

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Korenika, R., 2015. Procesi ob stiku razlitja nafte z morsko obalo. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 38 str.

Datum arhiviranja: 29-09-2015

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Korenika, R., 2015. Procesi ob stiku razlitja nafte z morsko obalo. B.Sc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 38 pp.

Archiving Date: 29-09-2015

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO

Kandidatka:

**ROMINA KORENIKA**

**PROCESI OB STIKU RAZLITJA NAFTE Z MORSKO  
OBALO**

Diplomska naloga št.: 44/B-VOI

**OIL SPILL STRANDING PROCESSES**

Graduation thesis No.: 44/B-VOI

**Mentor:**

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 09. 07. 2015

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana Romina Korenika izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Procesi ob stiku razlitja nafte z morsko obalo«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, julij 2015

Romina Korenika

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>UDK:</b>             | <b>502.51(26):504.5:665.6(043.2)</b>                         |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Romina Korenika</b>                                       |
| <b>Mentor:</b>          | <b>Izr. prof. dr. Dušan Žagar</b>                            |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Procesi ob stiku razlitja nafte z morsko obalo</b>        |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | <b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>               |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>38 str., 10 pregl., 17 sl., 13 en.</b>                    |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>nafta, razlitje, odlaganje, sproščanje, Tržaški zaliv</b> |

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi obravnavamo procese odlaganja in sproščanja nafte na obalo in z obale v primeru naftnega razlitja. Prikazali smo različne načine določanja maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali in ugotovili, da je ta odvisna predvsem od tipa obale in vrste nafte. Na podlagi zasnovane klasifikacije tipov obale v Sloveniji smo izbrali primer odseka peščene in prodnate obale, za katera smo izračunali maksimalno zadrževalno kapaciteto obale. Za račun smo uporabili preprosto empirično enačbo, ki ponuja ugodno razmerje med številom potrebnih in razpoložljivih podatkov ter v literaturi ovrednoteno zanesljivostjo rezultatov. Račun smo izvedli v programu Microsoft Excel, v katerem smo izdelali preglednico, ki omogoča hitro in enostavno računanje. Pristop, ki smo ga izbrali, omogoča razmeroma preprosto vgradnjo v numerične modele širjenja naftnih madežev in bi lahko prispeval k večji zanesljivosti tovrstnih modelov. Za izbrana odseka peščene in prodnate obale smo izvedli tudi račun sproščanja nafte z obale, pri katerem smo predpostavili, da je zapolnjena maksimalna kapaciteta obale. Ugotovili smo, da se proces sproščanja nafte s peščene obale zaključi že po nekaj dneh, medtem ko je pri prodnati obali proces daljši za tri do štiri velikostne rede. Poznavanje količine sproščene nafte v morje in časa sproščanja za različne tipe nafte in obale lahko ustreznim službam omogoči smiselno ukrepanje oziroma zaščito predelov obale, ki bi jih sproščena nafta lahko dosegla.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 502.51(26):504.5:665.6(043.2)  
**Author:** Romina Korenika  
**Supervisor:** Assoc. prof. Dušan Žagar, PhD  
**Title:** Oil spill stranding processes  
**Document type:** Graduation Thesis — University studies  
**Notes:** 38 p., 10 tab., 17 fig., 13 eq.  
**Key words:** oil spill, stranding, release, Gulf of Trieste

**Abstract:**

In the thesis, we discuss the processes of stranding and release of oil on the coast and off the coast in the case of an oil spill. We presented different ways of determining the maximum oil-holding capacity of the beach, and established that the retention mainly depends on the types of coastline and type of oil. Based on the classification of the coastline types in Slovenia, we chose a section of sandy and gravelly coastline as an example. For these types of coastlines, we calculated maximum oil-holding capacities of the coast. In calculations, we used a simple empirical equation that offers favourable ratio among the number of necessary and available data, and good reliability of the results estimated in literature. Calculations were performed in Microsoft Excel, using a newly created table that enables fast and simple calculations. The chosen approach enables relatively simple installation into numerical models of oil spills, and could contribute to higher reliability of such models. For the chosen sections of sandy and gravelly coastlines, we also carried out calculations of oil release off the coast, in which we presumed that the maximum capacity of the coast is filled up. We established that the process of oil release off a sandy coast is completed in a few days, while on a gravelly coast it lasts longer for three to four orders of magnitude. The knowledge on the quantity of oil released to the sea and the time of release for different types of oil and coastlines is important. It can enable the corresponding services to intervene reasonably and to protect the coastline sections that could be reached by the released oil.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju, izr. prof. dr. Dušanu Žagarju za spodbudo, pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se svoji družini za vso podporo v času študija.

**KAZALO VSEBINE**

|  |             |
|--|-------------|
| <b>STRAN ZA POPRAVKE.....</b>  | <b>I</b>    |
| <b>IZJAVA O AVTORSTVU .....</b>  | <b>II</b>   |
| <b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>   | <b>III</b>  |
| <b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....</b>   | <b>IV</b>   |
| <b>ZAHVALA .....</b>   | <b>V</b>    |
| <b>KAZALO VSEBINE .....</b>  | <b>VI</b>   |
| <b>KAZALO SLIK .....</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>   | <b>VIII</b> |
| <b>1 UVOD.....</b>   | <b>1</b>    |
| <b>2 OBNAŠANJE RAZLITE NAFTE V OKOLJU GLEDE NA NJENE LASTNOSTI .....</b>   | <b>4</b>    |
| <b>3 METODOLOGIJA.....</b>   | <b>6</b>    |
| 3.1 Matematični modeli.....  | 6           |
| 3.1.1 Robni pogoji obale.....  | 6           |
| 3.1.2 Maksimalna in rezidualna kapaciteta obale .....  | 8           |
| 3.2 Matematično modeliranje zadrževanja nafte na obali .....   | 10          |
| 3.2.1 Računanje kapacitete zadrževanja nafte na obali na podlagi empiričnih podatkov .....                               | 12          |
| 3.2.2 Računanje kapacitete zadrževanja nafte, ki temelji na podatkih Shoreline Cleanup Assessment Techniques (SCAT)..... | 15          |
| 3.2.3 Računanje kapacitete zadrževanja nafte na podlagi laboratorijskih poskusov .....                                   | 17          |
| 3.2.4 Teoretični izračuni kapacitete zadrževanja nafte na obali s hidravličnim modeliranjem obale .....                  | 18          |
| <b>4 KAPACITETA ZADRŽEVANJA NAFTE NA ODSEKIH SLOVENSKE OBALE .....</b>   | <b>22</b>   |
| 4.1 Izbira metode .....  | 22          |
| 4.2 Izbira odsekov slovenske obale .....   | 22          |
| 4.3 Peščena obala – odsek Ankaran 5.....   | 24          |
| 4.4 Prodnata obala – odsek Strunjan 4 .....  | 26          |
| <b>5 SPROŠČANJE NAFTE Z OBALE NA ODSEKIH ANKARAN 5 IN STRUNJAN 4.....</b>  | <b>29</b>   |
| 5.1 Sproščanje nafte z obale na odseku Ankaran 5 .....   | 29          |
| 5.2 Sproščanje nafte z obale na odseku Strunjan 4.....   | 30          |
| <b>6 ZAKLJUČKI.....</b>  | <b>33</b>   |
| <b>VIRI .....</b>  | <b>35</b>   |



## KAZALO SLIK

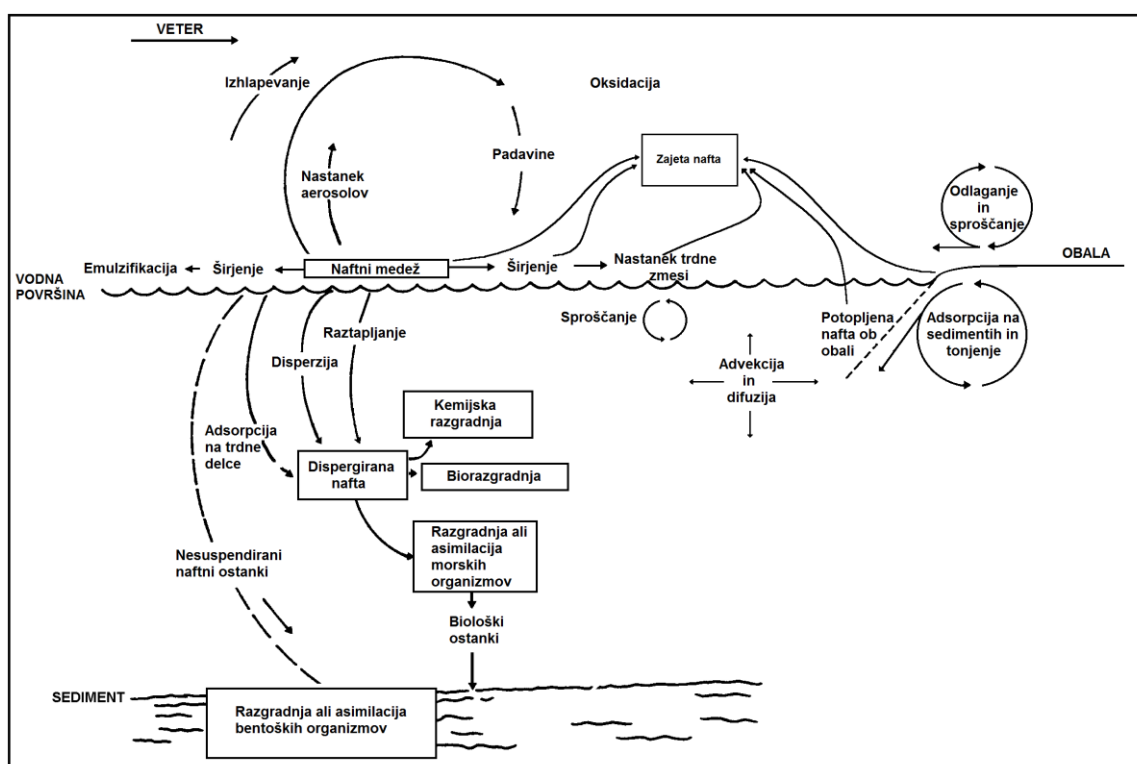
|   |    |
|---|----|
| Slika 1: Shematski prikaz procesov pri razlitju nafte.....  | 1  |
| Slika 2: Definicije obalnih pojmov .....  | 11 |
| Slika 3: Opredelitev vhodnih parametrov obalnih predelov za model COZIL, za vse tipe obal razen lagun in fjordov .....  | 12 |
| Slika 4: Peščena obala onesnažena z nafto .....   | 14 |
| Slika 5: Idealiziran diagram intersticijskega prostora por med zrni, napolnjen z nafto ob polni kapaciteti (levo). V naravi bo v nasičeni zemljini manj nafte, ker so zrna tesneje zbita (desno) .....                          | 16 |
| Slika 6: Prečni prerez obale iz debeložrnatega materiala.....   | 18 |
| Slika 7: Odsek obale, kjer je $WT$ gladina podtalnice, $H$ amplituda plimovanja (razlika med plimo in oseko) in $D$ maksimalna globina do gladine podtalnice na kopenski strani .....   | 19 |
| Slika 8: Globina do podtalnice v skladu z linijo plime za drobno peščene obale z brezrazsežnim plimovanjem $T$ ( $R$ -s celinskim napajanjem (tok podzemnih voda) s celinskega območja; $NR$ – brez celinskega napajanja) ..... | 20 |
| Slika 9: Odseki obale v Sloveniji, njihov tip, stopnja ranljivosti, popravljena stopnja ranljivosti in dolžina. Z modro barvo je označena stopnja ranljivosti 1, z zeleno stopnja 2, z rumeno 3, z oranžno 4 in z rdečo 5 ..... | 23 |
| Slika 10: Popravljene stopnje ranljivosti slovenske obale od Strunjana do Izole .....   | 23 |
| Slika 11: Popravljene stopnje ranljivosti slovenske obale od Izole do meje z Italijo .....  | 24 |
| Slika 12: Peščena obala – Ankaran 5 .....   | 24 |
| Slika 13: Prodnata obala – Strunjan 4 .....   | 27 |
| Slika 14: Različne velikosti prodnikov (od 0,2 do 25 cm) – Strunjan 4 .....   | 27 |
| Slika 15: Grafikon sproščanja nafte – Ankaran 5 .....   | 30 |
| Slika 16: Grafikon sproščanja nafte – Strunjan 4.....   | 31 |
| Slika 17: Grafikon sproščanja nafte do dosega rezidualne kapacitete – Strunjan 4.....   | 32 |

