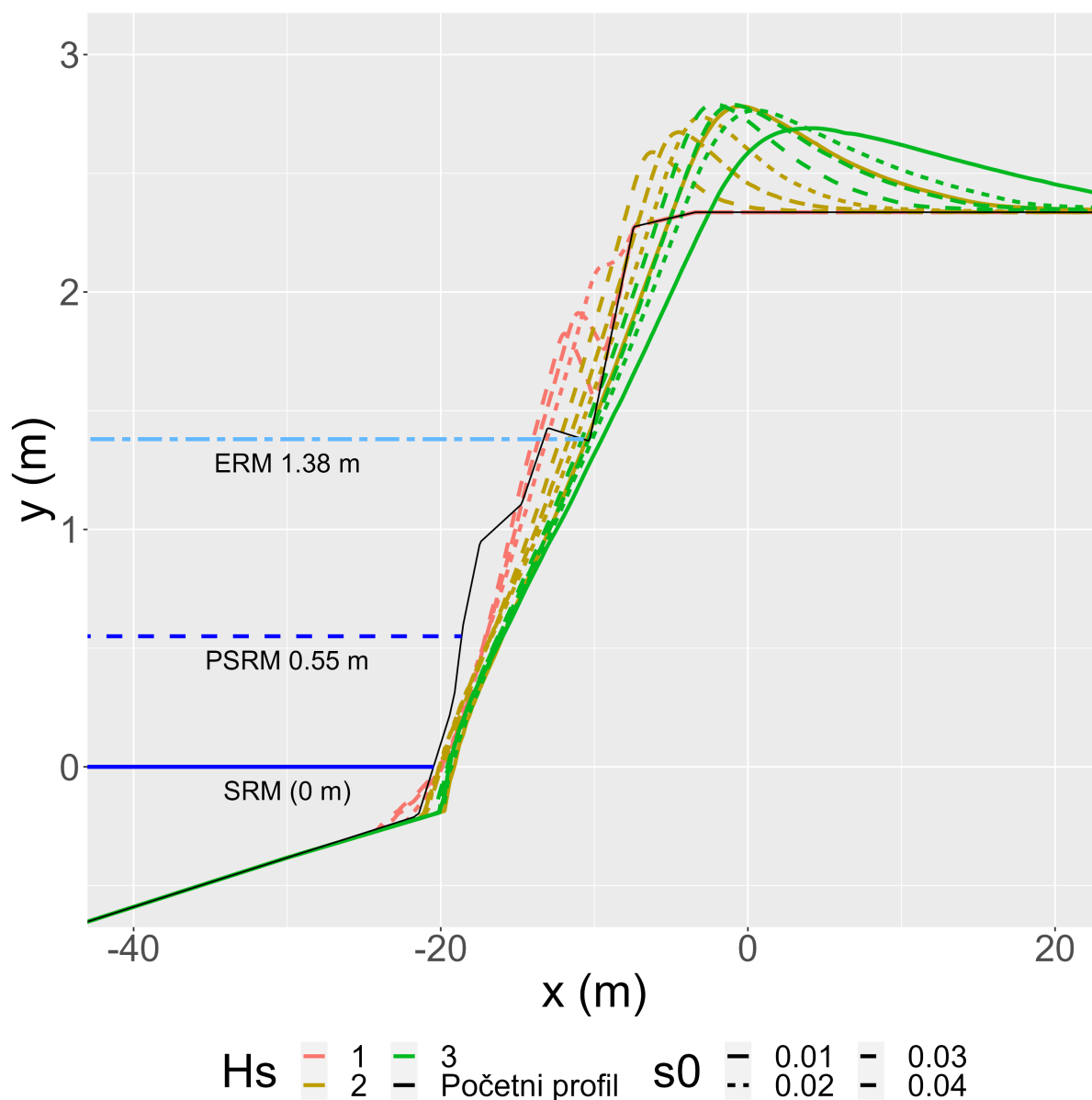
Na plaži Sakarun svi valni uvjeti uzrokuju pomak sedimenta ka višim dijelovima plaže. Za razliku od plaže Ploče, ovdje ne nastupa povlačenje dijela sedimenta ka dubljim dijelovima profila. Razlog tome je nagib profila plaže Sakarun koji iznosi $9,09^\circ$ dok je plaža Ploče strmija i ima nagib od $10,2^\circ$. Nagib profila plaže i odabir kuta unutarnjeg trenja određuje većinu odgovora plaže na djelovanje valova, a upravo pri iznosu kuta oko 9° nastupa promjena u režimu odgovora plaže, a kako je diskutirano u dodatku [C](#). Plaža Ploče tako na fiksni valni događaj ka-



Slika 4.29. Promjene na profilu 5 izmjerenom u siječnju na plaži Sakarun uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,01 do 0,04 pri ERM od 0,87 m, a koja nastupa pri porastu SRM u iznosu od 0,2 metra i može se očekivati s povratnim razdobljem od 5 godina u 2050. godini zahvaljujući emisijama stakleničkih plinova u scenarijima RCP4.5 i RCP8.5.

kav je ovdje simuliran odgovara kombinacijom berme-erozije-berme s glavnom materijala na najvišoj bermi, dok Sakarun s nešto nižim nagibom ima odgovor u obliku čiste formacije berme na višoj razini plaže.

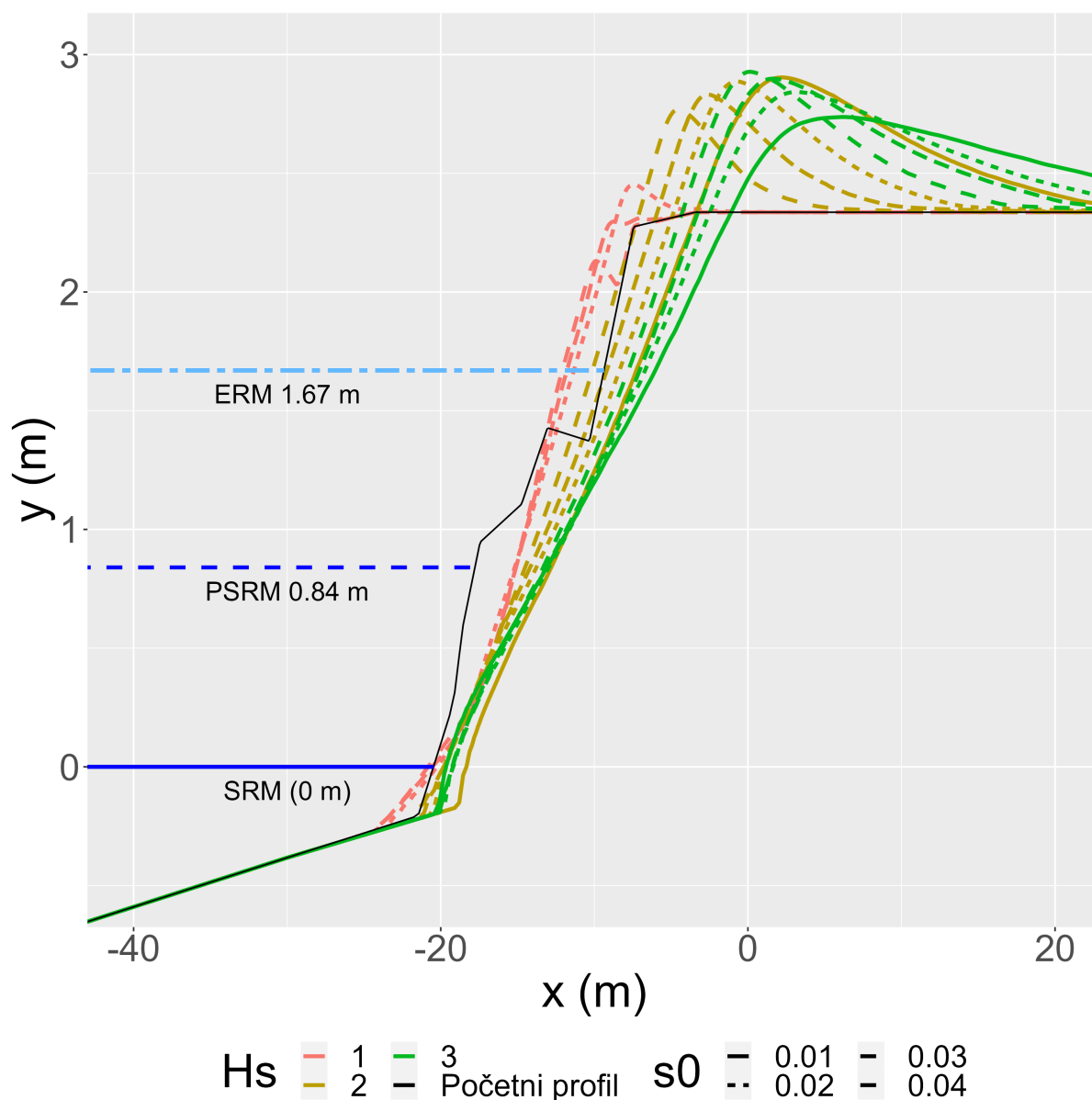
Dominantan utjecaj valnih događaja pri budućem porastu srednje razine mora na plaži Sakarun analiziran je u kontekstu pomaka obalne linije. Obalna linija pomiče se zbog porasta srednje razine mora, ali i zbog djelovanja valnih događaja pri višim ekstremnim razinama mora. Pomak zbog porasta srednje razine mora opisuje se kao dugoročni pomak jer porastom srednje razine mora dijelovi obale postaju dugotrajno potopljani. Takav pomak prikazan je na slici 4.32 gdje se



Slika 4.30. Promjene na profilu 5 izmjenom u siječnju na plaži Sakarun uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,01 do 0,04 pri ERM od 1,38 m, a koja nastupa pri porastu SRM od 0,55 m i može se očekivati s povratnim razdobljem od 5 godina u 2100. godini zahvaljujući emisijama stakleničkih plinova u scenariju RCP4.5.

uspoređuje pomak obalne linije za različite poraste srednje razine mora koje se mogu očekivati na polovici i kraju stoljeća, ovisno o scenariju emisija stakleničkih plinova.

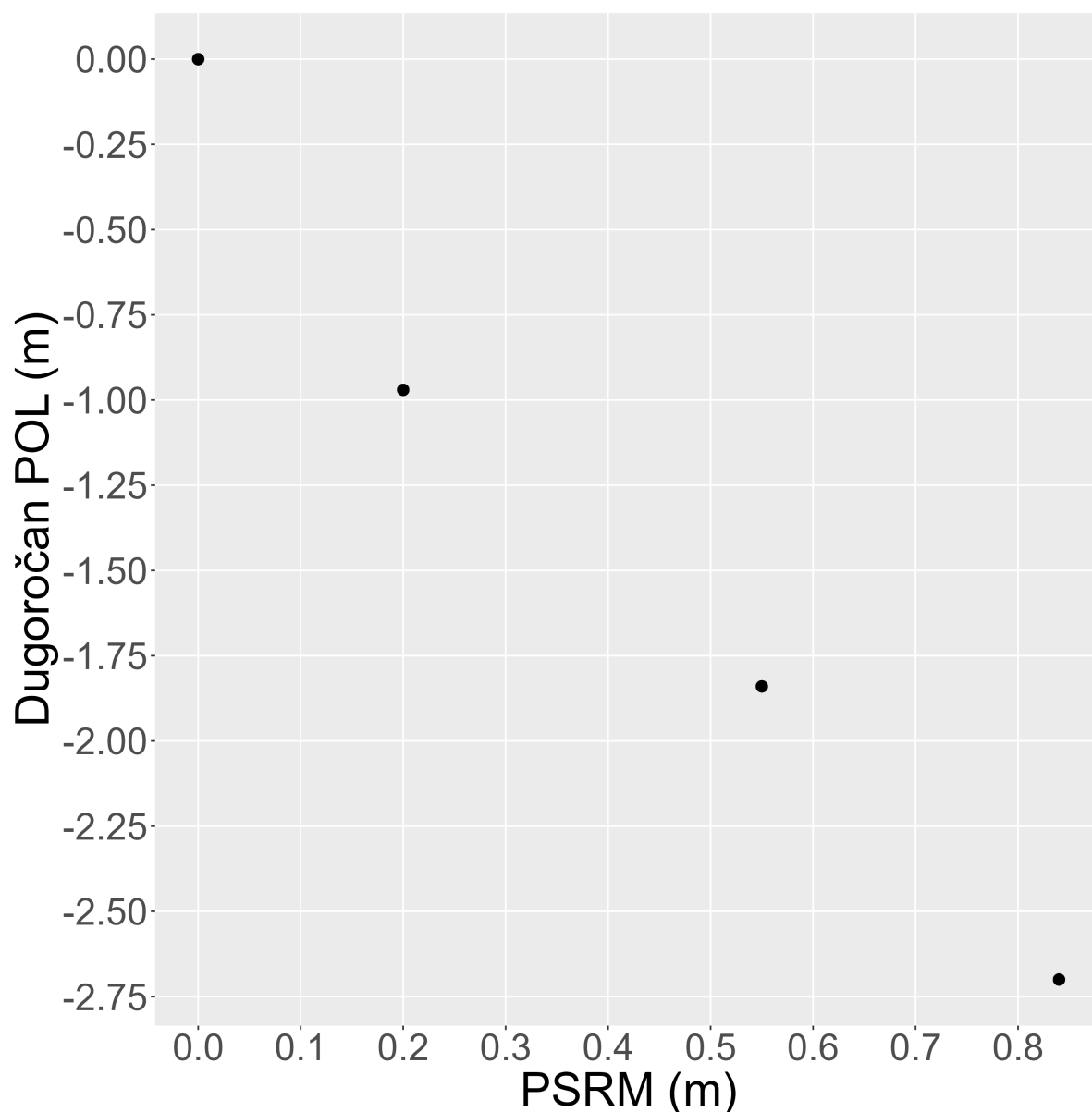
Do polovice stoljeća, kao posljedica dosadašnjih emisija stakleničkih plinova, u oba klimatska scenarija dolazi do porasta srednje razine mora za 0,2 metra, a popratni dugoročni pomak obalne linije ka kopnu iznosi 1 metar. Krajem stoljeća nastupaju razlike u pomaku obalne linije ovisno o scenariju emisija. U slučaju umjerenih emisija u scenariju RCP4.5, krajem stoljeća nastupa porast srednje razine mora od 0,55 metara koji uzrokuje i pomak obalne linije ka kopnu za 1,84 metra. Ukoliko se nastavi s *business as usual* scenarijem, tj. RCP8.5 scenarijem emisija,



Slika 4.31. Promjene na profilu 5 izmjenom u siječnju na plaži Sakarun uzrokovane djelovanjem valova značajnih visina H_s od 1 do 3 metra s različitim strmostima valova s_0 od 0,01 do 0,04 pri ERM od 1,67 metara, a koja nastupa pri porastu SRM od 0,84 i može se očekivati s povratnim razdobljem od 5 godina u 2100. godini zahvaljujući emisijama stakleničkih plinova u scenariju RCP8.5.

i ne zaustavi se porast emisija, do kraja stoljeća očekivani porast srednje razine mora iznositi će 0,84 metra, a time i 2,7 metara pomaka obalne linije na plaži Sakarun. Približno za svakih 0,25 metara porasta srednje razine mora slijedi i pomak obalne linije od 0,9 metara bliže kopnu za slučaj plaže Sakarun.