**KAZALO PREGLEDNIC**

|   |    |
|---|----|
| Preglednica 1: Razpolovni čas in stopnja ranljivosti za različne tipe obal .....  | 7  |
| Preglednica 2: Procesi razgradnje nafte na obali glede na površinski madež.....   | 10 |
| Preglednica 3: Stopnja sproščanja nafte kot funkcija tipa obale in energije valovanja .....   | 13 |
| Preglednica 4: Debelina naftne plasti glede na tip obale in vrsto nafte .....   | 14 |
| Preglednica 5: Izračuni kapacitete zadrževanja nafte na obali za različne tipe obal za primer štirimetrskega razpona plimovanja in metrskih valov .....   | 14 |
| Preglednica 6: Izpeljane kapacitete zadrževanja nafte z ocenjeno enoto površine zadrževalne kapacitete (Prirejeno po: Cheng in sod., 2000, Gundlach, 1987) .....  | 15 |
| Preglednica 7: Podatki o gostoti ( $\rho_g$ ) in viskoznosti ( $\eta$ ) nafte, maksimalni debelini nafte ( $Tm$ ) in izračunana maksimalna kapaciteta obale na dolžinski meter obale ( $M *$ ) ter maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na obali izražena kot masa ( $M$ ) in kot prostornina ( $V$ ) za posamezni tip nafte (odsek Ankaran 5) ..... | 26 |
| Preglednica 8: Podatki o gostoti ( $\rho$ ) in viskoznosti ( $\eta$ ) nafte, maksimalni debelini nafte ( $Tm$ ) in izračunana maksimalna kapaciteta obale na dolžinski meter obale ( $M *$ ) ter maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na obali izražena kot masa ( $M$ ) in kot prostornina ( $V$ ) za posamezni tip nafte (odsek Strunjan 4) .....  | 28 |
| Preglednica 9: Prostornina prvotno odložene nafte na obalo ( <i>Voil_beach</i> ) in rezidualna kapaciteta obale za posamezni tip nafte – odsek Ankaran 5 .....  | 29 |
| Preglednica 10: Prostornina prvotno odložene nafte na obalo ( <i>Voil_beach</i> ) za posamezni tip nafte – Strunjan 4 .....   | 31 |

## 1 UVOD

Nafta predstavlja potencialen vir onesnaževanja morskih in obalnih ekosistemov. Ob razlitju nafte oziroma ob stiku nafte z vodo prihaja do različnih procesov, ki jih lahko delimo v dve skupini. Prva skupina procesov vključuje procese na katere vplivajo vremenski pojavi in zaradi katerih se spreminjajo kemijske in fizikalne lastnosti nafte po razlitju. Najpomembnejša taka procesa sta izhlapevanje in emulzifikacija. Druga skupina procesov pa se nanaša na transport nafte v okolju. Vsi ti procesi so zelo odvisni od vrste nafte in vremenskih pogojev med samim razlitjem. Potek procesov ob razlitju nafte v morje prikazuje slika 1. Matematični modeli združujejo znanja obeh sklopov procesov in omogočajo napovedovanje širjenja naftnega madeža, kot tudi informacije o stanju nafte (Fingas, 2011). Za preprečevanje stika naftnega madeža z obalo uporabljamo številne metode in opremo, kot so na primer plavajoče zavesе, različni pivniki, skimerji, disperzanti ali zažiganje naftnega madeža na vodni površini (Fingas, 2000). Kljub uporabi omenjenih metod in opreme, lahko nafta doseže obalo in se začne nanjo odlagati. Odlaganje nafte na obalo je zapleten proces, ki je odvisen od več medsebojno povezanih dejavnikov: vrste in lastnosti nafte (npr. viskoznost), debeline nafte, ki je že na obali, časa, ki preteče od trenutka razlitja nafte do njenega stika z obalo, plimovanja, valovanja in tokov v času trka naftnega madeža na obalo, vrste obale, vremena v času razlitja in po njem ter energije valovanja na obali (Etkin in sod., 2007).



Slika 1: Shematski prikaz procesov pri razlitju nafte (povzeto po Huguenin in sod., 1996)

Lepljivost nafte na obalne zemljine je odvisna od vrste nafte in njenih lastnosti, predvsem viskoznosti. Lahka goriva (npr. diesel) ali hlapni destilati (npr. gorivo za reakcijske motorje ali bencin) so ponavadi relativno nelepljivi. Težja goriva so bolj lepljiva od lažje nafte. Stopnja procesov razgradnje nafte je povezana z vrsto nafte in okoljskih pogojev kot so npr. temperatura, veter in svetlobni pogoji (Etkin in sod., 2007). Vrsta nafte vpliva tudi na njeno penetracijo v zemljino. Težke nafte bodo prodrle manj globoko od lahkih. Bolj kot je nafta viskozna, manjša je njena penetracija (Fingas, 2000). Debelina

nafte na obali je odvisna od količine razlitja nafte in njenih transportnih poti, lastnosti nafte, nagiba obale oziroma obrežja, pogojev plimovanja in valovanja v času trka naftnega madeža na obalo ter poroznosti površine (Etkin in sod., 2007).

Tržaški zaliv oziroma celotni severni Jadran, katerega del je tudi naše morje, je morje zalivskega tipa, zato so negativni vplivi posameznih dejavnikov na njegovo kakovost bolj izraziti, kot v globljih odprtejših morjih (Sotlar, 2015). Urbanizacija in velika gostota raznovrstnih dejavnosti predstavlja stalne vire onesnaževanja Tržaškega zaliva. Obstajajo še nevarnejši potencialni viri ogrožanja zaradi možnih nenadnih razlitij večjih količin raznih nevarnih snovi v ladijskem prometu. Količinsko največje in najpogostejše potencialno onesnaževalo, ki se prevaža po morju s tankerji, je nafta (Sotlar, 2015).

Potencialni viri onesnaževanja Tržaškega zaliva z nafto in njenimi derivati so naslednji (Sotlar, 2015):

- tovari nafte, letno 30-31 milijonov ton in drugih nevarnih snovi, ki se transportirajo v ali iz tržaškega pristanišča,
- tovari nafte in derivatov, ki se transportirajo v Luko Koper, cca 1-2 milijonov ton letno (tankerji z nosilnostjo do 60.000 ton),
- izpuščanje odpadnih olj in balastnih vod iz ladij, ki plujejo v ali iz koprškega ali tržaškega pristanišča.

Tržaški zaliv je pomembno prometno vozlišče pomorskih poti za prevoz nafte. Doslej večjih naftnih razlitij v Tržaškem zalivu ni bilo, vendar glede na vsako leto večje število tankerjev v tržaškem in koprskem pristanišču, obstajajo realne možnosti, da bo do tega nekega dne prišlo. Kljub temu pa prihaja do manjših onesnaženj z nafto. Nazadnje se je zaradi človeške napake pri raztovarjanju, zgodila manjša nesreča v Luki Koper leta 2008, pri kateri se je v morje razlilo približno 100 litrov nafte (Šaponja, 2014). Zanimariti pa ne smemo niti stalnih manjših onesnaženj z nafto in njenimi derivati, ki ga povzročata vedno gostejši turistični promet in promet povezan z dejavnostmi ribolova. Večina manjših izpustov ostane neopaženih, njihovi povzročitelji pa neznani.

V primeru, da naftni madež doseže obalo moramo čim prej zmanjšati njegov vpliv in pospešiti naravno okrevanje prizadetega območja. Obstajajo različne metode za odstranjevanje nafte z obale. Izbira tehnike čiščenja je odvisna od vrste obalne zemljine, globine pronicanja nafte v zemljinu, količine in vrste nafte, prometne dostopnosti obale, okoljske, družbene in kulturne občutljivosti obale ter prevladujočih morskih in vremenskih pogojev. V določenih primerih je bolje, da čiščenja ne izvajamo, saj bi tako situacijo le še poslabšali. Čiščenje namreč ogroža obalne rastline in živali, poleg tega pa lahko zahteva tudi odstranitev velike količine obalnega materiala (Fingas, 2000). Najpogostejši način čiščenja je ročno čiščenje. Delavci v zaščitnih oblačilih s pomočjo grabelj, lopat in drugega orodja ter raznih materialov za vpijanjanje odstranjujejo z nafto prepojeno zemljinu. Ta metoda je najbolj primerna za manjša onesnaženja z bolj viskozno nafto. Ročno čiščenje je počasen proces, ustvarja pa bistveno manjše količine odpadnega materiala v primerjavi z ostalimi metodami. Drug način čiščenja je spiranje s hladno ali mlačno vodo pod nizkim tlakom, ki hitro odstrani nafto in povzroča majhno ekološko škodo. Ta način je primeren za neprepustno obalo in ne pride v poštev za zrnate zemljine kot je pesek. Naslednji način čiščenja se izvaja mehansko in sicer z gradbeno mehanizacijo kot so bagri, buldožerji, frezami in tovornjaki. Mehansko čiščenje omogoča hitro odstranitev nafte z obale, vendar se pri tem odstranijo velike količine neonesnažene zemljine. Ta način ni primeren za ekološko občutljive obale. Obstajajo še metode čiščenja pri katerih se poslužujemo raznih pivnikov in kemičnih

čistilnih sredstev. Pivniki vpijajo nafto, ki se sprošča z obale z naravnimi procesi in tako preprečujejo širjenje onesnaževanja. Kemična sredstva ponavadi vsebujejo površinsko aktivne snovi in zmanjšujejo oprijem nafte s površino. Čiščenje z visokotlačnim spiranjem s toplo ali hladno vodo in čiščenje s paro ali peskanjem sta manj priporočljivi tehniki čiščenja, saj poleg nafte z obale spereta tudi vse prisotne rastlinske in živalske vrste (Fingas, 2000).