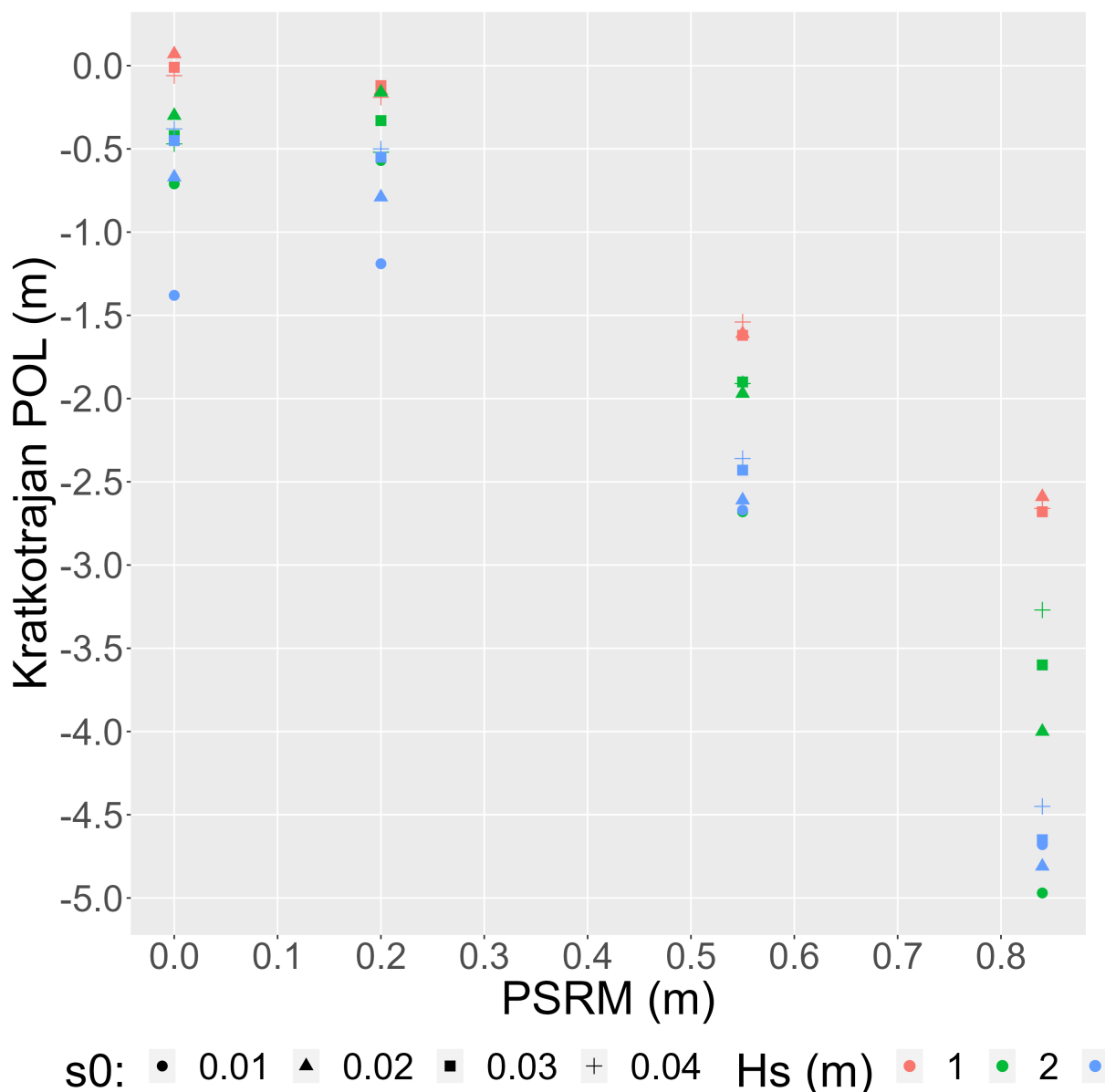
Kratkoročni pomak obalne linije određen je kao pomak koji nastupa zbog djelovanja valnih događaja. Valni događaji u ovoj analizi nastupaju u kombinaciji s ekstremnom razinom mora, a kako bi se odredio utjecaj upravo najrazornijih valnih događaja koji će nastupiti s povratnim razdobljem od 5 godina u prosjeku. Jedan takav ekstrem razine mora na plaži Sakarun početkom



Slika 4.32. Dugoročni pomak obalne linije na profilu 5 određenim mjerenjem u siječnju plaže Sakarun za različite porastu SRM, a kakvi su očekivani na polovici (0,2 m) i do kraja stoljeća (0,55 i 0,84 m).

stoljeća iznosi 0,67 metara, polovicom 0,87 metara, jer je uvećan za porast srednje razine mora od 0,2 metra. Krajem stoljeća to iznosi čak i 1,38 odnosno 1,67 metara ovisno o porastu srednje razine mora od 0,55 ili 0,84 metra kao posljedice različitih klimatski scenarija. Najgori promotreni slučaj, s ekstremnom razinom mora od 1,67 metara, predstavlja povećanje ekstremne razine mora od čak 250 %. Takav događaj danas okarakterizirao bi se s povratnim razdobljem od preko 1000 godina, a krajem stoljeća u RCP8.5 scenariju emisija stakleničkih plinova takav događaj nastupat će s povratnim razdobljem od približno 5 godina. Osim što bi, kao što je prikazano na slici 4.33, uzrokovao pomak plaže Sakarun k višem dijelu kopna, može se pretpostaviti da bi sličan učinak u kontekstu poplavlivanja i materijalne štete nastupao redovito i na ostatku obale. Na slici 4.33 prikazan je pomak obalne linije za svaku kombinaciju značajne

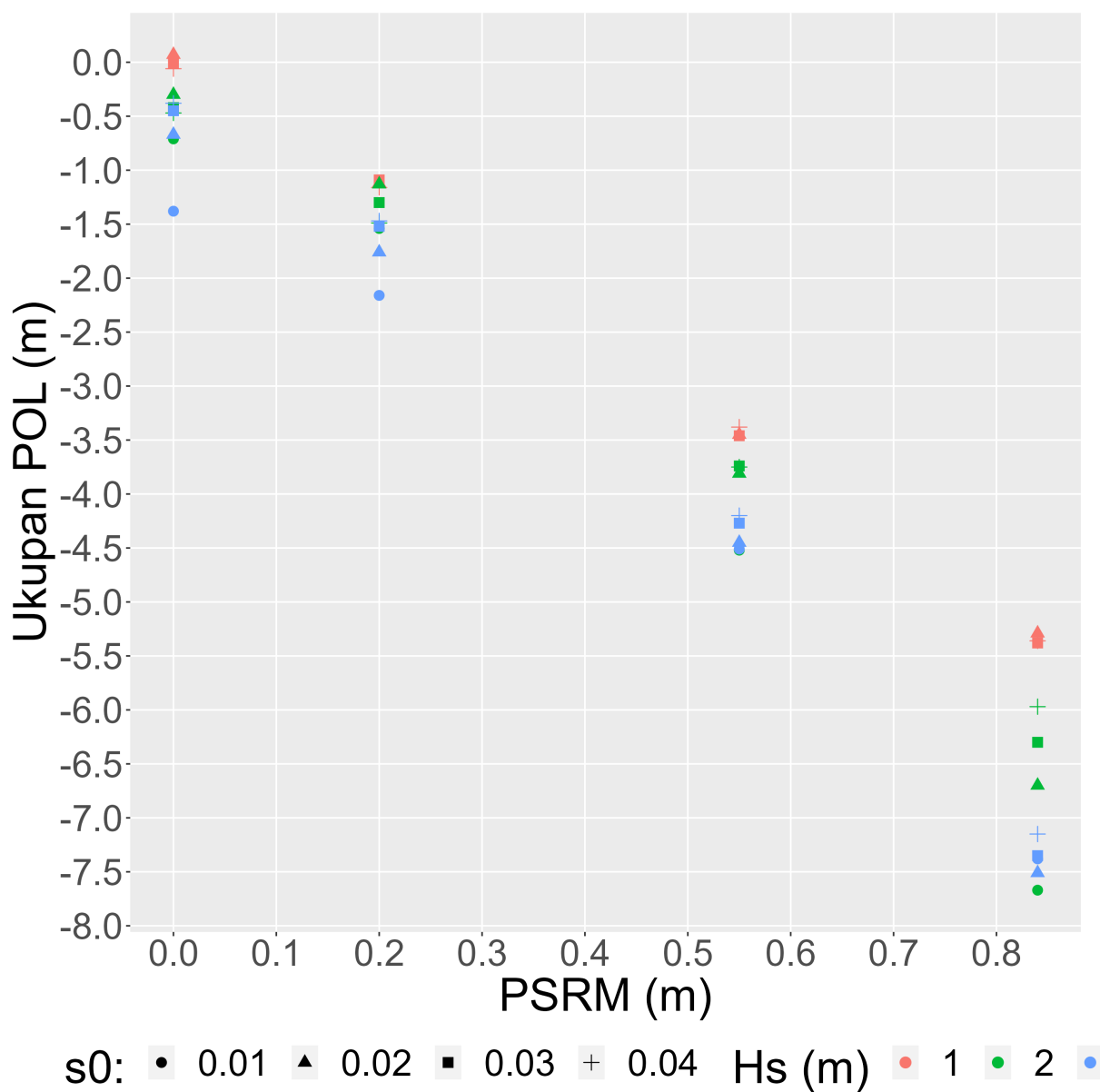
visine valova H_s i strmosti valova s_0 prethodno navedenih u tablici 4.3 ovisno o porastu srednje razine mora. Dok se danas i 2050. očekuje donekle negativan pomak obalne linije, tj. pomak bliže kopnu, pomaci obalne linije do kraja stoljeća u oba scenarija grupiraju se oko vrijednosti -2 metra za RCP4.5 i umjerene emisije te oko -4 metra za slučaj nekontroliranog nastavka emisija stakleničkih plinova opisanih scenarijem RCP8.5.



Slika 4.33. Kratkoročni pomak obalne linije na profilu 5 određenim mjerenjem u siječnju plaže Sakarun za različite poraste SRM, a kakvi su očekivani na polovici (0,2 m) i do kraja stoljeća (0,55 i 0,84 m).