Republika Slovenija je v okviru domače zakonodaje in različnih mednarodnih aktov dolžna skrbeti za varovanje morskega okolja pred negativnimi vplivi. Hkrati pa je Slovenija, kot članica Evropske unije dolžna spoštovati tudi njene predpise s tega področja. V primeru razlitja se v Sloveniji najprej aktivira Služba za varstvo obalnega morja (SVOM), katero od leta 2005 opravlja koncesionar (Vodnogospodarsko podjetje Drava Ptuj). V primeru, da nesreča presega sposobnosti koncesionarja, se aktivira tudi Civilna zaščita Republike Slovenije. Po potrebi se lahko zaprosi za pomoč in sodelovanje tudi sosednje države (Trobec, 2007).

Skromna prostorska razsežnost Slovenske obale je vzrok, da lahko pride do večjega onesnaženja le-te že ob manjših razlitjih nafte. V diplomski nalogi bomo podrobneje opisali procese širjenja, oblepljanja in sproščanja nafte na obalo in z obale. Na osnovi enačb iz literature je mogoče za nekatere značilne odseke slovenske obale določiti kapaciteto zadrževanja nafte in razpolovni čas oziroma čas sproščanja določene količine nafte glede na tip obale, kar je tudi cilj diplomske naloge. Pri tem bomo uporabili klasifikacijo tipov obale v Sloveniji, ki jo je zasnoval in opisal Bosnič (2014). Pridobljeni rezultati bodo omogočili Službi za varstvo obalnega morja in drugim organizacijam zadolženim za ukrepanje v primeru nevarnosti za okolje novo, uporabno orodje za izračune v primeru tovrstne nezgode. Tudi z obale sproščeno nafto je namreč potrebno čim hitreje zajeti in odstraniti, da preprečimo njeno širjenje in odlaganje na neonesnažene dele obale ter prehajanje v vodni stolpec.

## 2 OBNAŠANJE RAZLITE NAFTE V OKOLJU GLEDE NA NJENE LASTNOSTI

Surova nafta je sestavljena iz številnih ogljikovodikov, od zelo hlapljivih, lahkih sestavin kot sta propan in benzen do bolj kompleksnih, težkih spojin kot so bitumen, asfalteni, smole in voski. Glavne lastnosti, ki vplivajo na obnašanje razlite nafte na morju so gostota, viskoznost, točka vžiga, točka tečenja, topljivost in nastanek emulzije (Fate of marine oil spills, 2011)

V naftni industriji se pogosto uporablja klasifikacija vrst surove nafte glede na njen geografski izvor. Za ukrepanje ob razlitju nafte na morju ali kopnem, pa tak sistem razvrščanja ni najbolj uporaben, saj ponuja le malo podatkov o splošni toksičnosti, stanju in spremembah, ki se pojavijo s časom in vremenskimi vplivi. United States Environmental Protection Agency razvršča nafto v štiri razrede glede na primarne dejavnike v primeru razlitja nafte (Types of Crude Oil, 2015).

Razred A: lahka, vnetljiva nafta

Je zelo tekoča, se hitro širi po trdni in vodni površini, ima močan vonj, visoko stopnjo izhlapevanja ter nizko temperaturo vžiga. Pronica v porozne materiale kot sta pesek in prod. Običajno se ne lepi na površine in izpiranje z vodo jo hitro odstrani. Nafta tega razreda je lahko zelo strupena za ljudi, ribe in druge organizme. Razred A vključuje večino predelanih naftnih derivatov in številne tipe visoko kvalitetne surove nafte.

Razred B: nelepljiva nafta

Je voščena ali oljnata na otip. Nafta razreda B je manj strupena in se bolj oprime površine kot nafta razreda A, vendar jo je mogoče odstraniti s površine z močnim splakovanjem. Pri višjih temperaturah se pronicanje v porozen material povečuje, nafta lahko postane obstojna in jo zato težko odstranimo. Izhlapevanje hlapnih snovi lahko povzroči, da nafta spremeni lastnosti do take mere, da jo uvrščamo v razred C ali D. V ta razred spadajo srednje težke in težke nafte na parafinski osnovi.

Razred C: težka, lepljiva nafta

Je viskozna, lepljiva, večinoma rjave ali črne barve. Izpiranje z vodo jo težko odstrani s površine, vendar ne pronica v porozne površine. Gostota nafte tega razreda je lahko blizu gostoti vode in pogosto potone. Razgradnja in izhlapevanje hlapljivih frakcij jo lahko strdi v trdno in obstojno zmes, ki se uvršča v razred D. Nafta razreda C ima nizko stopnjo toksičnosti, a živali se lahko v njej zadušijo ali utonejo. V ta razred spadajo težka kurilna olja in srednja do težka surova nafta.

Razred D: trdna nafta

Je sorazmerno nestrupena, ne pronica v porozen material in je črne ali temno rjave barve. Ob višjih temperaturah zaradi zmanjšane viskoznosti oblepi površine, katere je zelo težko očistiti. V razred D se uvršča rezidualna nafta, težka surova nafta, nekateri tipi nafte na parafinski osnovi in nekatere postarane nafte.

Vremenske razmere in temperatura vode lahko zelo vplivajo na obnašanje nafte in naftnih derivatov v okolju. Na primer, ko izhlapijo hlapljive frakcije nafte razreda B, se nafta uvršča v razred C. Če se

pojavi občuten padec temperature se lahko nafta razreda C strdi in se posledično uvršča v razred D, ob segrevanju pa se njene lastnosti lahko spet spremenijo in se ponovno uvršča v razred C (Types of Crude Oil, 2015).

Torej, če povzamemo, je lepljivost nafte na obalne zemljine odvisna od vrste nafte in njenih lastnosti, predvsem viskoznosti. Sveže nafte so tako manj lepljive od bolj postaranih. Lahka goriva (npr. diesel) ali hlapni destilati (npr. kerozin ali bencin) so ponavadi relativno nelepljivi. Težja goriva so bolj lepljiva od lažje nafte. Stopnja procesov razgradnje nafte ima velik vpliv na viskoznost nafte. Izhlapevanje namreč znatno poveča viskoznost (Fingas, 2000). Viskoznost nafte lahko spremeni tudi emulzifikacija in sicer iz tekoče v težko, viskozno nafto. Stopnja emulzifikacije je odvisna od kemijske sestave nafte, predvsem glede na vsebnost asfaltenov, smol in aromатов. Stopnja procesov razgradnje nafte je povezana z vrsto nafte in odvisna od okoljskih pogojev kot so npr. temperatura, veter in svetlobni pogoji (Etkin in sod., 2007). Vrsta nafte vpliva tudi na njeno penetracijo v zemljino. Težke nafte bodo prodrle manj globoko od lahkih. Bolj kot je nafta viskozna, manjša bo njena penetracija (Fingas, 2000).

### 3 METODOLOGIJA

#### 3.1 Matematični modeli

Ob poznavanju vremenske situacije, cirkulacije vodnih mas na obravnavanem območju in lastnosti razlite nafte je mogoče z matematičnimi modeli za simulacije razlitja nafte napovedati lokacijo, smer širjenja in velikost naftnega madeža po določenem času. Za pravilno napoved je pomembno čim bolj natančno poznavanje transportnih procesov (advekcije, turbulentne difuzije) in procesov širjenja in razgradnje, katere delimo na kratkoročne in dolgoročne. Med kratkoročne procese uvrščamo mehansko širjenje, izhlapevanje in raztapljanje vodotopnih sestavin nafte. Dolgoročni procesi so tisti, ki se začnejo šele po določenem času (nekaj ur do nekaj tednov po razlitju) in omogočajo napovedovanje dolgoročnih posledic ter oceno celotne škode ob razlitju. To so emulzifikacija, disperzija naftnih kapljic v vodnem stolpcu, mešanje s suspendirano snovjo v vodi in tonjenje, procesi ob stiku z obalo (odlaganje in sproščanje), sprememba gostote zaradi izhlapevanja, emulzifikacije in fotodegradacije ter biološka razgradnja (Žagar in sod., 2012). V diplomski nalogi se bomo osredotočili na procese ob stiku z obalo (odlaganje in sproščanje). Za računanje le-teh moramo poznati robne pogoje obale.

##### 3.1.1 Robni pogoji obale

Ko razlita nafta doseže obalo, se začne nanjo odlagati. Efektivno se količina nafte v naftnem madežu zmanjša. Po določenem času se lahko del nafte zaradi tokov in plimovanja ponovno sprostí ter vrne nazaj v morje. Zato je pomembno, da poznamo razpolovni čas, ki meri sposobnost obale, da zadrži nafto. Natančneje razpolovni čas pove, v kolikšnem času se v morje vrne polovica prvotno odložene nafte (Jeglič, 2010). Proces ponovnega sproščanja je za različne obale opisal Torgrimson (1984). Za ravne betonske obale je razpolovni čas reda ene ure, za peščene obale nekaj dni, medtem ko lahko za skalnati tip obale ta čas presega eno leto. Pri modelu odlaganja nafte na obalo in kasnejšega sproščanja je predpostavljeno eksponentno zmanjševanje količine nafte na obali v odvisnosti od časa. To pomeni, da se po dovolj dolgem času vsa nafta vrne v morje. Na primer, ko preteče petkratnik razpolovnega časa, ostane na obali le še 3% prvotne količine nafte (Wang in sod., 2005, cit. po Jeglič, 2010). V preglednici 1 so prikazani razpolovni časi in stopnje ranljivosti za različne tipe obal. Na podlagi razpolovnega časa lahko razmerje med prostornino nafte, ki je se je sprostila v morje in prvotno prostornino odložene nafte opišemo z naslednjo enačbo (Shen in Yapa, 1987, cit. po Wang in sod., 2005):

$$\frac{\Delta V_b}{V_b} = 1 - 0,5^{\Delta t/\lambda} \quad (1)$$

Pomen oznak v enačbi:

$\Delta V_b$  – prostornina nafte, ki se sprostí v morje med posameznim časovnim korakom

$V_b$  - prostornina prvotno odložene nafte na obalo

$\Delta t$  – časovni korak

$\lambda$  – razpolovni čas



Maslo in sod. (2014) so enačbo (1) izrazili v naslednji obliki:

$$\frac{V_{oil\_re-enter}}{V_{oil\_beach}} = 1 - e^{-k\Delta t} \quad (2)$$

Pomen oznak v enačbi:

$V_{oil\_beach}$  - prostornina prvotno odložene nafte na obalo

$V_{oil\_re-enter}$  - prostornina nafte, ki se sprosti v morje

$k$  – konstanta razgradnje

$\Delta t$  - časovni korak

$\lambda$  – razpolovni čas

Konstanto razgradnje ( $k$ ) je mogoče izraziti glede na razpolovni čas ( $\lambda$ ) kot:

$$k = \frac{(-\ln(\frac{1}{2}))}{\lambda} \quad (3)$$

Preglednica 1: Razpolovni čas in stopnja ranljivosti za različne tipe obal (Prirejeno po Torgrimson, 1984)

| Tip obale                      | Razpolovni čas [h] | Stopnja ranljivosti |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|
| Klif                           | 1                  | 1                   |
| Abrazijska polica (ravnina)    | 1                  | 2                   |
| Žepna obala                    | 24                 | 3                   |
| Peščena obala                  | 24                 | 4                   |
| Peščena in kamnita obala       | 24                 | 5                   |
| Peščena in prodnata obala      | 8760               | 6                   |
| Izpostavljena poplavna ravnica | 1                  | 7                   |
| Kamnita obala v zavetju        | 8760               | 8                   |
| Poplavna ravnica v zavetju     | 8760               | 9                   |
| Močvirje v zavetju             | 8760               | 10                  |
| Notranjost celine              | 8760               | 0                   |

Owens in sod. (1983, 1987, cit. po Etkin in sod., 2007) so prišli do spoznanja, da je izpostavljenost obale valovom pomemben parameter za določanje količine sproščene nafte. Owens in sod. (2002, cit. po Etkin in sod., 2007) so na podlagi spremljanja študij razlitja težke nafte v okolju z nizko energijo valovanja v okviru projekta Baffin Island Oil Spill (BIOS), prišli do ugotovitve, da se presežek nafte tudi na obalah z nizko energijo valovanja, na katerih je odložena velika količina nafte, ki presega kapaciteto obalne zemljine, sprosti v morje že v prvih nekaj ciklih plimovanja. Začetnemu, kratkemu in nestabilnemu obdobju sledi dolgo, stabilno obdobje, v katerem se nafta le počasi sprošča. Rezidualna nafta (nafta, ki jo lahko obala dolgoročno zadrži) na območju plimovanja se lahko zadrži na obali od nekaj mesecev do več let, na območju do koder sežejo le visoke plime pa tudi več desetletij. Po tem, ko se nafta sprosti iz obalne površine, lahko še vedno ostane nafta pod površjem. Sproščanje podpovršinske nafte je funkcija globine penetracije in globine zemljine do katere sega vpliv obalnih procesov. Če je globina do katere delujejo obalni procesi na zemljino minimalna, se lahko nafta zadrži v intersticijskih prostorih v zgornjem sloju zemljine. Na obalah z nizko energijo valovanja igrata pomembno vlogo pri odstranjevanju in razgradnji rezidualne nafte tudi biorazgradnja

in interakcija majhnih delcev.

Za uporabo matematičnih modelov za simulacijo razlitja nafte na morju, poleg razpolovnega časa potrebujemo tudi podatke o kapaciteti zadrževanja nafte na obali. Kapaciteta obale, da zadrži nafto je omejena, oziroma, na obalo se lahko odloži toliko nafte, da njena količina doseže maksimalno kapaciteto obale (Humphrey in sod., 1993). Maksimalna količina nafte, ki se lahko zadrži na različnih tipih obal je odvisna od debeline nafte na površini, od količine nafte, ki lahko pronica v obalno zemljino in naklona obale (Gundlach, 1987, cit. po Maslo in sod., 2014). Gundlach (1987) je predlagal povprečne vrednosti za različne tipe obal.

Hayes in sod. (1991) so analizirali dejavnike, ki vplivajo na začetno odlaganje in na dolgoročno razgradnjo nafte na prodnatih obalah. Na teh se lahko nafta obdrži dlje časa, tudi več desetletij zaradi možnosti globokega prodiranja in »zakopavanja« nafte v grobe zemljine. Podrobneje na tridimenzionalno konfiguracijo odlaganja na prodnatih obalah vplivajo značilnosti reflektivnih ali disipativnih valov, ki oblikujejo obalo. Reflektivni valovi običajno oblikujejo strme in grobe terase, ki omogočajo globoko pronicanje in »zakopavanje« nafte v globlje plasti zemljine. Disipativni valovi pa običajno na območju plimovanja oblikujejo sipine (nasipe), ki se premikajo v notranjost obale, s svojim premikanjem pa povzročajo prekrivanje in zakopavanje obalnega materiala oziroma nastanek naravnega asfalta. Tvorba tako imenovanega naravnega asfalta je odporna na erozijo in odnašanje ter se posledično lahko zadrži na obali še veliko časa.

### 3.1.2 Maksimalna in rezidualna kapaciteta obale

Obala ima maksimalno in rezidualno kapaciteto zadrževanja nafte. Rezidualna kapaciteta predstavlja količino nafte, ki jo lahko obala dolgoročno zadrži. Plast nafte ovije posamezen delec zemljine in je pri tem stabilna zaradi površinske napetosti. Z večanjem premera zrn zemljine se debelina naftne plasti zmanjšuje, s tem pa tudi rezidualna kapaciteta obale (Humphrey in sod., 1993). Empirične vrednosti rezidualne kapacitete z lahko nafto prepojene zemljine so podane v literaturi (Humphrey in sod., 1993). Za prodnike majhnega premera ( $\Phi = -3$ ) je bila ocenjena rezidualna kapaciteta  $5 \text{ l/m}^3$ . Zaradi pomanjkanja podatkov o rezidualni kapaciteti večjih delcev, lahko to ocenimo na podlagi neprekinjene plasti nafte okoli delcev zemljine. Dokler je plast nafte tanka v primerjavi s premerom zrn, lahko rezidualno kapaciteto izračunamo za posamezno logaritemsko vrednost  $\Phi$ , kjer vrednost  $\Phi$  predstavlja povprečno velikost zrn zemljine (Humphrey in sod., 1993). Logaritemsko vrednost izračunamo z enačbo (Etkin in sod., 2007):

$$\Phi = -\log_2 d = \frac{\log_{10} d}{\log_{10} 2} \quad (4)$$

Pomen oznak v enačbi:

$\Phi$  – velikost zrn zemljine v fi-enoti

d – premer zrn v mm

Izračuni upoštevajo plast nafte debeline 0,02 mm glede na omenjene ocene. Debelina stabilne plasti nafte je odvisna od zemljine in viskoznosti nafte, vendar med njima ni vnaprej določenega razmerja, zato se uporablja vrednost 0,02 mm (Humphrey in sod., 1993).

Humphrey in sod. (1993) so dognali, da je kritično obdobje sproščanja nafte v času od maksimalne kapacitete do rezidualne kapacitete brez interakcij neviht. Nafta se v času plime odplakne s spiranjem delcev. Stopnja sproščanja je odvisna od viskoznosti nafte in privlačnih sil med nafto in zemljino. Na podlagi podatkov iz projekta Baffin Island Oil Spill (BIOS) je bila ocenjena rezidualna kapaciteta za prodrano obalo  $4,5 \text{ l/m}^3$  zemljine, kar je v skladu s prej omenjeno empirično izračunano vrednostjo (Humphrey in sod., 1993).

Humphrey in Harper (1993) sta izvedla številne poskuse prodiranja nafte v zemljino in spiranja z nafto prepojene zemljine zaradi energije plimovanja. Na podlagi eksperimentalnih podatkov je bila ocenjena rezidualna kapaciteta zemljine s srednjim premerom zrn med 2 in 3,5 mm  $30 \text{ do } 50 \text{ l/m}^3$  zemljine za nafto z nizko viskoznostjo in do  $100 \text{ l/m}^3$  zemljine za nafto z visoko viskoznostjo (Etkin in sod., 2007).

Pri odlaganju nafte na obalo sodelujejo različni procesi, na katere vplivajo vremenski pojavi in zaradi katerih se spreminjajo kemične in fizikalne lastnosti nafte. Omenjeni procesi so povzeti v preglednici 2.

Procesi, ki vplivajo na razgradnjo nafte na obali (predvsem na rezidualno nafto) so podobni procesom razgradnje nafte na in v vodi, z nekaj razlikami: disperzija in biorazgradnja imata posebne značilnosti za nafto na obali, specifičen obalni proces pa je asfaltacija. Disperzija je verjetno glavni proces naravnega čiščenja za obale, ki so podvržene energiji valovanja. Poleg te, ki deluje enako kot pri površinskem madežu na vodi, se naftni delci mobilizirajo v vodnem stolpcu skupaj z razpršenimi delci zemljine. Biorazgradnja se pospeši s sproščanjem površinske nafte z obale, ki ustvarja boljše pogoje za sam proces (večja prisotnost kisika in hranljivih snovi ter odstranitev produktov biorazgradnje). Tvorba naravnega asfalta je kombinacija emulzije, delcev obalne zemljine in odmrlih ter živih organizmov (Humphrey in sod., 1993).

Preglednica 2: Procesi razgradnje nafte na obali glede na površinski madež (Prirejeno po Humphrey in sod., 1993)

| Proces                   | Nafta v času doseganja maksimalne kapacitete obale         | Rezidualna nafta   | Dolgoročni učinki   |
|--------------------------|--|--|---|
| Izhlapevanje             | Počasno, samo na površini, nafta pod površjem ne izhlapeva | Hitro kot nafta v filmu na površini zemljine, pojavlja se v času oseke           | Majhen učinek   |
| Raztapljanje             | Počasno, samo na površini                                  | Hitro kot nafta v filmu na površini zemljine, pojavlja se v času plime           | Majhen učinek   |
| Disperzija               | Počasna, majhna interakcija med nafto in vodo              | Počasna ob nizkih valovih, hitra ob visokih valovih                              | Hitra v času nevihte, sicer počasna   |
| Emulzifikacija           | Počasna, majhna interakcija med nafto in vodo              | Hitra zaradi lokalne turbulence v kanalih zemljine                               | Majhen učinek, proces verjetno končan za emulzificirano nafto               |
| Biorazgradnja            | Počasna zaradi velike količine nafte                       | Hitra zaradi bakterij in hranilnih snovi, ki jih prinaša spiranje obale z valovi | Možen velik učinek v mirnem obdobju, produkte biorazgradnje valovi odnašajo |
| Tvorba naravnega asfalta | Se ne pričakuje  | Se ne pričakuje  | Velika verjetnost ob prisotnosti zemljine (usedline) in emulzije            |

### 3.2 Matematično modeliranje zadrževanja nafte na obali

Na najbolj osnovni ravni se uporabljajo matematični modeli s katerimi simuliramo smer širjenja in velikost naftnega madeža po določenem času, pri računanju pa upoštevajo tudi dolgoročne procese oziroma procese, ki nastanejo ob stiku nafte z morsko obalo. V nadaljevanju so opisane razlage obalnih pojmov, ki se pojavljajo v povezavi s sproščanjem in nalaganjem nafte na morsko obalo in katere prikazuje slika 2. Definicija dolžine in širine obale je prikazana na sliki 4.