Zbrajajući razdvojene doprinose k dugoročnom pomaku obalne linije na slici 4.34 s kratkoročnim doprinosom valnih događaja pri ekstremnim razinama mora određen je ukupan pomak obalne linije plaže Sakarun prikazan na slici 4.34 za svaku kombinaciju valnih uvjeta iz tablice 4.3. Tako je polovicom stoljeća moguće očekivati da će obalna linija plaže Sakarun biti bliža kopnu za oko 1,5 metar, a krajem stoljeća između 4 i 7 metara, ovisno o emisijama stakleničkih

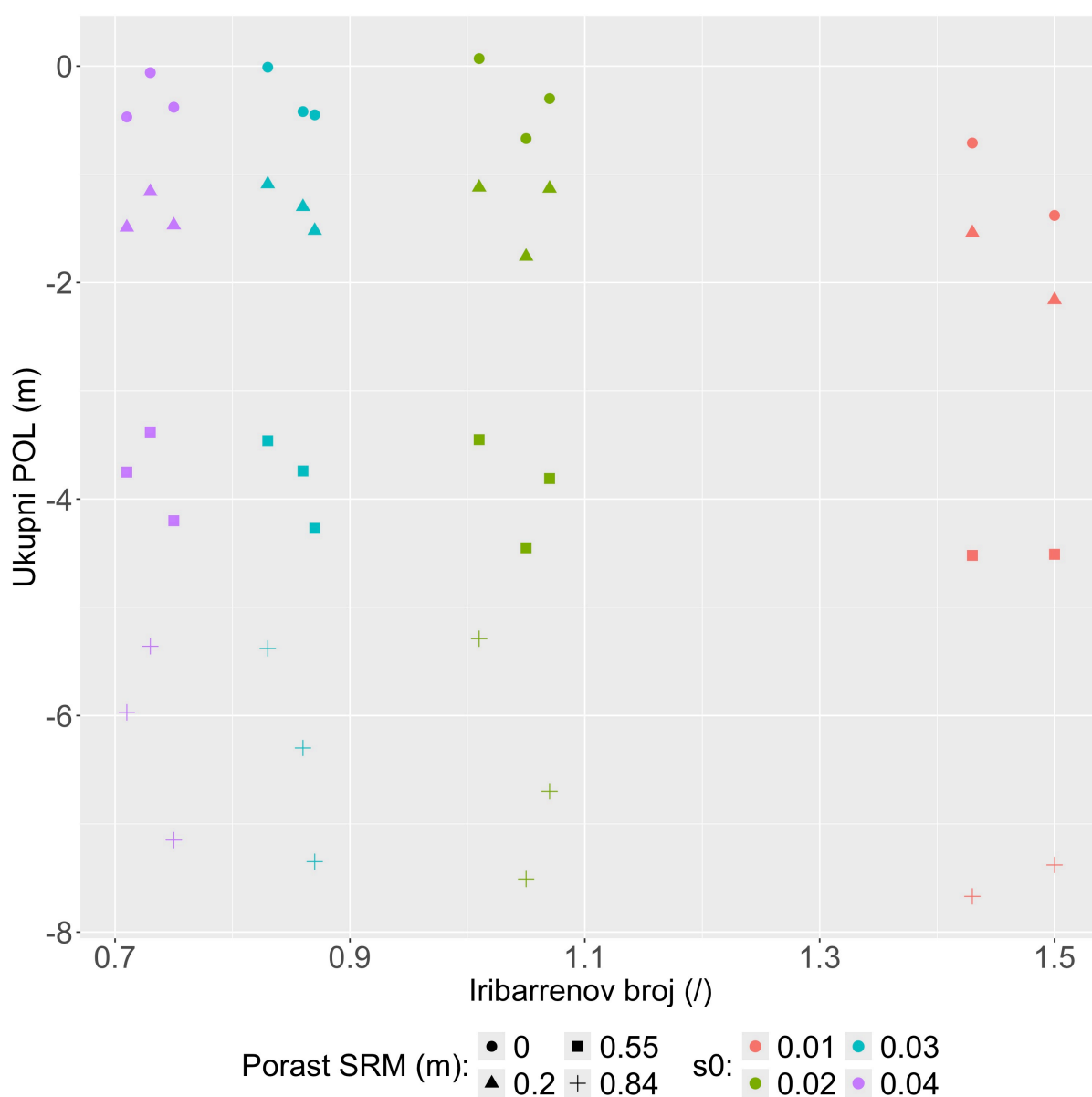
plinova i popratnim porastom srednje razina mora. Za slučaj RCP8.5 scenarija emisija različiti valni događaji negativno doprinose pomaku obalne linije u najvećem rasponu vrijednosti između -2,5 do -5 metara primarno u ovisnosti o valnoj visini H_s .



Slika 4.34. Ukupan pomak obalne linije određen kao zbroj dugoročnog i kratkoročnog pomaka oblane linije na profilu 5 određenim mjerenjem u siječnju plaže Sakarun za različite porastu SRM, a kakvi su očekivani na polovici (0,2 m) i do kraja stoljeća (0,55 i 0,84 m).

Na slici [4.35](#) prikazan je i odnos ukupnog POL (m) s Iribarrenovim brojem valnih događaja simuliranih na plaži Sakarun. Valni događaji desno na grafu, dakle s višim Iribarrenovim brojem tj. manjim strmestima, pokazali su veći ukupni POL. Upravo ti događaji imali su i strmest u iznosu od 0,01; odnosno veće valne duljine. Na ranijim slikama promjena na profilu, npr. na [4.30](#), upravo valni događaji niske strmesti su najviše pomaknuli profil k obali. Iako je ovaj uzorak malen, samo nekoliko simulacija pri strmosti od 0,01 odnosno Iribarrenovom broju od oko 1,5; rezultat upućuje na to da bi plaže na udaru takvih valova s otvorenog Jadrana bile dodatno

ranjive na porast srednje razine mora jer bi im se obalna linije više pomaknula k obali. Takav rezultat nadovezuje se na (Masselink i dr., 2010) ukazujući na gubitak sedimenta šljunčanih plaža na način da se sediment premješta na više kote plaže (uzdizanje krune) pri niskim strmostima, a time i pomičući obalnu liniju bliže kopnu. (Poate i dr., 2013) pokazuje da će strmiji valovi dio sedimenta vratiti na niže dijelove plaže, a što ovdje nije uočeno. Međutim oba prethodna rada provedena su na šljunčanim plažama manje veličina zrna, D_{50} od 2 do 10 mm, dok Ploče i Sakarun imaju raspon zrna od 25 do 54 mm u prosijeku. Dodatno, ovdje je značajan i doprinos ERM koji je simuliran, ali usprkos tome zanimljivo je da se u oba prethodna spomenuta rada kao i ovdje uočava značajan pomak sedimenta ka višem dijelu plaže upravo za strmost od 0,01. Ovdje nije bio cilj promotriti međudodnos strmosti i odgovora plaže, ali buduća istraživanja mogla bi jasnije ispitati utjecaj strmosti za plaže krupnijeg šljunka.



Slika 4.35. Ukupni POL (m) u odnosu s Iribarrenovim brojem za plažu Sakarun.

Ukoliko se usrednje pomaci obalne linije za sve valne događaja pri ekstremnim razinama mora za pojedini porast srednje razine mora, dobiju se srednji pomaci obalne linije reprezentativan za odabrani porast srednje razine mora i simulirane valne uvjete. Ta brojka predstavlja prosječni očekivani pomak obalne linije za valni događaj u rasponu značajne visine valova H_s od 1 do 3 metra i strmosti s_0 od 0,01 do 0,04 koji nastupa pri ekstremnoj razini mora. Usrednjene vrijednosti prikazane su u tablici 4.5. Očekivani pomak obalne linije pri takvom jednom valnom događaju pri ekstremnoj razini mora iznosi 0,5 metara ka kopnu bez porasta srednje razine mora, a raste na 1,43 metra pri polovici stoljeća do 3,96 ili čak 6,55 metara na kraju stoljeća. Pomak obalne linije bliže kopnu u iznosu od 6 m, kao posljedice valnog događaja koji nastupa pri ekstremnoj razini mora od 1,67 m, predstavlja pomak u duljini trećine postojeće plaže. S obzirom da plaža Sakarun iza sebe nema infrastrukturu koja bi je ograničila u pomicanju ka kopnu, moguće je očekivati njeno izmještanje ka kopnu zahvaljujući valnim događajima tijekom budućeg porasta srednje razine mora. Neodgovoreno pitanje je bi li ukupna širina plaže ostala jednaka pri tom pomicanju i pri redovnom djelovanju valnih događaja na budućoj srednjoj razini mora.

Tablica 4.5. Usrednjeni pomaci obalne linije za različite poraste SRM na plaži Sakarun.

Porast SRM (m)	ERM (m)	Dugoročni POL (m)	Kratkotrajni POL (m)	Ukupni POL (m)
0	0,67	0	-0,43	-0,43
0,2	0,87	-0,97	-0,46	-1,43
0,55	1,38	-1,84	-2,12	-3,96
0,84	1,67	-2,7	-3,85	-6,55

U tablicama 4.4 i 4.5 određeni su pomaci obalne linije na plažama Ploče i Sakarun koji iznosi između 5,5 i 6,6 m ka kopnu. Širina plaže iznad razine mora na promatranim profilima približno iznosi 15 i 18 metara za Ploče i Sakarun. Stoga u ova dva slučaja približan gubitak širine profila iznos 37 % i 36 %. Ukoliko se ukupna površina plaža u Hrvatskoj smanji za 36 %, odnosno u iznosu od 2 545 386 m², nova ukupna površina plaža iznosila bi 4 525 130 m².

Stavljajući iznos pomaka obalne linije od 5 metara u kontekst medijalne širine plaža u Hrvatskoj u iznosu od 7 metara, za očekivati je da će do kraja stoljeća nastupiti značajan gubitak površine plaža. Naravno, kod dijela plaža bit će prisutan i *coastal squeeze* jer je pomak obalne linije spriječen antropogenom infrastrukturom iza plaže, kao što je to slučaj za plažu Ploče. Također, za očekivati je da će u dijelu plaža doći i do pomaka cijele plaže prema kopnu, kao što je potencijalno moguće za slučaj plaže Sakarun. U radu autora Monioudi i dr. (2017) procjenjuje se da je učinak porasta SRM od 0,5 metara dovoljan za gubitak između 31 do 88 % svih plaža na Egejskom moru. Ukoliko se ukupan POL dobiven za Ploče i Sakarun u iznosu od 5 metara usporedi s prvim kvartilom širina plaža na Jadranu u iznosu od također 5 metara, moguće je očekivati da će upravo ta četvrtina plaža na Jadranu nestati do kraja stoljeća. Taj rezultat je svakako manji od projekcija za Egejsko more, ali i dalje zabrinjavajuć. Pri tome valja istaknuti da su u slučaju Egejskog mora češće pješćane plaže s rijetko kad finim šljunkom. U tom je slučaju za očekivati da će plavljenje obale u budućnosti uzrokovati značajnu štetu, zajedno s

gubitkom sedimentnog tijela plaže nepovratno ka pučini. U slučaju šljunčanih plaža očekivani pomak sedimenta u simulacijama je ipak prema kopnu (Orford i dr., 1991; Shand i dr., 2013), a što može uzrokovati dodatnu štetu na infrastrukturi iza plaže. U tom slučaju gubitak sedimenta može se ljudskim djelovanjem preraspodijeliti nazad na plažu ili će plaža naprosto ostvariti novo ravnotežno stanje pri višoj nadmorskoj visini.

U ovom pristupu upotreba jednodimenzionalnog modela predstavlja značajno pojednostavljenje jer se time izostavlja dužobalni transport koji može imati značajan doprinos. Također, iako se analiza provodila na džepnim šljunčanim plažama male dužine, pomak obalne linije promatran u samo jednoj točki plaže ne mora biti reprezentativan cjelokupnom ponašanju obalne linije duž cijele plaže. Razvojem složenijih numeričkih modela za trodimenzionalni opis šljunčanih plaža predstavljalo bi značajan iskorak u promatranju obalne linije, a pojedini autori rade na razvoju takve nadogradnje XBeach-Gravel modelu (Watanabe i dr., 2025). Osim upotrebom modela veće kompleksnosti, a što bi nužno povećalo i proračunsko vrijeme, potrebu za računalnim resursima, ali i potrebnu kvalitetu i količinu ulaznih podataka dobivenih mjerenjima na plaži, ovdje korišteni pristup mogao bi se poboljšati i povećanjem broja simulacija valnih događaja u nizu. Naime, ovdje je korišten set simulacija valnih događaja s konstantnim H_s koji su međusobno neovisni, dok na plaži valni događaji unutar zimske sezone slijede jedan za drugim i nadovezuju se na promjene profila uzrokovane prethodnim događajem. Ovdje se koristio pristup usrednjavanja simuliranih valnih događaja kako bi se dobio podataka o srednjem pomaku obalne linije koji se može očekivati za odabrani set valnih uvjeta. Drugi i kompleksniji pristup mogao bi biti simuliranje nizova izmjerenih valnih događaja uz mijenjanje srednje razine mora, ali to potom uključuje značajno veći broj simulacija, njihovo međusobno povezivanje i izoliranje doprinosa valnih uvjeta u danom nizu od samog porasta srednje razine mora.

5. Zaključak

Ova disertacija obuhvatila je tri teme: dohranu plaža u Hrvatskoj, kalibraciju, validaciju i verifikaciju numeričkog modela XBeach-Gravel za uvjete na hrvatskim plažama te procjenu pomaka obalne linije na dvije tipične hrvatske plaže - Ploče i Sakarun. Kroz prvu temu, temu dohrane plaža u Hrvatskoj, prikupljeni su i objedinjeni osnovni podatci o plažama što je omogućilo uvid u njihova tipična svojstva. Hrvatske plaže su kratke, šljunčane i/ili stjenovite i relativno uske, a zabilježeno ih je barem 1904, što je u skladu s procjenama drugih autora (Favro i dr., 2013). Taj broj obuhvaća plaže u geološkom smislu, kupališta koja nemaju rastresiti sediment, kao i kombinacije plaža i kupališta. S obzirom na globalno dominantnu upotrebu dohrane pri upravljanju plažama, opravdano je bilo istražiti u kojoj mjeri se takva praksa provodi u Hrvatskoj te mogu li se hrvatske prakse usporediti s europskima. Pouzdano se dohranjuje nešto više od osmine plaža u Hrvatskoj, a provedba dohrane na tim plažama je učestala - u prosjeku se dohranjuju svake druge godine. To podcrtava razlike između europskih i hrvatskih praksi - europske zemlje opisane u radu autora Hanson i dr., 2002 imaju barem dvostruko duže razdoblje između dvije dohrane. U prilog razlikama ide i količina upotrijebljenoga materijala po metru obalne linije u Hrvatskoj, a koja je između jednog i dva reda veličine manja nego u europskim projektima. Hrvatska po te dvije metrike značajno odstupa od prakse u ostalim zemljama. Time se zaključuje prvo istraživačko pitanje ove disertacije - je li praksa dohrane u Hrvatskoj i Europi jednaka? Odgovor je da nije, međutim o točnim uzrocima tih razlika ovaj rad ne nudi konačan odgovor - potrebno je uvažiti da je dohrana blisko isprepletena s potrebama posjetitelja i korisnika plaže, turističke industrije, ali i razvoja obalnog područja te ispitati provodi li se u Hrvatskoj dohrana plaža zbog erozije ili turista. Poznavajući tendenciju džepnih šljunčanih plaža za rotacijom i akumulacijom materijala iznad srednje razine mora (Orford i dr., 1991; Pranzini i dr., 2013), moguće je naslutiti da se ti fenomeni koriste kao opravdanje da se uz poravnavanje plaža za ugodu posjetitelja izvrši i dohrana plaža. Rezultati i podatci prikupljeni o plažama i dohrani u ovom radu predstavljaju pregled situacije od 2015. do 2019. godine i temeljeni su na podacima dostavljenim od 130 općina i 7 županija, a čiji metodološki pristupi nisu ujednačeni. U iščekivanju nacionalnog inventara plaža i dohrana, nadogradnja ovih podataka satelitskim mjerenjima može dati dodatan uvid u stanje na hrvatskim plažama.