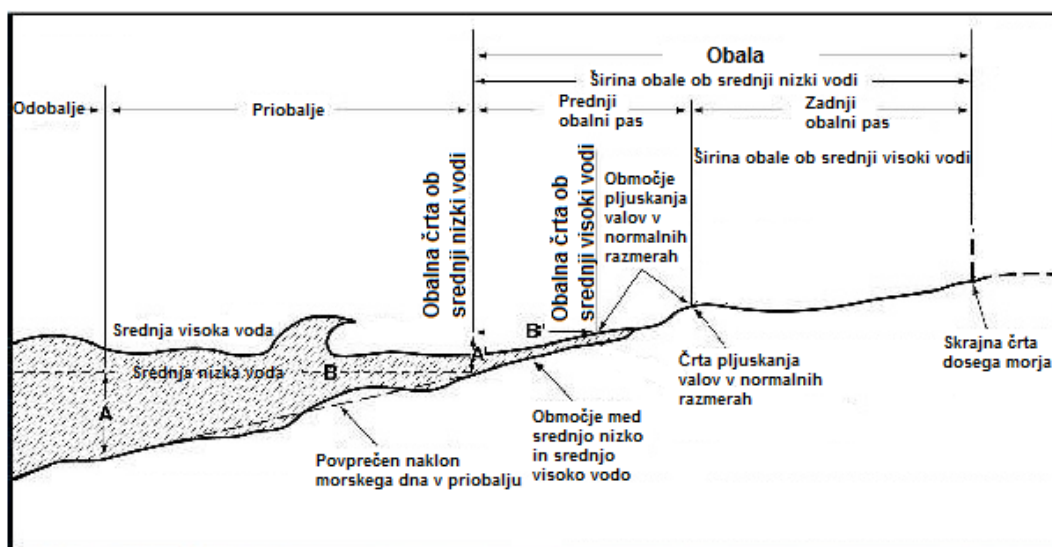
**Prednji obalni pas – angl. foreshore** je območje obale, ki ga sestavljata območje normalnega plimovanja oziroma obalni pas med srednjo nizko in srednjo visoko vodo in območje pljuskanja valov v normalnih razmerah.

**Območje pljuskanja valov – angl. swash zone** je območje obale med srednjo visoko vodo in črto »normalnega pometanja« oziroma pljuskanja valov v normalnih razmerah. Zemljina je izpostavljena eroziji, transportu in odlaganju materiala.

**Zadnji obalni pas – angl. backshore** je območje obale med črto pljuskanja valov v normalnih razmerah in skrajno črto dosega morja. Na to območje sežejo samo visoki valovi, visoka plima in neurni valovi. Zemljina ni prepojena z vodo.

Za modeliranje odlaganja nafte na obalo in sproščanja nafte z obale obstajajo različni pristopi (Etkin in sod., 2007):

- Ob predpostavki, da se vsa nafta, ki doseže obalo nabira na tem segmentu obale.
- Ob predpostavki, da se nafta odlaga na obalo v času oseke.
- Uporaba empiričnih podatkov, ki se nanašajo na maksimalno količino nafte, ki se obdrži na obali, glede na tip obale in viskoznost nafte za določanje kapacitete zadrževanja nafte na obali (npr. Gundlach, 1987).
- Uporaba kompleksnega modela računanja dolgoročnih procesov ob stiku nafte z obalo, ki temelji na geografskih lastnostih obale in hidravličnih interakcijah (t.j. model COZIL, ki ga je izdelal Applied Science Associates, Inc. za Minerals Management Service (MMS)).
- Uporaba statističnega pristopa, pri katerem se uporabi enostaven regresijski model za napovedovanje dolžine obale, ki bi jo lahko dosegel naftni madež in temelji na opazovalnih podatkih dejanskih razlitij nafte.



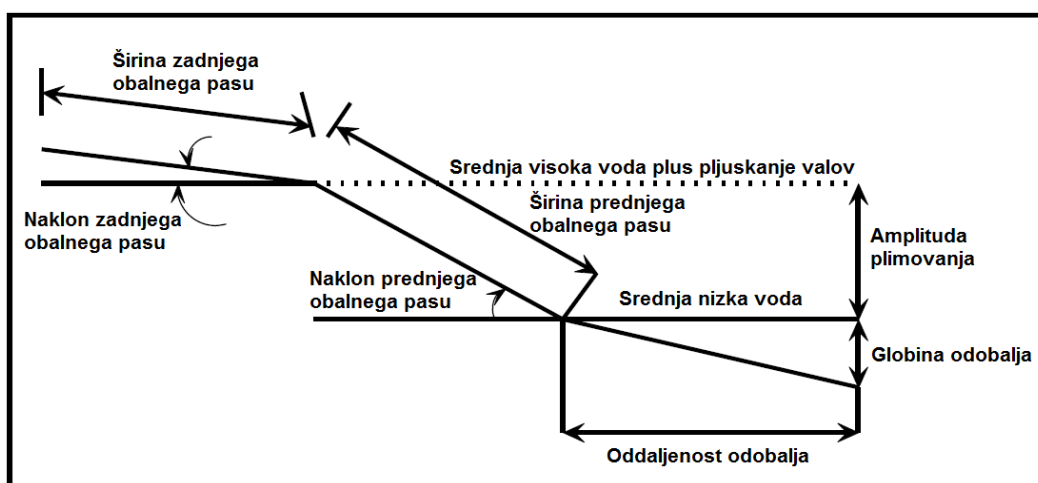
Slika 2: Definicije obalnih pojmov (Prirejeno po: <http://www.slideshare.net/fozzie/beach-profiles>)

Najenostavnejši pristop modeliranja predpostavlja, da se nafta, ki doseže obalo, začne nanjo odlagati ne glede na vrsto nafte in fizikalne, kemijske in biološke procese, ki vplivajo na njeno sestavo ter prav tako ne glede na tip obale, količino že odložene nafte na obali, tokove in turbulentne pogoje itd. Veliko modelov uporablja to poenostavitev, vendar je zaželeno, da se pri računanju upošteva vsaj nekatere zgoraj omenjene procese.

Naslednji enostavnejši pristop predpostavlja, da se nafta odlaga na obalo samo v času oseke. Takšno modeliranje zahteva poznavanje lastnosti plimovanja skupaj z vodostaji ob obali, kar omogoča identificiranje oseke. Za obsežne modele in razlitja na morju tak obseg podrobnosti dinamike plimovanja ni praktičen. Poleg tega plimni tokovi niso pomembni na območju odprtega morja. Ta pristop ima le majhno prednost pred najenostavnejšim.

Določanje kapacitete zadrževanja nafte na obali na podlagi empiričnih podatkov se uporablja v večini modelov razlitja nafte, ki vsebujejo algoritme za interakcijo nafte z obalo. Prednost tega pristopa je, da ga je preprosto vgraditi. Kljub temu, da za določitev ustrezne zadrževalne kapacitete potrebujemo znatno količino podatkov, je ta način priporočljiv za večino modelov naftnega razlitja.

Model COZIL temelji na geografskih lastnostih obale in hidravličnih interakcijah ter podatkih o vetru. Glede na tip obale, obalo razvršča v naslednje kategorije: skalnate obale, grobe prodnate obale (premer zrn od 63 do 200 mm), erodibilne šotne obale, peščene obale, fine prodnate obale (premer zrn od 2 do 63 mm), poplavne ravnice, močvirja ter lagune in fjorde. Za vsak tip obale model zahteva parametre prikazane na sliki 3: doseg nafte na obali (m), širino zadnjega obalnega pasu (m), širino prednjega obalnega pasu (m), razdaljo odobalja (m), naklon zadnjega obalnega pasu, naklon prednjega obalnega pasu, globino odobalja (m), ter orientacijo odseka obale (merimo jo v stopinjah sourno od severa, pri čemer stojimo na začetku odseka in imamo morje na svoji levi). Na podlagi omenjenih podatkov in morskega vodostaja model COZIL preverja in določa ali je bila empirična "maksimalna debelina naftne plasti" presežena. Omejena količina nafte, ki se lahko nalaga na obalo se spreminja glede na tip obale.



Slika 3: Opredelitev vhodnih parametrov obalnih predelov za model COZIL, za vse tipe obal razen lagun in fjordov (povzeto po Reed in Gundlach, 1989)

Pri zadnjem, statističnem pristopu, so avtorji skušali razviti statistične modele, ki bi količino nafte v bližini obale povezovali s količino nafte, ki se bo obdržala na obali (Ford, 1985; Seip in sod., 1986, cit po Etkin in sod., 2007). Korelacije obstajajo, vendar ta pristop ne upošteva tipa obale in viskoznosti nafte. Posledično se variacije količine nafte, ki naj bi se obdržala na obali razlikujejo za več velikostnih redov in se zato ta pristop ni uporabljal pri nadaljnjem razvoju modelov (Etkin in sod., 2007).

### 3.2.1 Računanje kapacitete zadrževanja nafte na obali na podlagi empiričnih podatkov

Gundlach (1987) je definiral kapaciteto zadrževanja nafte na obali in koeficiente sproščanja nafte za različne tipe obal, ki se uporabljajo v različnih matematičnih modelih. Temeljijo na empiričnih podatkih razlitij nafte, do katerih je prišlo zaradi nesreč tankerjev Amoco Cadiz in Urquiola ter eksplozije naftne ploščadi Ixtoc I. Koeficienti sproščanja nafte ( $K_f$ ), so prikazani v preglednici 3 in so bili izračunani iz empiričnih podatkov z enačbo:

$$M_i = M_{i0} \cdot e^{-K_f t} \quad (5)$$

Pomen oznak v enačbi:

$M_i$  – masa nafte na obalnem segmentu  $i$

$M_{i0}$  – masa prvotno odložene nafte na obali

$K_f$  – konstanta sproščanja, ki temelji na eksponentnem razpadu

$t$  – čas v dnevih od začetka odlaganja

Preglednica 3: Stopnja sproščanja nafte kot funkcija tipa obale in energije valovanja (Prirejeno po: Gundlach, 1987)

| Tip obale              |               | Lastnosti  |                               | Delež sproščanja [%]                          |           | Vrednost $K_f$ |             |
|------------------------|---------------|--|-------------------------------|---|-----------|----------------|-------------|
|                        |               |  |                               | 1 dan   | 5 dni     |                |             |
| Skalnate pečine        | izpostavljene | Večina nafte se zlahka odlepi iz enotne in mokre površine.   |                               | 60 – 63                                       | 99 – 99,3 | 0,90 – 0,99    |             |
|                        | v zavetju     | Dolgoročna obstojnost zaradi zmanjšane energije valovanja.   |                               | 5 – 10  | 5 – 22    | 0,01 – 0,05    |             |
| Erodibilna šotna obala |               | Erozivna, vendar se nafta lahko oprime zemljine.   | Nizko delovanje valov (<1 m)  | 10 – 18                                       | 49 – 63   | 0,10 – 0,20    |             |
|                        |               |  | Visoko delovanje valov (>1 m) | 50 – 55                                       | 97 – 98   | 0,70 – 0,80    |             |
| • Peščena obala        |               | • Večina nafte na površini, nekaj pa se je pomeša in zlepi skupaj z grobo zrnatim peskom.<br>• Na splošno se nafta zlahka sprosti s površine prednjega obalnega pasu, daljša obstojnost na zadnjem obalnem pasu. | Nizko delovanje valov (<1 m)  | Površina prednjega obalnega pasu (Beach face) | 18 – 26   | 63 – 78        | 0,20 – 0,30 |
|                        |               |  |                               | Zadnji obalni pas (Backshore)                 | 10 – 18   | 40 – 53        | 0,10 – 0,15 |
|                        |               |  | Visoko delovanje valov (>1 m) | 40 – 45                                       | 92 – 95   | 0,50 – 0,60    |             |
| • Prodnata obala       |               | • Večina nafte na površini na območju prednjega obalnega pasu, globoko prodiranje in dolga obstojnost nafte na zadnjem obalnem pasu.   | Nizko delovanje valov (<1 m)  | Površina prednjega obalnega pasu (Beach face) | 10 – 18   | 40 – 63        | 0,10 – 0,20 |
|                        |               |  |                               | Zadnji obalni pas (Backshore)                 | 5 – 10    | 22 – 40        | 0,05 – 0,10 |
|                        |               |  | Visoko delovanje valov (>1 m) | 33 – 40                                       | 86 – 92   | 0,40 – 0,50    |             |
| Poplavna ravnica       |               | Večina nafte se zlahka sprosti.  |                               | 60 – 63                                       | 99 – 99,3 | 0,90 – 0,99    |             |
| Močvirje               |               | Nafta obleplja močvirsko rastlinstvo in temeljni substrat.   |                               | 0,1 – 1,0                                     | 0,5 – 5   | 0,001 – 0,01   |             |