U Hrvatskoj izostaje donošenje odluka na temelju planova i stručnih podloga kad je u pitanju upravljanje plažama. To nije značajno odstupanje od nekih drugih zemalja, ali značajna razlika jest u sastavu plaža na hrvatskom Jadranu (džepne šljunčane plaže) kao i u valnim uvjetima

koji prevladaju u Hrvatskoj. Šljunčane plaže općenito su slabije zastupljene u istraživanjima u odnosu na pješčane plaže. Za njih je na raspolaganju manje numeričkih i empirijskih modela na čijim se rezultatima mogu donositi odluke u upravljanju obalama. Numerički model XBeach-Gravel jedini je numerički model namijenjen isključivo šljunčanim plažama za procjenu morfoloških promjena na tijelu plaže uslijed olujnih događaja. Model je jednostavan za korištenje, otvorenog koda, jednodimenzionalan, tj. isključivo namijenjen poprečnom transportu sedimenta, a posljedično i brz. Međutim, model je do sada korišten za simulaciju pretežito intenzivnijih valnih uvjeta od onih kakvi prevladavaju na Jadranu, te je za taj raspon valnih visina i vršnih perioda dao dobro slaganje s mjerenjima. Do sada nije korišten za slučaj blage valne klime kakva je prisutna na hrvatskom obalnom dijelu Jadrana, a upravo je to druga tema ovog rada: kalibracija, validacija, verifikacija i korištenje modela XBeach-Gravel za uvjete na hrvatskom Jadranu. U radu su stoga određeni koeficijenti potrebni za kalibraciju modela za uvjete u valnom kanalu u Hannoveru i za plažu Ploče, a u oba slučaja su valne visine bile ispod tri metra. Pokazalo se da uz kalibraciju model može postići zadovoljavajuće rezultate upravo za blage valne uvjete koji mogu parirati rezultatima koje je model postigao za snažnije valne uvjete u drugim radovima (McCall i dr., 2015; Monioudi i dr., 2017; Ions i dr., 2021). Tim zaključkom pozitivno je odgovoreno i na drugo istraživačko pitanje ovog rada: može li model opisati pomak sedimenta na šljunčanoj plaži Ploče za tipične valne uvjete u trenutnoj klimi. Provedeni postupak kalibracije i validacije modela detaljno je opisan, te se kao takav može koristiti kao referentna točka za buduće stručne analize i istraživanja s namjerom da se odluke o upravljanju plažama na hrvatskom Jadranu donose u skladu sa stručnom podlogom potkrijepljenom XBG modelom. Ograničenje ovog pristupa je što je postupak kalibracije ovisan o dostupnosti kvalitetnih mjerenja, a ovdje je proveden samo za plažu Ploče, te se kao takav treba proširiti daljnjim istraživanjem na drugim plažama.

Posljednja tema ovog rada baca pogled na budući porast srednje razine mora koji će značajno utjecati na ekstremne razine mora prilikom olujnih događaja. Time će očekivani porast SRM i od 0,8 m do kraja stoljeća nedvojbeno staviti dodatan pritisak na šljunčane plaže na Jadranu, a u ovom slučaju razmotreni su primjeri plaža Ploče i Sakarun. Dio najužih plaža postat će dugoročno potopljen pri novoj srednjoj razini mora, a olujni događaji nastupat će pri višoj razini mora, iako se valni uvjeti na Jadranu neće značajno mijenjati. Postavilo se pitanje hoće li pri takvim uvjetima nove visoke srednje razine mora nastupiti povlačenje obalne linije ka kopnu tijekom olujnih događaja na ove dvije plaže. Modelom XBeach-Gravel izvršen je niz simulacija s različitim valnim uvjetima (H_s , T_p i posljedično s_0) pri različitim očekivanim porastima srednje razine mora. Usrednjavanjem pomaka koji je nastupio zbog porasta SRM (dugoročna komponenta pomaka) i pomaka zbog djelovanja olujnog događaja (kratkoročna komponenta pomaka) ukazuje se da će doći do povlačenja obalne linije ka kopnu za ispitane valne uvjete. U najgorem scenariju (RCP8.5) pomak će oduzeti približno 5,5 - 6,5 m ili trećinu postojećih širina plaža Ploče i Sakarun. Pri tome se sediment pretežito pomiče ka kopnu, stvarajući višu bermu, a u skladu s postojećim očekivanjem za šljunčane plaže (Orford i dr., 1991). Taj učinak pokazao

se posebno izraženim za slučaj valova niske strmosti (s_0 od 0,01) ispitanih na plaži Sakarun, ali i općenito za valove niže strmosti. Takvo ponašanje uzdizanja krune plaže predstavlja problem posebice za plaže gdje je prostor obale iza njih izgrađen i ne dopušta prirodnu migraciju plaže na više nadmorske razine, kao što je to slučaj plaže Ploče, ali i brojnih urbanih plaža u Hrvatskoj. Istovremeno, gubitak 5 metara širine plaže bio bi devastirajuć za hrvatske plaže čiji je medijan širine oko 7 m. Uzdizanje krune plaže, odnosno sediment koji će se transportirati na vrh plaže sa sobom nosi i opasnost za infrastrukturu iza plaže, a posebice jer će u budućnosti nastup ekstremnih razina mora biti sve češći i da će ERM biti značajno više od današnjih (Vousdoukas i dr., 2017). Ovi rezultati su u skladu s rezultatima za Egejsko more (Monioudi i dr., 2017) gdje je prognozirano značajno veći gubitak za pješčane plaže, ali je i rezultat dobiven tamo pouzdaniji zbog upotrebe više dostupnih modela za pješčane plaže, a i zbog upotrebe značajno većeg niza simulacija. Daljnjim radom simuliranja pojedinih plaža s nizom valnih događaja, na više profila duž plaže za bolji opis položaja obalne linije ili razvojem i upotrebom višedimenzionalnih modela, ovi rezultati se mogu nadograditi. Usprkos tome, ovdje dobiveni procijenjeni gubitak širine plaža Ploče i Sakarun znak je upozorenja da plažama u Hrvatskoj prijeti vrlo izvjesna migracija uz kopno, a što neće biti moguće u brojnim urbanim sredinama i potencijalno može dovesti do gubitka tih plaža.

U konačnici, rezultati dobiveni u ovoj disertaciji ukazuju na vrlo složenu međuovisnost između šljunčanih plaža i valnih uvjeta na Jadranu, budućeg porasta srednje razine mora te potreba u turizmu. Za slučaj hrvatskog Jadrana potrebno je više intenzivnog istraživanja kako bi se te međuovisnosti bolje razumjele, posebno utjecaj dohrane plaža i razvoja obalnog područja i turizma, ali i kako bi se znanstvenim radom potkrijepile odluke u upravljanju plažama u Hrvatskoj.

Bibliografija

- Almeida, L. P., Masselink, G., McCall, R. T. i Russell, P. (2017): Storm overwash of a gravel barrier: Field measurements and XBeach-G modelling. en. *Coastal Engineering* 120, str. 22–35.
- Anthony, E. (2021): Beach Erosion. Str. 234–246.
- Anthony, E., Cohen, O. i Sabatier, F. (2011): Chronic offshore loss of nourishment on Nice beach, French Riviera: A case of over-nourishment of a steep beach?: *Coastal Engineering* 58.4, str. 374–383.
- Anthony, E., Marriner, N. i Morhange, C. (2014): Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000. years: From progradation to destruction phase?: *Earth-Science Reviews* 139, str. 336–361.
- Armstrong, S. B., Lazarus, E. D., Limber, P. W., Goldstein, E. B., Thorpe, C. i Ballinger, R. C. (2016): Indications of a positive feedback between coastal development and beach nourishment. en. *Earth's Future* 4.12, str. 626–635.
- Athanasiou, P., Dongeren, A. van, Giardino, A., Voudoukas, M., Gaytan-Aguilar, S. i Ranasinghe, R. (2019): Global distribution of nearshore slopes with implications for coastal retreat. English. *Earth System Science Data* 11.4, str. 1515–1529.
- Beakawi Al-Hashemi, H. M. i Baghabra Al-Amoudi, O. S. (2018): A review on the angle of repose of granular materials. en. *Powder Technology* 330, str. 397–417.
- Belušić Vozila, A., Güttler, I., Ahrens, B., Obermann-Hellhund, A. i Telišman Prtenjak, M. (2019): Wind Over the Adriatic Region in CORDEX Climate Change Scenarios. en. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124.1, str. 110–130.
- Belušić Vozila, A., Telišman Prtenjak, M. i Güttler, I. (2021): A Weather-Type Classification and Its Application to Near-Surface Wind Climate Change Projections over the Adriatic Region. en. *Atmosphere* 12.8, str. 948.
- Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E. i Sclavo, M. (2012): Wave climate of the Adriatic Sea: a future scenario simulation. en. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12.6, str. 2065–2076.
- Bergillos, R. J., Masselink, G. i Ortega-Sánchez, M. (2017): Coupling cross-shore and longshore sediment transport to model storm response along a mixed sand-gravel coast under varying wave directions. en. *Coastal Engineering* 129, str. 93–104.

- Bertoni, D. i Sarti, G. (2011): On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy. *Geomorphology* 130.3, str. 244–254.
- Bird, E. C. F. (1996): *Beach management*. eng. Chichester ; New York : John Wiley.
- Bogovac, T., Carević, D., Bujak, D. i Miličević, H. (2023a): Application of the XBeach-Gravel Model for the Case of East Adriatic Sea-Wave Conditions. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 11.3, str. 680.
- Bogovac, T., Carević, D., Bujak, D. i Novaković, V. (2023b): Analiza dohranjivanja i nasipavanja plaža u Hrvatskoj. *Građevinar* 75.04. Str. 355–365.
- Bonaldo, D., Bucchignani, E., Pomaro, A., Ricchi, A., Sclavo, M. i Carniel, S. (2020): Wind waves in the Adriatic Sea under a severe climate change scenario and implications for the coasts. en. *International Journal of Climatology* 40.12, str. 5389–5406.
- Bouws, E. i WMO, ur. (1998): *Guide to wave analysis and forecasting*. eng. 2. ed. WMO 702. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Brown, S. I., Dickson, M. E., Kench, P. S. i Bergillos, R. J. (2019): Modelling gravel barrier response to storms and sudden relative sea-level change using XBeach-G. en. *Marine Geology* 410, str. 164–175.
- Bruun, P. (1962): Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. EN. *Journal of the Waterways and Harbors Division* 88.1, str. 117–130.
- Bujak, D., Ilić, S., Miličević, H. i Carević, D. (2023): Wave Runup Prediction and Alongshore Variability on a Pocket Gravel Beach under Fetch-Limited Wave Conditions. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 11.3, str. 614.
- Bujan, N., Cox, R. i Masselink, G. (2019): From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. en. *Marine Geology* 417, str. 106012.
- Buscombe, D. i Masselink, G. (2006): Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews* 79.1, str. 33–52.
- Chen, W., Van Der Werf, J. i Hulscher, S. (2023): A review of practical models of sand transport in the swash zone. en. *Earth-Science Reviews* 238, str. 104355.
- Coastal Engineering Research Center (US) (1984): *Shore protection manual*. Sv. 1. US Army Coastal Engineering Research Center.
- Coburn, A. S. (2012): Beach Nourishment in the United States. en. *Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies*. Ur. J. A. G. Cooper i O. H. Pilkey. Dordrecht: Springer Netherlands, str. 105–119.
- Cushman-Roisin, B., Gacic, M., Poulain, P.-M. i Artegiani, A. (2013): *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. en. Springer Science & Business Media.
- Duplančić-Leder, T. i Leder, N. (2010): Obalna crta u infrastrukturi prostornih podataka o moru. hr. *GIS, fotogrametrija i daljinska istraživanja u službi geodezije i geoinformatike*, str. 120.
- Enríquez, A. R., Marcos, M., Álvarez-Ellacuría, A., Orfila, A. i Gomis, D. (2017): Changes in beach shoreline due to sea level rise and waves under climate change scenarios: applica-

- tion to the Balearic Islands (western Mediterranean). en. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17.7, str. 1075–1089.
- Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija (2014): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama na području Šibensko-kninske županije*. hr. Teh. izv. Šibensko – kninska županija.
- Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu Opatija (2015): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama na području Primorsko-goranske županije*. hr. Teh. izv. Primorsko-goranska županija.
- Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu, Opatija (2014): *Akcijski plan za izradu nacionalnog programa uređenja i upravljanja morskim plažama*. Teh. izv. Ministarstvo turizma Republike Hrvatske.
- Farkas, A., Parunov, J. i Katalinić, M. (2016): Wave Statistics for the Middle Adriatic Sea. en. *Journal of Maritime & Transportation Science* 52.1, str. 33–47.
- Favro, S., Kovačić, M. i Perišić, M. (2013): Social and economic forms of beach managing in Croatia. en. Gran Canaria, Spain, str. 91–102.
- Finkl, C. W. (1996): Editorial: What Might Happen to America's Shorelines if Artificial Beach Replenishment is Curtailed: A Prognosis for Southeastern Florida and Other Sandy Regions Along Regressive Coasts. *Journal of Coastal Research* 12.1, str. iii–ix.
- Gilleland, E. i Katz, R. W. (2016): extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software* 72.8, str. 1–39.
- Greene, K. E. (2002): Beach Nourishment: A Review of the Biological and Physical Impacts.
- Groen, P. i Dorrestein, R. (1976): Zeegolven. KNMI Opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied. *Dutch. State Printing Office, The Hague*.
- Hamilton, J., Maddison, D. i Tol, R. (2005): Effects of climate change on international tourism. en. *Climate Research* 29, str. 245–254.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H., Lechuga, A., Spanhoff, R. i Stive, M. (2002): A summary of European experience with shore nourishment. en. *Coastal Engineering* 47.2, str. 237–264.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A. i Spanhoff, R. (2002): Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview. en. *Coastal Engineering* 47.2, str. 81–111.
- Hazen, A. (2013): Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. en. *Volume II State Sanitation: A Review of the Work of the Massachusetts State Board of Health, Volume II*. Harvard University Press, str. 232–248.
- Hydrografski institut Jugoslavenke ratne mornarice (1955): *Razvedenost obale i otoka Jugoslavije*. hr. Hydrografski institut Jugoslovenske ratne mornarice.
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C. i Levermann, A. (2014): Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. en. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.9, str. 3292–3297.

- Hinkel, J., Nicholls, R. J., Vafeidis, A. T., Tol, R. S. i Avagianou, T. (2010): Assessing risk of and adaptation to sea-level rise in the European Union: an application of DIVA. en. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15.7, str. 703–719.
- IGH Urbanizam and Horwath & Horwath Consulting (2015): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama Zadarske županije*. Teh. izv. Zadarska županija.
- Institut za turizam (2015): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama u Istarskoj županiji*. hr. Teh. izv. Istarska županija.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2022): *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. en. 1 izdanje. Cambridge University Press.
- Ions, K., Karunarathna, H., Reeve, D. E. i Pender, D. (2021): Gravel Barrier Beach Morphodynamic Response to Extreme Conditions. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 9.2, str. 135.
- Jamal, M. H., Simmonds, D. J. i Magar, V. (2014): Modelling gravel beach dynamics with XBeach. *Coastal Engineering* 89, str. 20–29.
- Jennings, R. i Shulmeister, J. (2002): A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology* 186.3, str. 211–228.
- Jiménez, J. A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I. i Guillén, J. (2012): Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958–2008. en. *Geomorphology* 143-144, str. 24–33.
- Juračić, M., Benac, Č., Pikelj, K. i Ilić, S. (2009): Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). *Geomorphology*. Coastal vulnerability related to sea-level rise 107.1, str. 90–99.
- Korres, G., Ravdas, M., Zacharioudaki, A., Denaxa, D. i Sotiropoulou, M. (2021): *Mediterranean Sea Waves Reanalysis (CMEMS Med-Waves, MedWAM3 system): MEDSEA MULTIYEAR WAV 006 012*.
- Kovačić, M., Srećko, F. i Perišić, M. (2010): The issue of coastal area management in Croatia : beach management. en. *Academica Turistica* 3.1/2, str. 53–63.
- Kružić, P., Pikelj, K., Bezik, D., Ankon, P. i Carević, D. (2022): Procjena utjecaja nadohrane plaža na morski okoliš. hr. Str. 44–46.
- Leatherman, S. P. (2001): Chapter 8 Social and economic costs of sea level rise. en. *International Geophysics*. Sv. 75. Elsevier, str. 181–223.
- Leder, N., Smirčić, A. i Vilibić, I. (1998): Extreme values of surface wave heights in the Northern Adriatic. en. 15.
- Lionello, P., Mufato, R. i Tomasin, A. (2005): Sensitivity of free and forced oscillations of the Adriatic Sea to sea level rise. en. *Climate Research* 29, str. 23–39.
- Lionello, P., Cavaleri, L., Nissen, K., Pino, C., Raicich, F. i Ulbrich, U. (2012): Severe marine storms in the Northern Adriatic: Characteristics and trends. en. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 40-41, str. 93–105.

- Lionello, P., Elvini, E. i Nizzero, A. (2003): Ocean waves and storm surges in the Adriatic Sea: intercomparison between the present and doubled CO₂ climate scenarios. it.
- Lončar, G., Carević, D., Ilić, S., Krvavica, N. i Kalinić, F. (2020): Morphodynamics of the gravel beach Ploče in intense sirocco conditions. hr. *Hrvatske vode* 28.113, str. 205–216.
- Lončar, G., Carević, D. i Paladin, M. (2014): Analiza valnih deformacija ispred Zagrebačke obale - Luka Rijeka. hr. *Hrvatske vode* 22.90, str. 327–336.
- Lončar, G., Kalinić, F., Carević, D. i Bujak, D. (2021): Numerical modelling of the morphodynamics of the Ploče gravel beach in Rijeka. en. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS* 12.23, str. 33–48.
- Lončar, G., Krvavica, N., Šepić, J., Bekić, D., Gašparović, M. i Kulić, T. (2022): Potencijal primjene javno dostupnih baza podataka u svrhu procjene opasnosti od poplava mora u priobalnim gradovima Republike Hrvatske. hr. *Hrvatske vode* 30.121, str. 185–200.
- López de San Román-Blanco, B., Coates, T. T., Holmes, P., Chadwick, A. J., Bradbury, A., Baldock, T. E., Pedrozo-Acuña, A., Lawrence, J. i Grüne, J. (2006): Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial results. en. *Coastal Engineering* 53.4, str. 349–362.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G. i Aarninkhof, S. (2018): The State of the World's Beaches. en. *Scientific Reports* 8.1, str. 6641.
- Marchand, P. i Gill, D. (2023): *waver: Calculate Fetch and Wave Energy*.
- Marcos, M., Tsimplis, M. N. i Shaw, A. G. P. (2009): Sea level extremes in southern Europe. en. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114.C1.
- Marin, V., Palmisani, F., Ivaldi, R., Dursi, R. i Fabiano, M. (2009): Users' perception analysis for sustainable beach management in Italy. en. *Ocean & Coastal Management* 52.5, str. 268–277.
- Masselink, G., McCall, R. T., Poate, T. i Geer, P. van (2014): Modelling storm response on gravel beaches using XBeach-G. en. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* 167.4, str. 173–191.
- Masselink, G., Russell, P., Blenkinsopp, C. i Turner, I. (2010): Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach. *Marine Geology* 274.1, str. 50–68.
- McCall, R. T. (2015): *Process-based modelling of storm impacts on gravel coasts*. en. Plymouth University. Doktorska disertacija.
- McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T., Roelvink, D., Melo de Almeida, L. P., Davidson, M. i Russell, P. (2014): Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. en. *Coastal Engineering* 91, str. 231–250.
- McCall, R. T., Masselink, G., Roelvink, D., Russell, P., Davidson, M. i Poate, T. (2012): Modelling overwash and infiltration on gravel barriers. en. *Coastal Engineering Proceedings* 33, str. 34–34.

- McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T., Roelvink, J. i Almeida, L. (2015): Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G. en. *Coastal Engineering* 103, str. 52–66.
- Međugorac, I., Pasarić, M. i Güttler, I. (2021): Will the wind associated with the Adriatic storm surges change in future climate? en. *Theoretical and Applied Climatology* 143.1-2, str. 1–18.
- Miličević, H., Carević, D., Bujak, D., Lončar, G. i Tadić, A. (2025): Storm-Induced Evolution on an Artificial Pocket Gravel Beach: A Numerical Study with XBeach-Gravel. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 13.7, str. 1209.
- Monioudi, I. N., Velegrakis, A. F., Chatzipavlis, A. E., Rigos, A., Karambas, T., Vousdoukas, M. I., Hasiotis, T., Koukourouvli, N., Peduzzi, P., Manoutsoglou, E., Poulos, S. E. i Collins, M. B. (2017): Assessment of island beach erosion due to sea level rise: the case of the Aegean archipelago (Eastern Mediterranean). en. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17.3, str. 449–466.
- Monioudi, I. N., Velegrakis, A. F., Chatzistratis, D., Vousdoukas, M. I., Savva, C., Wang, D., Bove, G., Mentaschi, L., Paprotny, D., Morales-Nápoles, O., Chatzipavlis, A. E., Hasiotis, T. i Manoutsoglou, E. (2023): Climate change - induced hazards on touristic island beaches: Cyprus, Eastern Mediterranean. English. *Frontiers in Marine Science*.
- Narodne Novine 8/2012 (2012): *Zakon o potvrđivanju Protokola o integralnom upravljanju obalnim područjem Sredozemlja*. Zagreb.
- Narodne Novine 83/2023 (2023): *Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama*. Zagreb.
- National Research Council, ur. (1995): *Beach Nourishment and Protection*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nel, R., Campbell, E. E., Harris, L., Hauser, L., Schoeman, D. S., McLachlan, A., Du Preez, D. R., Bezuidenhout, K. i Schlacher, T. A. (2014): The status of sandy beach science: Past trends, progress, and possible futures. en. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 150, str. 1–10.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J. i Nicholls, R. J. (2015): Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. en. *PLOS ONE* 10.3, e0118571.
- Niesing, H. (2005): EUROSION: Coastal erosion measures, knowledge and results acquired through 60 studies.
- Orford, J. D., Carter, R. W. G. i Forbes, D. L. (1991): Gravel Barrier Migration and Sea Level Rise: Some Observations from Story Head, Nova Scotia, Canada. *Journal of Coastal Research* 7.2, str. 477–489.
- Orford, J. D. i Anthony, E. (2011): Extreme events and the morphodynamics of gravel-dominated coastal barriers: Strengthening uncertain ground. *Marine Geology* 290.1, str. 41–45.
- Orsini, K. i Ostojić, V. (2018): Croatia's Tourism Industry: Beyond the Sun and Sea. en. *European Economy - Economic Briefs*.

- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Chadwick, A. J. i Silva, R. (2007): A numerical–empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand–gravel beaches. *Marine Geology* 241.1, str. 1–18.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Otta, A. K. i Chadwick, A. J. (2006): On the cross-shore profile change of gravel beaches. en. *Coastal Engineering* 53.4, str. 335–347.
- Phillips, M. R. i Jones, A. L. (2006): Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management* 27.3, str. 517–524.
- Pikelj, K., Godec, P. i Cvetko Tešović, B. (2022a): Sedimentological consequences of Posidonia Oceanica banquette removal: Sakarun beach case study (Dugi otok, Croatia). en. *Ninth International Symposium “Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: Problems and Measurement Techniques”*. Ur. L. Bonora, D. Carboni, M. De Vincenzi i G. Matteucci. 1 izdanje. Florence: Firenze University Press, str. 83–92.
- Pikelj, K. i Juračić, M. (2013): Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast. *Journal of Coastal Research* 29.4, str. 944–957.
- Pikelj, K., Uroš, A., Kolda, A., Gavrilović, A. i Kapetanović, D. (2022b): Sediment Characteristics—A Key Factor for Fish Farm Site Selection: Examples from Croatia. en. *Minerals* 12.6, str. 696.
- Pilkey, O. H. i Cooper, J. A. G. (2014): Are natural beaches facing extinction?: *Journal of Coastal Research* 70, str. 431–436.
- Poate, T., Masselink, G., Davidson, M., McCall, R. T., Russell, P. i Turner, I. (2013): High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions. *Marine Geology* 342, str. 1–13.
- Poate, T., McCall, R. T. i Masselink, G. (2016): A new parameterisation for runup on gravel beaches. en. *Coastal Engineering* 117, str. 176–190.
- Poulos, S. E., Plomaritis, T. A., Ghionis, G., Collins, M. B. i Angelopoulos, C. (2012): The Role of Coastal Morphology in Influencing Sea Level Variations Induced by Meteorological Forcing in Microtidal Waters: Examples from the Island of Crete (Aegean Sea, Greece). *Journal of Coastal Research* 29.2, str. 272–282.
- Powell, K. A. (1990): *Predicting short term profile response for shingle beaches*. en. Wallingford, Oxfordshire: Hydraulics Research Wallingford.
- Pranzini, E., Rosas, V., Jackson, N. L. i Nordstrom, K. F. (2013): Beach changes from sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood. en. *Geomorphology* 199, str. 36–47.
- Razvojna agencija Ličko-senjske županije – LIRA (2017): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama na području Ličko-senjske županije*. hr. Teh. izv. Ličko-senjska županija.
- Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A. van, Thiel de Vries, J. van, McCall, R. T. i Lescinski, J. (2009): Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. en. *Coastal Engineering* 56.11-12, str. 1133–1152.