V preglednici 4 je prikazana debelina naftne plasti na obali glede na tip obale in vrsto nafte. V preglednici 5 pa so prikazani izračuni zadrževalne kapacitete obale za različne tipe obal (glede na značilen nagib terena) v primeru štirimetrskega razpona plimovanja in metrskih valov. Peščene obale vsebujejo največjo količino nafte predvsem zaradi velike širine položnega dela obale ob morju. Prodnate obale imajo strmejši naklon in zadržijo manjšo debelino nafte, vendar pa je tam večja globina pronicanja nafte na območju plimovanja. Skalnate obale vsebujejo zaradi majhne globine pronicanja nafte in strmega terena zelo malo nafte (Etkin in sod., 2007). Na sliki 4 je prikazana z nafto onesnažena obala z označeno širino in dolžino obale.



Slika 4: Peščena obala onesnažena z nafto (Prirejeno po: <http://www.retenews24.it/rtn24/esteri/stati-uniti-disastro-ambientale-in-california-80mila-litri-di-petrolio-nelloceano-pacifico/>)

Preglednica 4: Debelina naftne plasti glede na tip obale in vrsto nafte (Prirejeno po: Gundlach, 1987)

| Tip obale                        | Vrsta nafte         |                           |               |               |
|----------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------|---------------|
|                                  | Srednje težka nafta |                           | Lahka nafta   | Težka nafta   |
|                                  | Debelina [mm]       | Standardna deviacija [mm] | Debelina [mm] | Debelina [mm] |
| Skalnatne pečine (izpostavljene) | 2                   | NA                        | 0,5           | 2             |
| Peščene obale                    | 17                  | 19                        | 4             | 25            |
| Peščeno-prodnate obale           | 9                   | 11                        | 2             | 15            |
| Poplavne ravnice                 | 6                   | 6                         | 3             | 10            |
| Skalnatne pečine (v zavetju)     | 5                   | NA                        | 1             | 10            |
| Močvirja                         | 30                  | 14                        | 6             | 40            |
| Erodibilna šotna obala           | 4                   | NA                        | 1             | 10            |

NA = ni podatka

Preglednica 5: Izračuni kapacitete zadrževanja nafte na obali za različne tipe obal za primer štirimetrskega razpona plimovanja in metrskih valov (Prirejeno po: Gundlach, 1987)

| Lokacija           | Izračun   | Tip obale |                    |                   |          |                  |          |
|--------------------|---|-----------|--------------------|-------------------|----------|------------------|----------|
|                    |   | Skalnatna | Peščena            |                   | Prodnata | Poplavna ravnica | Močvirje |
|                    |   |           | Prednji obalni pas | Zadnji obalni pas |          |                  |          |
| Nafta na površju   | Naklon obale [°]                                    | 80        | 2,9                | 1,3               | 5,1      | 0                | 0        |
|                    | Območje plime + območje pljuskanja valov [vert., m] | 5,0       | 4,5                | 0,5               | 5,0      | 5,0              | 5,0      |
|                    | Povprečje skupne kapacitete [m <sup>3</sup> /m]     | 0,01      | 1,62               | 0,4               | 0,50     | 0,12             | 0,30     |
| Nafta pod površjem | Naklon obale [°]                                    | NA        | 2,9                | 1,3               | 5,1      | NA               | NA       |
|                    | Pljuskanje valov [vert., m]                         | NA        | 0,5                | 0,5               | 1,0      | NA               | NA       |
|                    | Povprečje skupne kapacitete [m <sup>3</sup> /m]     | NA        | 0,04               | 0,10              | 0,18     | NA               | NA       |
| Skupaj             | Povprečje skupne kapacitete [m <sup>3</sup> /m]     | 0,01      | 2,16               |                   | 0,68     | 0,12             | 0,30     |



Gundlach (1987) in Reed in sod. (1989) so prišli do zaključka, da je kapaciteta zadrževanja nafte na obali odvisna tako od lastnosti nafte kot tudi lastnosti obale. Kapaciteta zadrževanja je sestavljena iz dveh komponent – maksimalnega nalaganja na površju in maksimalnega nalaganja pod površjem. Cheng in sod. (2000) so kapaciteto obale izrazili z enačbo:

$$M_* = \rho_o(L_t T_m + C_v D_p L_s) \quad (6)$$

Pomen oznak v enačbi:

$T_m$  - maksimalna debelina nafte

$L_t$  - širina obale, ki je izpostavljena plimovanju in pljuskanju valov

$D_p$  - globina pronicanja

$C_v$  - vsebnost nafte v sedimentu

$L_s$  - širina območja pljuskanja valov

$\rho_o$  - gostota nafte

Parametri o debelini nafte  $T_m$ , vsebnosti nafte v zemljini in globini pronicanja nafte  $D_p$  izhajajo iz empiričnih vrednosti (Gundlach, 1987) in so prikazani v preglednici 6 (Cheng in sod., 2000). Kapaciteta zadrževanja nafte prikazana v preglednici 5, se lahko uporablja v modelih z navedbo amplitude med plimo in oseko in naklona pobočja, ki opredeljujeta širino obale za katero velja prostornina kapacitete zadrževanja. Tak pristop so uporabili French in sod. (1996): npr. za peščene obale je definiran naklon 0,10 - 0,22 in amplituda plimovanja na ameriški obali ob Mehiskem zalivu 0,3 m.

Preglednica 6: Izpeljane kapacitete zadrževanja nafte z ocenjeno enoto površine zadrževalne kapacitete (Prirejeno po: Cheng in sod., 2000, Gundlach, 1987)

| Tip obale        | Maksimalna debelina nafte na površini [mm] glede na viskoznost |                           |                      | Kapaciteta zadrževanja nafte pod površino |                           | Ocenjena maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte [m <sup>3</sup> nafte/m <sup>2</sup> zemljine]* glede na viskoznost |                           |                      |
|------------------|--|---------------------------|----------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|----------------------|
|                  | Nizka <30 [mPas]   | Srednja 30 – 2.000 [mPas] | Visoka >2.000 [mPas] | Globina nafte [mm]                        | Delež vsebnosti nafte [%] | Nizka <30 [mPas]   | Srednja 30 – 2.000 [mPas] | Visoka >2.000 [mPas] |
| Skalnata pečina  | 0,5  | 2                         | 2                    | 0   | 0                         | 0,0005   | 0,0020                    | 0,0020               |
| Peščena          | 4  | 17                        | 25                   | 50  | 9,8                       | 0,0040   | 0,0170                    | 0,0250               |
| Peščena/prodnata | 2  | 9                         | 15                   | 180                                       | 8,3                       | 0,0021   | 0,0091                    | 0,0151               |
| Poplavna ravnica | 3  | 6                         | 10                   | 0   | 0                         | 0,0030   | 0,0060                    | 0,0100               |
| Skalnata obala   | 1  | 5                         | 10                   | 0   | 0                         | 0,0010   | 0,0050                    | 0,0100               |
| Močvirje         | 6  | 30                        | 40                   | -   | -                         | 0,0060   | 0,0300                    | 0,0400               |
| Šota             | 1  | 4                         | 10                   | 0   | 0                         | 0,0010   | 0,0040                    | 0,0100               |

\* Ob predpostavki maksimalne debeline nafte na površini (100% pokritost) za maksimalno količino nafte pod površjem

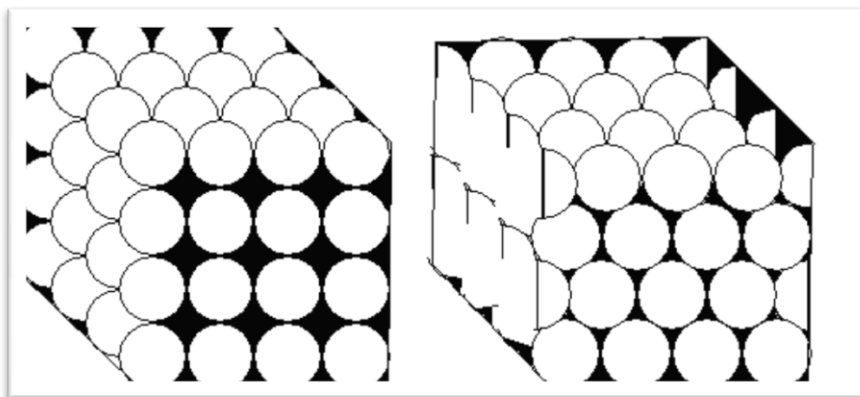
### 3.2.2 Računanje kapacitete zadrževanja nafte, ki temelji na podatkih Shoreline Cleanup Assessment Techniques (SCAT)

Na osnovi opazovanih razlitij nafte so bile izdelane številne študije o nalaganju nafte na obalo in zadrževalni kapaciteti obale. Da bi lahko uporabili katero od teh opazovanj v matematičnih modelih in določili maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali, moramo poznati tip obale in na obali se mora nalaožiti veliko nafte. V številnih študijah (razen Gundlach, 1987) znaša maksimalna kapaciteta zadrževanja surove nafte v obalnih zemljinah približno 10-12%, najverjetneje glede na prostornino por (11%, Torrey Canyon (Smith, 1968); 10%, Amoco Cadiz (Blount, 1978); 12%, Pek Slip (Robinson,

1979), cit. po Etkin in sod., 2007). V drugih razlitjih znaša maksimalna vsebnost nafte v obalnih zemljinah, izražena kot masa na maso zemljine okoli 20-50 g/kg (20.000 ppm, Arco Anchorage (Chamberlain in sod., 1987; Lindstedt-Siva in sod., 1987; Pearson in sod., 1986); 50.000 ppm, Sivand (Little, 1987), cit. po Etkin in sod., 2007). Druge študije ne nudijo podatkov v takšni obliki, da bi lahko neposredno izrazili kapaciteto zadrževanja nafte na volumen zemljine (Etkin in sod., 2007).