- SAFEGE (2015): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama na području Splitsko-dalmatinske županije*. hr. Teh. izv. Splitsko-dalmatinska županija.
- Seenath, A. i Dale, J. (2024): On the Bruun Rule suitability for modelling shoreline change. en. *Ocean & Coastal Management* 255, str. 107237.
- Shand, T., Reinen, .- R., Kench, P., Ivamy, M., Knook, P. i Howse, B. (2015): Methods for probabilistic coastal erosion hazard assessment. *Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference*, str. 814–820.
- Shand, T., Shand, R., Reinen, .- R., Carley, J. i Cox, R. (2013): A review of shoreline response models to changes in sea level. *Coasts and Ports 2013: 21st Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 14th Australasian Port and Harbour Conference*, str. 676–684.
- Small, C. i Nicholls, R. J. (2003): A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research* 19.3, str. 584–599.
- Smit, P., Stelling, G., Roelvink, D. J., Thiel de Vries, J., McCall, R. T., Dongeren, A. van, Zwinkels, C. i Jacobs, R. (2010): XBeach: Non-hydrostatic model: Validation, verification and model description.
- Speybroeck, J., Bonte, D., Courtens, W., Gheskiere, T., Grootaert, P., Maelfait, J.-P., Mathys, M., Provoost, S., Sabbe, K., Stienen, E. W., Lancker, V. V., Vincx, M. i Degraer, S. (2006): Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. en. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 16.4, str. 419–435.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A. i Sallenger, A. H. (2006): Empirical parameterization of setup, swash, and runup. en. *Coastal Engineering* 53.7, str. 573–588.
- Surić, M., Juračić, M., Horvatinčić, N. i Krajcar Bronić, I. (2005): Late Pleistocene–Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic Coast (Croatia). *Marine Geology* 214.1, str. 163–175.
- Tadić, A., Ružić, I., Krvavica, N. i Ilić, S. (2022): Post-Nourishment Changes of an Artificial Gravel Pocket Beach Using UAV Imagery. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 10.3, str. 358.
- Trames Consultants (2015): *Regionalni program uređenja i upravljanja morskim plažama na području Dubrovačko-neretvanske županije*. hr. Teh. izv. Dubrovačko-neretvanska županija.
- Van Rijn, L. (2007): Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. en. *Journal of Hydraulic Engineering* 133.6, str. 649–667.
- Van Rijn, L. (2011): Coastal erosion and control. en. *Ocean & Coastal Management* 54.12, str. 867–887.
- Van Rijn, L., Walstra, D., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S. i Sierra, J. (2003): The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. en. *Coastal Engineering* 47.3, str. 295–327.

- Vilibić, I., Leder, N. i Smirčić, A. (2000): Storm surges in the Adriatic Sea: an impact on the coastal infrastructure. hr. Str. 483.
- Viličić, D. (2014): Specifična oceanološka svojstva hrvatskog dijela Jadrana. hr. *Hrvatske Vode* 90, str. 297–314.
- Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. i Matičec, D. (2002): The Karst Dinarides are Composed of Relics of a Single Mesozoic Platform: Facts and Consequences. en. *Geologia Croatica* 55.2, str. 171–183.
- Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. i Matičec, D. (2005): Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220.3, str. 333–360.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M. i Feyen, L. (2017): Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. en. *Earth's Future* 5.3, str. 304–323.
- Watanabe, M., Masselink, G., Ishimura, D., Yamada, M. i Switzer, A. D. (2025): Numerical modelling of gravel transportation by a tsunami with the extended XBeach-G. *Applied Ocean Research* 164, str. 104765.
- Williams, J. J., Buscombe, D., Masselink, G., Turner, I. L. i Swinkels, C. (2012): Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures. en. *Coastal Engineering*. BARDEX: a large-scale laboratory study of gravel barrier dynamics 63, str. 3–12.
- Zacharioudaki, A., Ravdas, M., Korres, G. i Gualtieri, L. (2024): *Quality information document for for MED MFC Products MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012*. en. Teh. izv. Copernicus Marine Service.
- Žaja, J. (2023): *Turizam u brojkama 2022*. hr. Teh. izv. Ministarstvo turizma i sporta Republike Hrvatske.

Web stranice

Adamić (2024): *Bazeni Kantrida*. URL: <http://forum.lokalpatrioti-rijeka.com/viewtopic.php?p=34397#p34397> (pogledano 28.5.2024).

XBeach-G GUI User Manual (2024). URL: <https://usermanual.wiki/Pdf/XBEACHGravelUserManual.452758683/view> (pogledano 2.1.2024).

Dodatak A: Parametri modela korišteni pri kalibraciji

Za potrebe simulacije valnog događaja numeričkim modelom potrebno je namjestiti niz različitih parametara u modelu. U sljedećoj tablici [A.1](#) navedeni su svi parametri koji su korišteni za izvršenje kalibracije numeričkog modela za slučaj valnog kanala u Hannoveru opisanog u poglavlju [3.2.3](#), potom za slučaj kalibracije s dva valna događaja G12_G13_K1 i G13_G14_K3 u poglavlju [3.2.5](#) zajedno s postavkama koje su korištene za validaciju modela pri valnom događaju G17_G18_K3.

Tablica A.1: Tablica sa svim parametrima modela XBeach-Gravel podešenim u grafičkom sučelju modela za izvršenje simulacija potrebnih za kalibraciju modela za slučaj testova u valnom kanalu u Hannoveru (stupac GWK - Test 1, 2 i 3), za slučaj kalibracije na primjeru plaže Ploče i valnih situacija G12_G13_K1 i G13_G14_K3 i za validaciju za slučaj valnog događaja G17_G18_K3. Nazivi parametara ostavljeni su na engleskom jeziku, kako bi jednoznačno odgovarali parametrima u grafičkom sučelju modela.

Ime parametara (engl.)	GWK - Test 1, 2 i 3	Ploče - G12_G13_K1 i G13_G14_K3	Ploče - G17_G18_K3
Profile parameter setup			
Minimum grid size (m)	0,1	0,1	0,1
Maximum grid size (m)	1	0,5	0,5
Minimum points per wavelength	40	60	60

Tablica se nastavlja na idućoj stranici.

Ime parametara (engl.)	GWK - Test 1, 2 i 3			Ploče - G12_G13_K1 i G13_G14_K3	Ploče - G17_G18_K3
Maximum of- fshore bottom level (m)	0			-2	-4
Coordinates	Konstruirani profil Beach I u GWK i kasniji profili nakon Testova 1 i 2			Geodetska mjerenja 12 i 13	Geodetsko mjerenje 17
Wave parameters setup					
Spectrum type	Unimodal			Unimodal	Unimodal
Gamma	3,3 za sve valove			3,3 za sve valove	3,3 za sve valove
Significant wave height (m)	Test 1	Test 2	Test 3	30-minutni srednjak H_s s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom	30-minutni srednjak H_s s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom
	0,6	1	1,2		
Peak period (s)	Test 1	Test 2	Test 3	30-minutni srednjak T_p s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom	30-minutni srednjak T_p s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom
	3,22	4,14	4,48		
Spreading	10 for all waves			30-minutni srednjak S s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom	30-minutni srednjak S s valeografske plutače za svaki valni događaj i zaglađen 1,5-satnim kliznim srednjakom
Tide parameters setup					
Back boundary water level	Variable			Variable	Variable

Tablica se nastavlja na idućoj stranici.

Ime parametara (engl.)	GWK - Test 1, 2 i 3	Ploče - G12_G13_K1 i G13_G14_K3	Ploče - G17_G18_K3
Offshore water level (m)	4,7 metara tijekom cijele simulacije	30-minutne vrijednosti dobivene interpolacijom između satnih vrijednosti izmjerenih na mareografskoj postaji u Bakru	30-minutne vrijednosti dobivene interpolacijom između satnih vrijednosti izmjerenih na mareografskoj postaji u Bakru
Parameters setup			
Duration (s)	Test 1	Test 2	Test 3
	8 400	7 200	7 800
	68 400 i 91 800		55 800
Initial groundwater level (m)	0	0	0
Bottom aquifer (m)	0	0	0
D50 - Median grain size (m)	0,021	0,02	0,02
Hydraulic conductivity (m/s)	0,01, 0,02, 0,034, 0,048, 0,062, 0,076, 0,09, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5	0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5	0,3
Angle of repose (°)	35	35	35
Sediment transport formula	Van Rijn	Van Rijn	Van Rijn
Inertia Coefficient (C_i)	1	1	1
Transport coeffi- cient (γ)	0,5; 1; 2 i 3	0,25; 0,5; 1 i 1,5	0,25

Dodatak B: Parametri modela korišteni pri procjeni pomaka obalne linije

Tablica B.1: Tablica sa svim parametrima modela XBeach-Gravel podešenim u grafičkom sučelju modela za izvršenje simulacija potrebnih za kalibraciju modela za slučaj simulacija pomaka obalne linije plaža Ploče i Sakarun. Nazivi parametara ostavljeni su na engleskom jeziku, kako bi jednoznačno odgovarali parametrima u grafičkom sučelju modela.

Ime parametara (engl.)	Ploče	Sakarun
Profile parameter setup		
Minimum grid size (m)	0,1	0,1
Maximum grid size (m)	0,5	0,5
Minimum points per wave-length	60	60
Maximum offshore bottom level (m)	-2; -2,5; -3; -4, -5, -6; -7	-4; -5; -6; -6.5; -8; -10; -15; -20
Coordinates	Profil 1, geodetsko mjerenje 17	Profil 5, mjerenje siječanj 2020.
Wave parameters setup		
Spectrum type	Unimodal	Unimodal
Gamma	3,3	3,3
Significant wave height (m)	1; 2; 3	1; 2; 3
Peak period (s)	3,58; 4; 4,62; 5,06; 5,66; 6,2; 6,53; 6,93; 8	4; 4,55; 5,56; 6,67; 7,14; 8,33; 10; 11,11; 14,29
Spreading	10 000	10 000
Tide parameters setup		
Back boundary water level	Variable	Variable

Tablica se nastavlja na idućoj stranici.

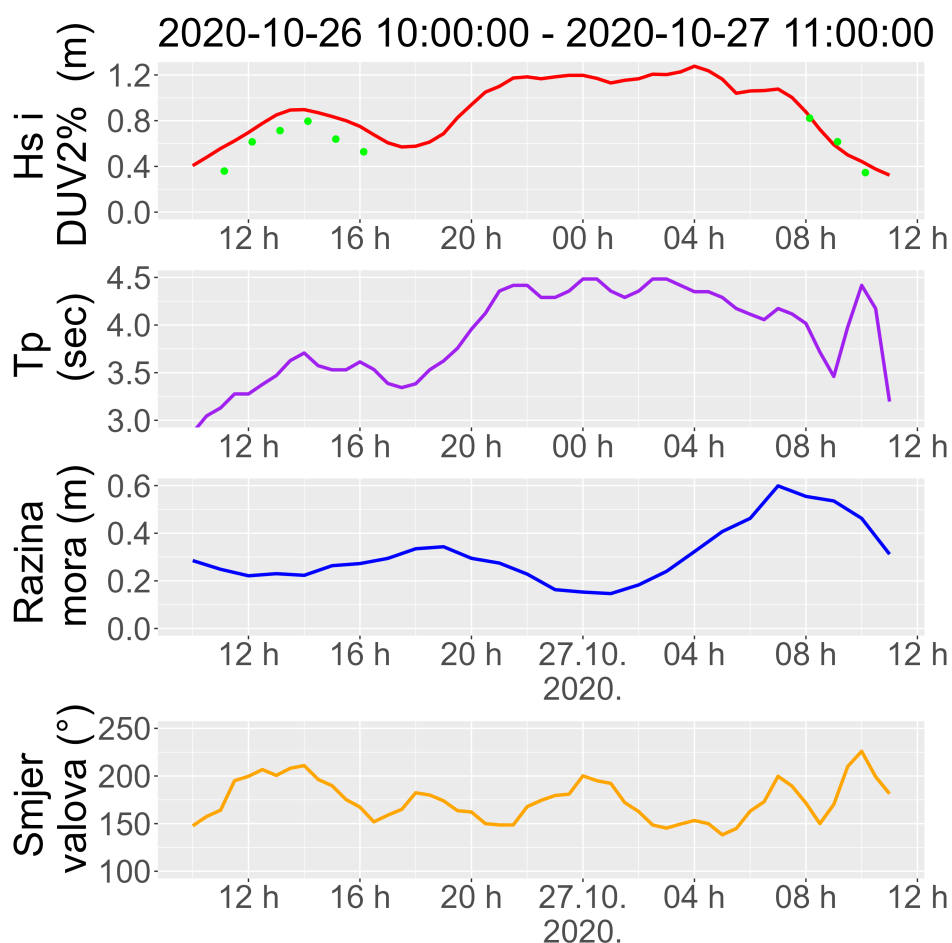
Ime parametara (engl.)	Ploče	Sakarun
Offshore water level (m)	1,08; 1,33; 1,58; 1,28; 1,53; 1,78; 1,63; 1,88; 2,13; 1,92; 2,17; 2,52	0,67; 0,87; 1,22; 1,51
Parameters etup		
Duration (s)	8 h	8 h
Initial groundwater level (m)	0	0
Bottom aquifer (m)	0	0
D50 - Median grain size (m)	0,02	0,05
Hydraulic conductivity (m/s)	0,3	0,3
Angle of repose (°)	35	35
Sediment transport formula	Van Rijn	Van Rijn
Inertia Coefficient (C_i)	1	1
Transport coefficient (γ)	0,25	0,25

Dodatak C: Osjetljivost modela na nagib profila i kut unutarnjeg trenja

Tijekom simulacije olujnog događaja G17_G18_K3, ali i kod simulacija promjene profila nakon valnih događaja u budućnosti, poseban problem predstavlja dio materijala koji se akumulira na dnu profila. Takvo ponašanje nije uočeno u mjerenjima na plaži, a model, usprkos kalibraciji s visokom Brierovom ocjenom, ipak pokazuje gubitak materijala u dubinu koji dominira u rezultatima pomaka obalne linije kada se promatra scenarije olujnih događaja pri budućem porastu srednje razine mora. Istovremeno se fenomen akumulacije materijala u dubini pojavljuje i u slučaju olujnog događaja G13_G14_K3. Međutim, tijekom trajanja cijelog olujnog događaja G13_G14_K3 formira se nekoliko bermi u dubljim dijelovima profila, a koje se tijekom trajanja olujnog događaja ipak preraspodijele na više dijelove plaže. Kako bi se bolje razumio fenomen akumuliranja materijala u dubljim dijelovima plaže (koja se ne vide u mjerenjima, ali model ih producira) napravljena je analiza promjena na profilu tijekom olujnog događaja G13_G14_K3 i na ravnim profilima različitih nagiba i kuta unutarnjeg trenja, kako bi se razmotrio doprinos ta dva svojstva morfodinamičkom odgovoru profila na djelovanje valova.

Tijekom olujnog događaja G13_G14_K3 prikazanog na slici [C.1](#) nastupila je najviša značajna visina valova H_s od 1,35 metara. Pri tome je značajna visina valova rasla od 0,4 do 0,8 metara prva 4 sata (od 10 do 14 sati), potom opadala do 0,6 metara sljedeća 4 sata (od 14 do 18), ponovno rasla na maksimum od 1,35 metara tijekom iduća 4 sata (od 18 do 22) i potom se zadržala na tom iznosu 6 sati (do 4 sata ujutro) i dalje opadala do kraja olujnog događaja.

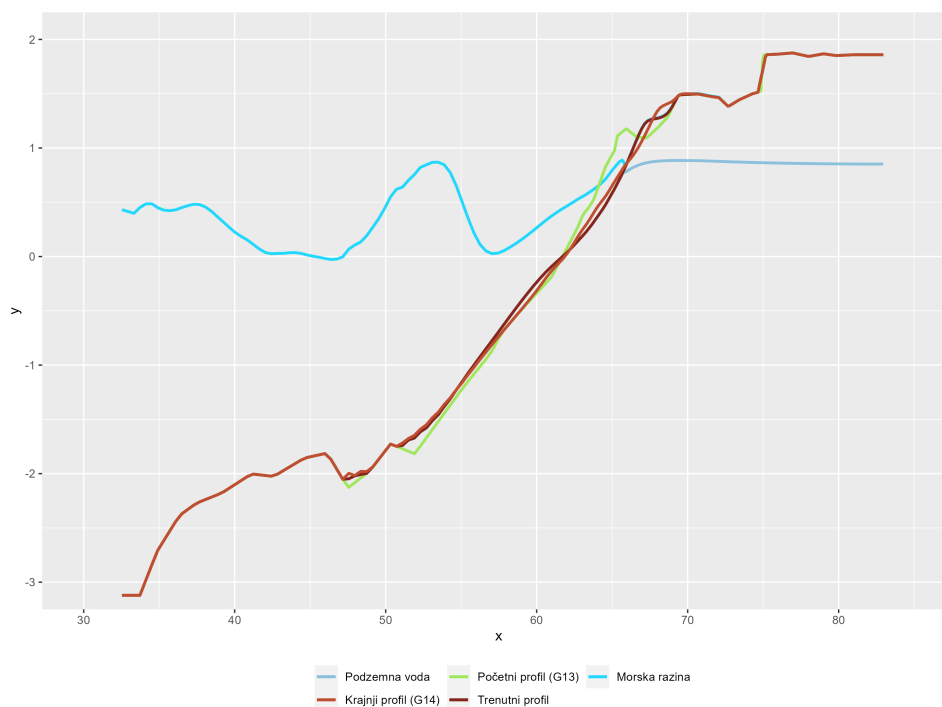
Oko 4 sata ujutro tijekom olujnog događaja model simulira akumulaciju materijala na dubini od 0,5 metara, prikazano na slici [C.2](#) (tamnocrvena linija trenutnog profila je iznad zelene linije početnog profila). Tijekom ostatka simulacije, tj. valnog događaja, model taj akumulirani materijal pomiče s dubine od 0,5 metara na bermu koju formira na približno 1,5 m iznad geodetske nule. Naime, u 4 sata ujutro svjetlocrvena linija koja predstavlja konačni profil poklapa se sa zelenom linijom koja odgovara početnom profilu na -0,5 metara dok se tamnocrvena linija pri 1 metru visine pomiče još više. U vremenu od 4 do 11 sati, valni uvjeti se mijenjaju: značajna visina valova H_s opada s maksimalnih 1,35 na 0,3 metra tijekom preostalih 6 sati simulacije, dok razina mora prva tri sata preostalog dijela simulacije raste do maksimuma od 0,6 metara



Slika C.1. Valni događaj oznake G13_G14_K3.

i potom zadnja 3 sata opada na iznos od 0,3 metra. U tom vremenu postiže se transformacija profila na način da tada nastupa jasna i viša berma (1,5 metara) koja koristi prethodno erodirani materijal s plaže akumuliran na dubljem dijelu profila (-0,5 metara). Takva transformacija poklapa se upravo s opadanjem intenziteta valnih uvjeta te se nameće zaključak da je za pomak prethodno erodiranog materijala u dubinu potreban pad intenziteta valnih uvjeta ili niži valni uvjeti. Tijekom simulacije olujnih događaja u budućnosti korišteni su fiksni valni uvjeti tijekom cijele simulacije, stoga se povratak materijala na bermu s dubljih dijelova profila, a kakav je demonstriran ovdje, nije mogao ostvariti. U prilog tome idu i parametri plaže Ploče.

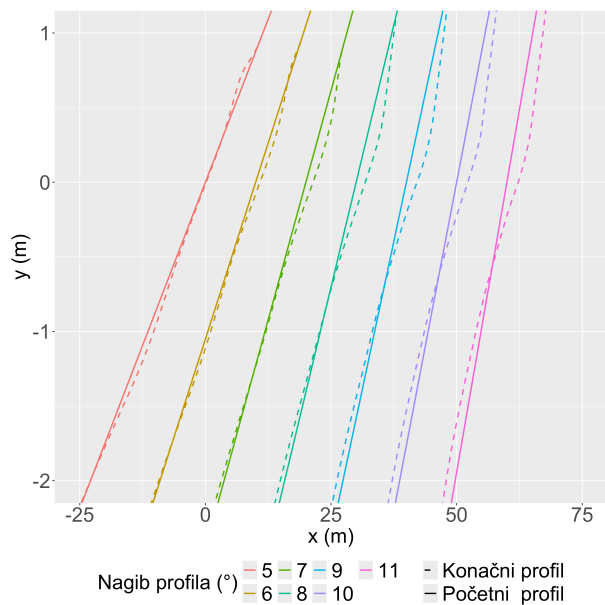
Naime, plaže Ploče i Sakarun, koje su korištene za simulaciju utjecaja valnih događaja na promjenu profila plaže, imaju različite nagibe profila. Tijelo plaže Ploče na kojem prevladavaju promjene profila ima nagib od $10,2^\circ$ dok Sakarun ima nagib od $9,09^\circ$. Nagib profila, u kombinaciji s kutom unutarnjeg trenja materijala na plaži, dijelom određuje i morfološki odgovor plaže na djelovanje valova. Takav zaključak se nameće i iz rezultata simulacija promjene profila nakon valnih događaja u budućnosti: nepromjenjivi valni uvjeti rezultiraju isključivo jednim morfološkim odgovorom. Taj odgovor ovisi o preostalim parametrima plaže, a ovdje nagib i kut unutarnjeg trenja imaju značajnu ulogu.



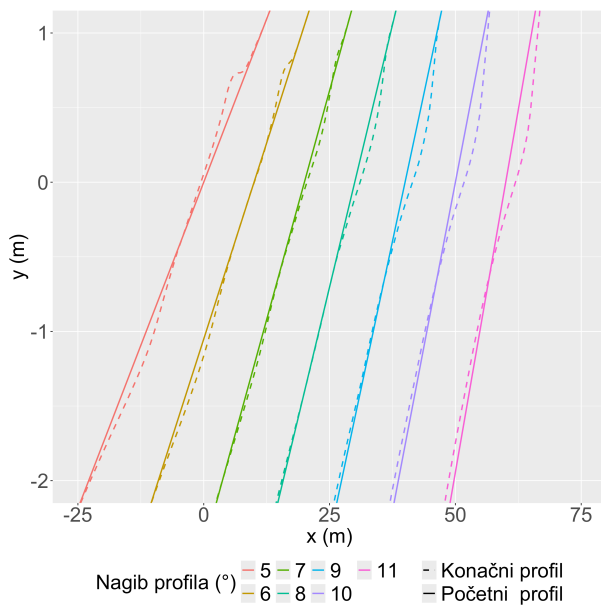
Slika C.2. Promjene na profilu geodetskog mjerenja 13 tijekom olujnog događaja G13_G14_K3 (B.13a) u 4 sata ujutro (15. sat simulacije).

Za ispitivanje utjecaja nagiba profila i kuta unutarnjeg trenja (engl. *angle of repose*, skraćeno AOR, tj. na hrv. KUT), korišteni su ravni profili s nagibima u rasponu od 6° do 11° . Na takve profile model je simulirao utjecaj valnih uvjeta iz Testa 3 u Hannoveru u iznosu značajne visine valova H_s od 1,2 metra i vršnog perioda T_p od 4,48 sekunde. Takvi valni uvjeti primjenjivani su u trajanju od 7800 sekundi, a što odgovara 1000 valova. Izvršene su 63 simulacije s upotrebom različitog kuta unutarnjeg trenja s vrijednostima u rasponu od 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 i 55 stupnjeva.

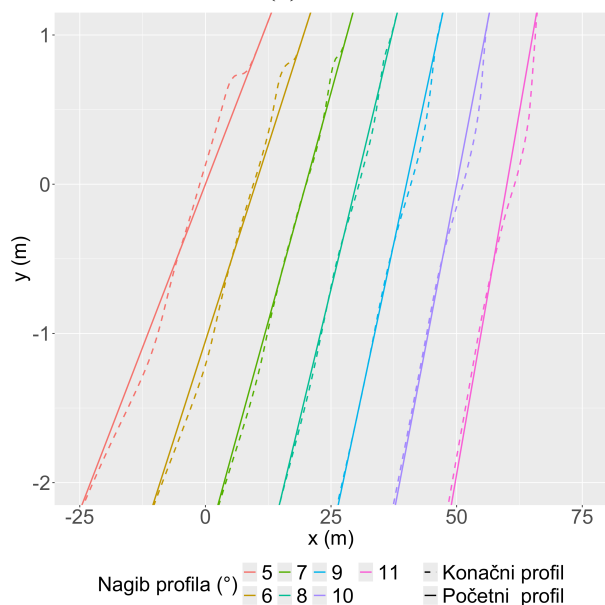
Ovisno o odabiru nagiba profila plaže i zadanom kutu unutarnjeg trenja mijenja se morfološki odgovor plaže na valove. Fiksni valni uvjeti rezultiraju s jednim morfološkim odgovorom te je potrebna promjena valnih uvjeta, drugih parametara plaže ili modela kako bi se promijenio režim odgovora. Za gore zadane valne uvjete, dominantni režim odgovora je stvaranje berme ili erozija plaže, po uzoru na definicije iz (McCall i dr., 2015). Na primjer, takvi režimi se najbolje vide u slučaju na slici C.3i za profil nagiba 5° (crvena boja) kada je odgovor plaže jasna formacija berme, odnosno na istoj slici C.3a za slučaj strmijeg nagiba profila od 11° (magenta) kada nastupa režim erozije plaže.