Leta 1989, med odpravljanjem posledic naftnega razlitja Exxon Valdez, so bile izvedene raziskave SCAT na 5221 km obale osmih glavnih tipov v zalivu Prince William Sound, Aljaska. Analizirali so globino penetracije nafte glede na vrsto obalne zemljine. Po pričakovanjih je bilo ugotovljeno, da globina penetracije narašča s količino nafte, ki doseže obalo. Raziskava je pokazala razlike v globini penetracije nafte med različnimi tipi obal in pri vsakem tipu obale tudi glede na količino nafte, ki je dosegla obalo.

Slika 5 prikazuje idealiziran diagram intersticijskega prostora por med zrn napolnjenega z nafto ob doseženi kapaciteti. V naravi bo v nasičeni zemljini manj nafte, ker so zrna tesneje zbita.



Slika 5: Idealiziran diagram intersticijskega prostora por med zrn, napolnjen z nafto ob polni kapaciteti (levo). V naravi bo v nasičeni zemljini manj nafte, ker so zrna tesneje zbita (desno) (Etkin in sod., 2007)

Prostornino nafte v popolnoma nasičeni zemljini lahko izrazimo z enačbo (Etkin in sod., 2007):

$$V_{oil} = 1 - \left[ \left(\frac{1}{2}r\right)^3 \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) \right] \quad (7)$$

ali  $V_{oil} = 0.4764 \text{ m}^3 \text{ oil/m}^3$  ( $476.8 \text{ l/m}^3$ ) zemljine, ne glede na premer zrn, če se zrna v zemljini nahajajo v takšni obliki, kot je prikazano na sliki 1 (levo). Če so zrna tesneje zbita, tako kot prikazuje slika 4 (desno), bo prostornina nafte manjša.  $476.8 \text{ l/m}^3$  predstavlja teoretično maksimalno nasičenost. V naravi niso vsa zrna enake velikosti. Manjša zrna so ponavadi še tesneje zbita v porah večjih zrn (Etkin in sod., 2007).

Če znaša zasičenost por 50-100% ali če je sestava zemljine takšna, kot je prikazana na sliki 4 (desno) znaša količina nafte v zasičeni zemljini v povprečju  $200\text{-}400 \text{ l/m}^3$  (Gillie in sod., 1999). Če so tla nasičena z vodo (van Genuchten, 1980) pa se pričakuje, da je v večini primerov le 10-20% por napolnjenih z nafto, preostanek pa z zrakom in vodo. Ob predpostavki, da je zemljina zasičena in da maksimalna prostornina por, ki je lahko zapolnjena znaša 20% celotne prostornine por, izračunamo

količino nafte v zemljini na enoto površine tako, da prostornino z nafto nasičene zemljine pomnožimo z  $80 \text{ l/m}^3$ . V primerih, ko ostane nafta tudi na površini, je potrebno količini nafte v zemljini prišteti še količino nafte na površini zemljine (Etkin in sod., 2007). Natančne vrednosti zgoraj navedenih meritev in izračunov za različne tipe obal, ki so bile vključene v raziskave SCAT se nahajajo v literaturi (Etkin in sod., 2007)

### 3.2.3 Računanje kapacitete zadrževanja nafte na podlagi laboratorijskih poskusov

Opravljeni so bili tudi različni laboratorijski poskusi za oceno kapacitete zadrževanja nafte na obali. V poskusu imenovanem Subsurface Oil in Coarse Sediments Experiments (SOCSEX), sta Harper in Sergy (2007) poskušala simulirati obnašanja nafte na obalah z zemljinami grobih frakcij, da bi določila vrednosti prodiranja in zadrževanja nafte. Laboratorijski poskus je vključeval:

- šestnajst vrst zemljin (od peska debeline 0.75 mm do 45 mm velikih prodnikov)
- pet preizkusnih vrst nafte (tri surove nafte, dve kurilni olji)
- različne stopnje razgradnje nafte
- različne temperature in cikle plimovanja.

Izkazalo se je, da imajo zemljine z visoko prepustnostjo nizko zadrževanje in obratno, zemljine z nizko prepustnostjo imajo visoko sposobnost zadrževanja nafte. Večina preizkusnih vrst nafte je neovirano prodrla v zemljine grobih frakcij (zelo veliki prodniki). Stopnja zadrževanja je znašala manj kot  $100 \text{ l/m}^3$ , s srednjo vrednostjo  $44,8 \text{ l/m}^3$ . Večina vrst nafte ni prodrla v grobi pesek. Ugotovljeno je bilo, da stopnja razgradnje nafte in temperatura močno vplivata na prodiranje nafte in zadrževanje. Nafte ki so bile bolj razgrajene so izkazale nižjo penetracijo. Višje temperature znižajo viskoznost in povečajo penetracijo nafte. Težka kurilna olja so izkazala nižjo penetracijo in večje zadrževanje kot surove nafte. Rezultati poskusov glede vpliva plimovanja so pokazali, da manjše pore med zrni zemljine povzročajo večjo stabilizacijo (tj. manjšo možnost, da se nafta spet sprosti v morje) in da večje pore povečujejo mobilnost nafte. V zemljini grobih frakcij (srednji prodniki) se je tako količina nafte zmanjšala za 40% glede na prvotno količino, v zemljinah finih frakcij pa so bile spremembe količine nafte manjše (Etkin in sod., 2007).

Zadrževanje nafte v zemljini je bilo izračunano z enačbo (Etkin in sod., 2007):

$$\frac{V_{oil}}{V_{sed}} = \frac{t_0 - t_1 \cdot A}{d \cdot A} \quad (8)$$

Pomen oznak v enačbi:

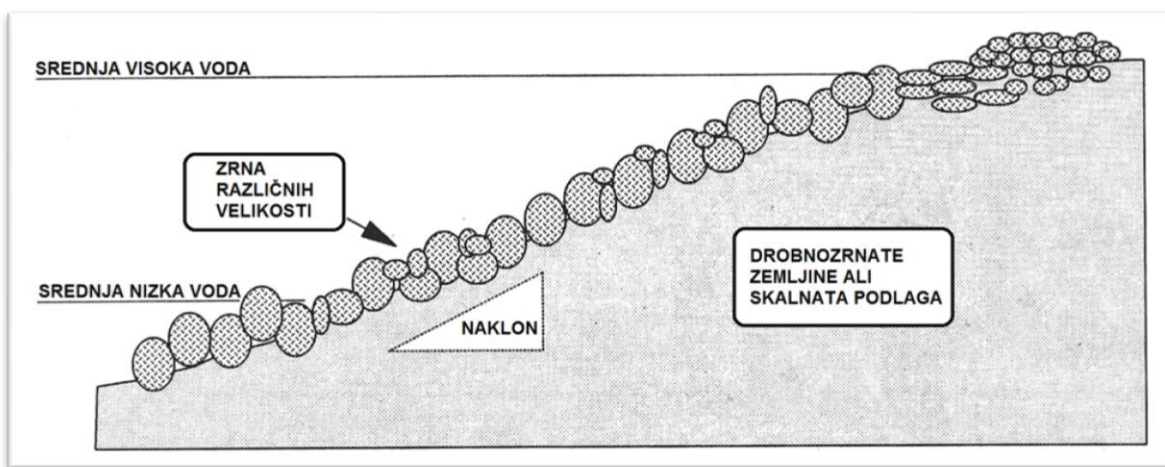
- $t_0$  debelina nafte na začetku poskusa
- $t_1$  debelina nafte na koncu poskusa
- $d$  globina prodora nafte
- $A$  površina prečnega prereza poskusne zemljine

Rezultati laboratorijskega poskusa so podani v literaturi (Etkin in sod., 2007). Eksperimentalni podatki so zgolj informativni in omogočajo vpogled v vključene mehanizme, dejanske količine nafte, ki prodre v zemljino na naravnih obalah pa z laboratorijskimi poskusi ne moremo določiti (Etkin in sod., 2007).

### 3.2.4 Teoretični izračuni kapacitete zadrževanja nafte na obali s hidravličnim modeliranjem obale

Najenostavnejši način računanja kapacitete obale za zadrževanje nafte pod površino obalne zemljine je, da izračunamo prostornino obale, ki bi lahko zadrževala nafto in nato še efektivno poroznost obale tj. tisti delež por, ki ga lahko zaseda nafta oziroma tisti delež por, ki ga ne zasedata voda ali zrak (Etkin in sod., 2007).

Struktura zemljine je pomemben dejavnik. Hardisty (1990) je predlagal za zemljine na naravnih obalah poroznost v razponu 0,36 do 0,40. Humphrey in sod. (1993) predpostavljajo, da je poroznost neodvisna od velikosti in porazdelitve velikosti zrn zemljine in se giblje med 0,12 in 0,46. Na sliki 6 je prikazan prečni prerez obale iz debelozrnatega materiala.



Slika 6: Prečni prerez obale iz debelozrnatega materiala (Prirejeno po Humphrey in sod., 1993)

Humphrey in sod. (1993) so dognali, da lahko maksimalno kapaciteto obale izračunamo po enačbi:

$$C_{max} = L(m) \cdot W(m) \cdot D(m) \cdot n_{eff} \quad (9)$$

Pomen oznak v enačbi:

$L$  – dolžina obale v metrih

$W$  – širina obale v metrih

$D$  – globina obale (globina debelozrnate zemljine) v metrih

$n_{eff}$  – efektivna poroznost

Avtorji predpostavljajo, da je dolžino obale mogoče oceniti na podlagi daljinskega zaznavanja, širino obale pa z neposrednim merjenjem zaradi večje natančnosti določanja območja plimovanja. Najtežje je določiti globino debelozrnate zemljine, saj lahko prihaja do precejšnjih nihanj znotraj območja določanja maksimalne kapacitete obale. Če je obala izpostavljena plimovanju, je kapaciteta zadrževanja nafte odvisna od hidravličnih lastnosti obale in lastnosti nafte. V primeru daljšega obdobja izpostavljenosti (npr. dva tedna) se nafta nalaga na obalo dokler se nahaja v tekočem stanju (znatno bolj torej nafta z nižjo viskoznostjo in ob višjih temperaturah). Količino zadržane nafte lahko zapišemo kot:

$$V_0 = V_b n f \quad (10)$$

Pomen oznak v enači:

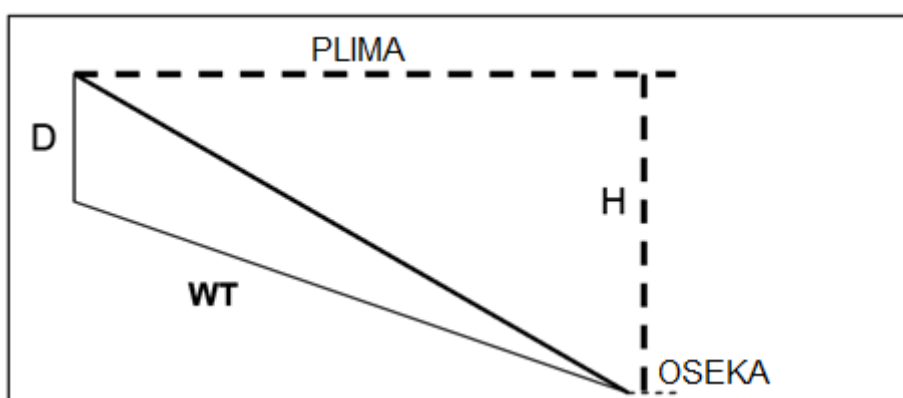
$V_0$  – prostornina zadržane nafte

$V_b$  – prostornina nenasičene obale ob oseki

$n$  – poroznost

$f$  – koeficient prostorninskega deleža por, ki zadržujejo nafto v zemljini

Kot poenostavitev lahko nenasičeno prostornino aproksimiramo s trikotnikom, ki ga omejujejo površina obale zgoraj, gladina podtalnice spodaj in maksimalna globina do gladine podtalnice na kopenski strani kot je prikazano na sliki 7.