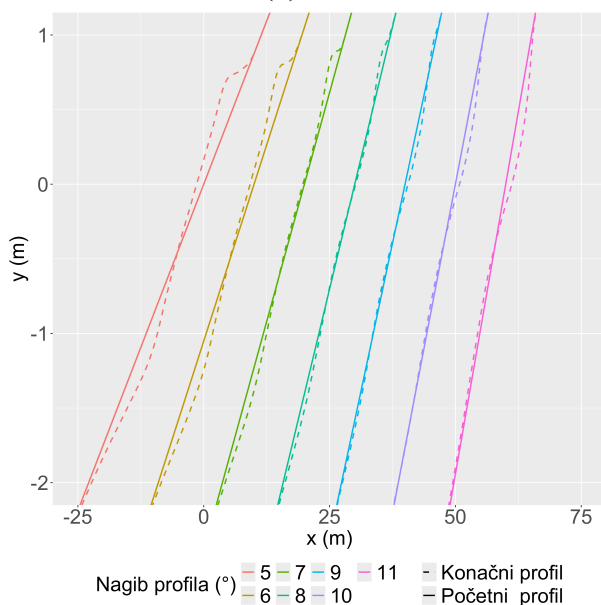
(a) 15 °



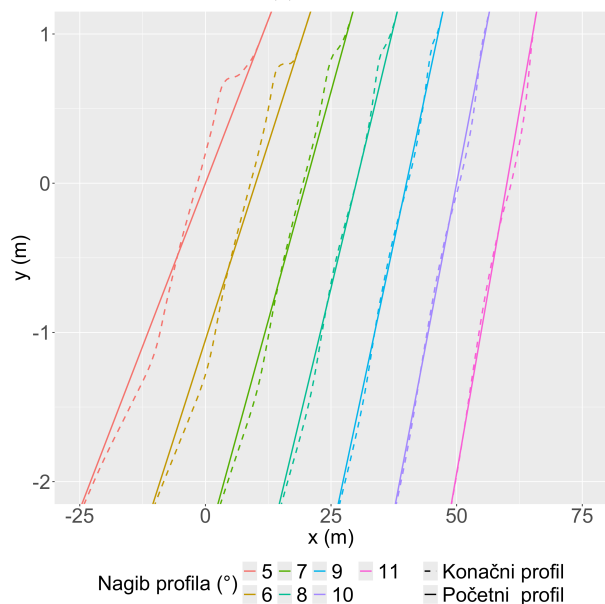
(b) 20 °



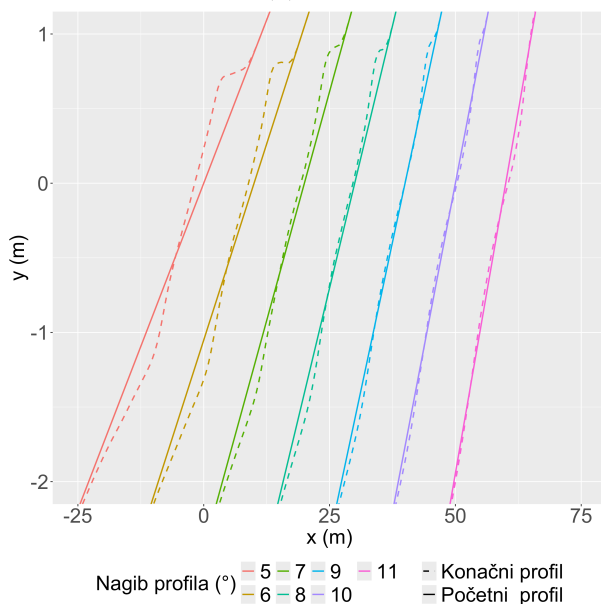
(c) 25 °



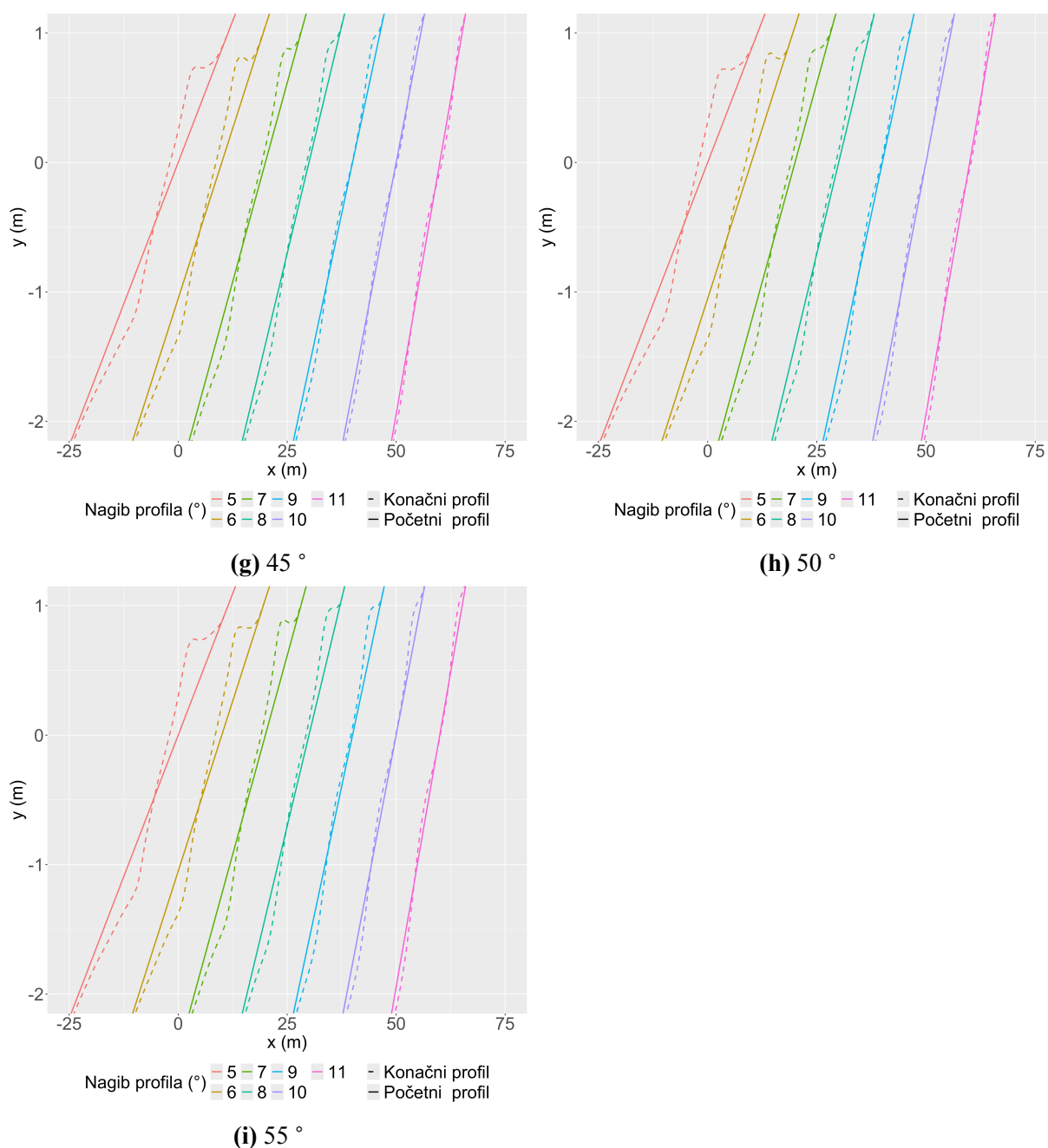
(d) 30 °



(e) 35 °



(f) 40 °



Slika C.3. Promjene na profilima različitih nagiba nakon djelovanja 3000 valova s parametrima H_s od 1,2 metra i T_p od 4.48 sekunde za različito zadan kut unutarnjeg trenja: od 15 ° do 55 °

Promjenom nagiba plaže ili kuta unutarnjeg trenja režim odgovora plaže na djelovanje valova se mijenja. Na slici C.3b porastom nagiba plaže, odgovor se mijenja iz blage formacije berme pri 5 ° u eroziju plaže pri 11 °. Međutim, to dozvoljava i postojanje prijelaznih režima između ova dva krajnja. Na primjer, na slici C.3d za nagib plaže od 9 ° pri kutu unutarnjeg trenja od 30 ° ili na slici C.3f za nagib isti nagib pri KUT-u od 40 °. Tada morfološki odgovor plaže čini niz manjih bermi na profilu koje zbirno nije moguće jednoznačno kategorizirati po prethodnoj dihotomiji. Slično i za slučaj na slici C.3c za nagib plaže od 7 ° pri KUT-u od 25 ° - tada između male novoformirane berme i područja erozije na profilu nastupa značajan razmak.

U slučaj plaže Ploče i Sakarun koje imaju nagibe 9° i 10° , pri kutu unutarnjeg trenja od 35° upravo dolazi do prijelaza iz jednog u drugi režim. Iz tog razloga odgovor plaže Sakarun na valne uvjete rezultira pretežito formiranjem berme na višim razinama plaže, dok plaža Ploče s višim nagibom profila ima kao odgovor pretežito eroziju postojeće berme profila čiji se erodirani materijal akumulira na srednjoj razini mora, oboje pri valnim visinama oko 1 metra H_s , uz mogućnost postojanja i međurežima između ta dva odgovora za plažu Ploče. Posljedično, Ploče pokazuje akumulaciju materijala s više razine profila na srednjoj razini mora što odgovara erozivnom režimu ili međurežimu. Time se objašnjavaju pozitivne vrijednosti (k moru) u kratkoročnom pomaku obalne linije za plažu Ploče u trenutnoj klimi na slikama 4.24, uz napomenu da u prirodi ovaj fenomen neće biti jednako vidljiv, s obzirom da su analize provedene ovdje koristile fiksne valne uvjete kakvi ne prevladavaju u prirodi. Tijekom promjenjivih valnih uvjeta materijal bi se na plaži Ploče imao priliku vratiti nazad na više dijelove plaže, osiguravajući joj stabilnost. Međutim, do kraja stoljeća za očekivati je da pri ekstremnim razinama mora materijal na plaži Ploče i Sakarun dominantno završava na višim razinama profila, što dovodi do erozije materijala na razini buduće srednje razine mora. Blaži valni uvjeti i ekstremne razine mora ne mogu materijal s viših razina profila vratiti na niže dijelove, stoga je za očekivati da će dugoročno prevladati pomak obalne linije prema kopnu koji, u slučaju plaže Ploče, ne ostavlja dovoljno prostora za formiranje nove ili jednake plaže te nastupa *coastal squeeze*.

Životopis



Tonko Bogovac

ISKUSTVO

Stručni savjetnik za klimatske aktivnosti i prirodne nepogode

Grad Zagreb

IX. 2024. ▶ ?

Gradski ured za gospodarstvo, ekološku održivost i strategijsko planiranje.

Predsjednik Vijeća gradske četvrti Novi Zagreb - istok

Grad Zagreb

V. 2021. ▶ IX. 2024.

Vijeće od 19 članova predstavlja 60 000 stanovnika Novog Zagreba - istok.

Asistent

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

II. 2020. ▶ II. 2024.

Na projektu [Beachex](#) ispitivao stabilnost šljunčanih plaža modelom XBeach-Gravel.

OBRAZOVANJE

Interdisciplinarni doktorski studij oceanologije

PMF Zagreb, Geološki odsjek

2019. ▶ 2025.

Istraživao utjecaj budućeg porasta srednje razine mora na šljunčane plaže Jadrana.

Dipl. studij meteorologije i fizičke oceanografije

PMF Zagreb, Geofizički odsjek

2016. ▶ 2019.

Stekao titulu *mag. phys.-geophys.* na modeliranju Lorenzovog energetskog ciklusa.

Preddiplomski studij geofizike

PMF Zagreb, Geofizički odsjek

2012. ▶ 2016.

Stekao titulu *univ. bacc. geophys.*

PUBLIKACIJE I OSTALE AKTIVNOSTI

Bogovac, T. i Carević, D. (2021a): *An overview of beach nourishment in Croatia*. en. Hotplot izlaganje na Young Coastal Scientists and Engineers Conference.

Bogovac, T. i Carević, D. (2021b): Pregled dohranjivanja plaža u Hrvatskoj. hr. 5. *simpozij studenata doktorskih studija PMF-a : knjiga sažetaka*. Prirodoslovno-matematički fakultet. Poster na 5. simpoziju studenata doktorskih studija PMF-a.

- Bogovac, T., Carević, D., Bujak, D., Ilić, S. i Vukovac, M. (2021c): Održivost dohranjivanja plaža u Hrvatskoj. *Zbornik radova 8. Sabora hrvatskih graditelja*. Vodice. Usmeno priopćenje uz publikaciju.
- Bujak, D., Bogovac, T., Carević, D., Ilić, S. i Lončar, G. (2021): Application of Artificial Neural Networks to Predict Beach Nourishment Volume Requirements. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 9.8, str. 786.
- Bujak, D., Carević, D., Kulić, T. i Bogovac, T. (2022): Dependency of the Whitecapping Parameter on Model Resolution Settings in the Eastern Adriatic Sea. hr. *17th International Conference on Water Management and Hydraulic Engineering (WMHE 2022)*, str. 80–87.
- Bogovac, T. i Carević, D. (2023a): *Pomak obalne linije plaže Ploče i Sakarun pri olujnim događajima i budućim ekstremnim razinama mora*. hr. Usmeno izlaganje na IV. znanstveno-stručnom skupu Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora.
- Bogovac, T. i Carević, D. (2023b): *Simulating impacts of rising sea level and storms on gravel beach Ploče*. en. Usmeno izlaganje na 7. simpoziju studenata doktorskih studija PMF-a.
- Bogovac, T., Carević, D., Bujak, D. i Miličević, H. (2023c): Application of the XBeach-Gravel Model for the Case of East Adriatic Sea-Wave Conditions. en. *Journal of Marine Science and Engineering* 11.3, str. 680.
- Bogovac, T., Carević, D., Bujak, D. i Novaković, V. (2023d): Analiza dohranjivanja i nasipavanja plaža u Hrvatskoj. *Građevinar* 75.04. Str. 355–365.
- Bujak, D., Bogovac, T., Carević, D. i Miličević, H. (2023a): Filling Missing and Extending Significant Wave Height Measurements Using Neural Networks and an Integrated Surface Database. en. *Wind* 3.2, str. 151–169.
- Bujak, D., Carević, D., Bogovac, T. i Kulić, T. (2023b): Hindcast of Significant Wave Heights in Sheltered Basins Using Machine Learning and the Copernicus Database. en. *NAŠE MORE : znanstveni časopis za more i pomorstvo* 70.2, str. 103–114.