Slika 7: Odsek obale, kjer je  $WT$  gladina podtalnice,  $H$  amplituda plimovanja (razlika med plimo in oseko) in  $D$  maksimalna globina do gladine podtalnice na kopenski strani (povzeto po Etkin in sod., 2007)

Če imamo podatke o razponu plimovanja ( $H$ ), naklonu obale in maksimalni razdalji do gladine podtalnice ( $D$ ) lahko izračunamo prostornino odseka obale. Medtem, ko je prva dva parametra relativno enostavno pridobiti, so Boufadel in sod. (2007) ugotovili, da je vrednost  $D$  odvisna od različnih dejavnikov, kot so količina toka podtalnice proti morju, naklon obale in hitrost upadanja plime glede na vrednost hidravlične prevodnosti obale ( $K$ ). V tej študiji so Boufadel in sod. (2007) raziskovali odziv gladine podtalnice na plimovanje in predlagali podatke, ki so prikazani na sliki 7 za napoved globine nenasičene cone  $D$ , ki temelji na razponu plimovanja, naklonu obale, hidravlični prevodnosti obale in/ali povezavi obale z gladino podtalnice v smeri kopnega (tj. celinsko polnjenje obale v času upadanja plime) ali je od nje ločena (tj. na obalno gladino podtalnice vpliva samo hitrost upadanja plime in drenaža por) (Etkin in sod., 2007). Metoda zahteva oceno brezrazsežnega obdobja plimovanja  $T$ , ki jo izračunamo kot (Etkin in sod., 2007):

$$T = \frac{T^* K}{H} \quad (11)$$

Pomen oznak v enačbi:

$T^*$  – obdobje plimovanja

$K$  – hidravlična prevodnost zemljine

$H$  – amplituda plime (razlika med plimo in oseko)

Hidravlično prevodnost peščenih zemljin je mogoče oceniti glede na granulacijsko porazdelitev z uporabo enačbe Kozeny-Carmen (Etkin in sod., 2007):

$$K = \frac{\rho g}{\mu} C_k f_k(n) d_{10}^2 \quad (12)$$

$$f_k(n) = \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (13)$$

Pomen oznak v enačbah:

$K$  – hidravlična prevodnost zemljine

$f$  – prostornina frakcije, ki zadržuje nafto

$\rho$  – gostota

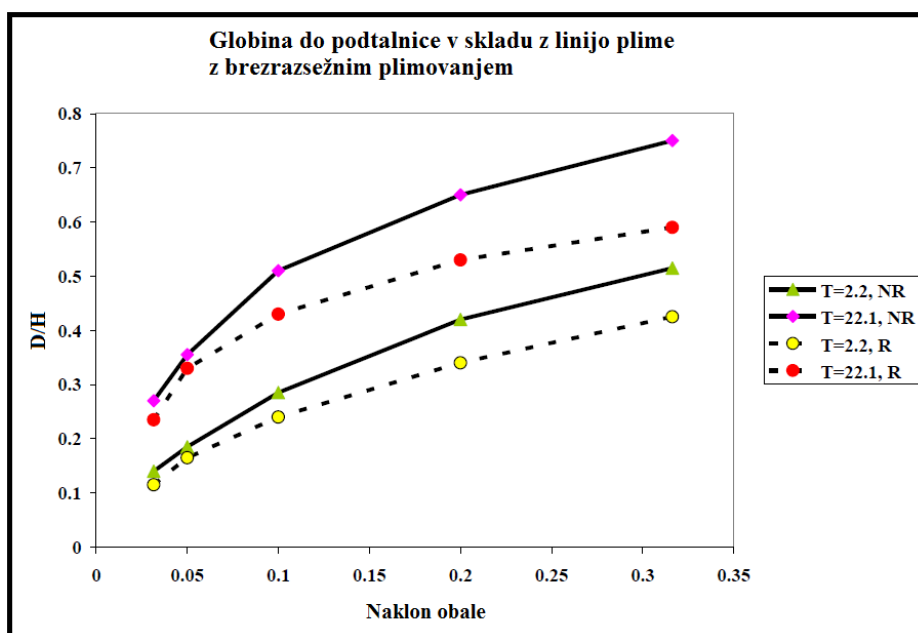
$g$  – gravitacijski pospešek

$\mu$  – dinamična viskoznost

$C_k$  –  $8.3 \times 10^{-3}$

$n$  – poroznost

$d_{10}$  – premer zrn, ki ustreza presejku 10% (geotehniška porazdelitev velikosti zrn)



Slika 8: Globina do podtalnice v skladu z linijo plime za drobno peščene obale z brezrazsežnim plimovanjem T (R-s celinskim napajanjem (tok podzemnih voda) s celinskega območja; NR – brez celinskega napajanja) (povzeto po Etkin in sod., 2007).

Slika 8 prikazuje razmerje  $D/H$  kot funkcijo naklona obale in plimovanja. Na podlagi enačbe (11) lahko sklepamo, da je razmerje  $D/H$  dveh obal enako ob enakem naklonu, dokler je enaka vrednost  $T$ . Na primer, če je  $T^* = 12,25$  ure,  $K = 0,1$  cm/s in  $H = 200$ cm, znaša vrednost  $T = 22,05$ . Enako vrednost  $T$  lahko dobimo, če ima obala npr. večjo prepustnost  $K = 0,2$  m/s in večjo amplitudo plimovanja  $H = 400$  cm. Za primere, ko se vrednosti  $T$  nahajajo v območju dveh vrednosti, ki so prikazane na sliki 7 (2,2 in 22,1), lahko ustrezna razmerja  $D/H$  določimo z interpolacijo rezultatov na sliki 7. Rezultati na sliki 7 temeljijo na teoriji, ki je opisana v literaturi (Boufadel, 2000; Naba in sod., 2002; Li in sod., 2007, cit. po Etkin in sod., 2007).

Obstajajo različne teoretične obravnave vpliva razvrščenosti zemljin za določitev poroznosti. Vendar na osnovi terenskih opazovanj znaša poroznost običajno približno 25 do 30%, ker so majhne pore vedno napolnjene z manjšimi delci zemljine.

Parameter  $f$  predstavlja volumen frakcije, ki zadržuje nafto. Odvisen je od velikosti drobnih por, v katerih se lahko zadrži preostala (»presežna«) nafta. Ta frakcija se povečuje z zmanjšanjem srednje velikih por (zaradi težavnega merjenja srednje velikosti por se lahko kot nadomestek uporablja srednja velikost zrn zemljine). Povedano drugače to pomeni, da prodnate obale lahko zadržijo več nafte od drobno peščenih (kot odstotek poroznosti), vendar pa to vprašanje ni dokončno rešeno in zahteva nadaljnje raziskave. Kot prvi približek lahko uporabimo podatke zasičenosti zemljine z zrakom in vodo, pri katerih je preostanek prostih por običajno 10 do 20% poroznosti (van Genuchten, 1980). Tako je smiselno sklepati, da je  $f$  enak 0,1 do 0,2 za nafte z nizko viskoznostjo, ki lahko prodrejo globoko v pore. Nafte z višjo viskoznostjo prodrejo manj globoko in na neki globini je viskoznost dovolj velika, da nafta ne pronica naprej v zemljino. Tako naj bi vrednost  $f$  upadala in se asimptotično približevala vrednosti nič pri določeno visoki viskoznosti. Meritev tega razmerja pa bi morala temeljiti na poskusnih in opazovanih podatkih (Etkin in sod., 2007).

Teoretično določanje kapacitete zadrževanja nafte na obali vključuje samo nafto, ki pronica v zemljino in se v njej zadržuje in ne vključuje nafte, ki se kopiči na površini. Zato je tak način računanja primeren le za lahke vrste nafte, ki ne ustvarijo debele vrhnje plasti in skoraj v celoti prodrejo v obalno zemljino. (Etkin in sod., 2007).

## 4 KAPACITETA ZADRŽEVANJA NAFTE NA ODSEKIH SLOVENSKE OBALE

### 4.1 Izbira metode

V poglavju 3 smo podrobneje opisali različne načine določanja maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali. Ugotovili smo, da z laboratorijskimi poskusi, dejanske količine nafte, ki vdre v zemljino ne moremo določiti (enačba 8). Teoretični izračun kapacitete zadrževanja nafte na obali s hidravličnim modeliranjem (enačbi 9 in 10) zahteva podatke, ki jih nimamo na razpolago, enako velja za račun kapacitete obale, ki temelji na podatkih SCAT. Za uporabo teh enačb je nujno predhodno izvesti samostojno študijo, v kateri je potrebno zbrati in prikazati potrebne parametre za vse odseke slovenske obale. Pri podatkih, ki so v večini primerov takoj na razpolago ali jih je mogoče enostavno in hitro pridobiti, je najbolj primeren način določanje maksimalne kapacitete nafte na obali na podlagi empiričnih podatkov, ki ga je možno tudi preprosto vgraditi v večino modelov naftnega razlitja. Kapaciteto obale bomo v nadaljevanju naloge računali z empirično enačbo (6), ki so jo predlagali in definirali Cheng in sod. (2000). Enačba temelji na terenskih podatkih, objavljenih v Gundlach (1987) ter Reed in sod. (1989) in upošteva, da maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte sestavljata maksimalno nalaganje nafte na površju in pod površjem. Račun smo izvedli samo za prednji obalni pas, saj se na slovenski obali le redko pojavlja zadnji obalni pas bodisi zaradi naravne (klif) bodisi zaradi umetne (grajena obala) ovire.

### 4.2 Izbira odsekov slovenske obale

Za potrebe določanja kapacitete obale za zadrževanje nafte smo uporabili klasifikacijo tipov obale v Sloveniji, ki jo je zasnoval in opisal Bosnič (2014). Izdelal je seznam tipov obal, ki se pojavljajo v Sloveniji in uvedel klasifikacijo tipov obale glede na ranljivost za onesnaženje z nafto. Najprej je obalo razdelil na območja glede na geomorfološki tip obale, nato pa kategorizacijo dopolnil še s popravki, ki se nanašajo na druge dejavnike, ki vplivajo na ranljivost obale (okoljski pomen, gospodarstvo, turizem in druge ekonomske panoge). Končna kategorizacija z ocenami od 1 (najmanj ranljiva) do 5 (najbolj ranljiva obala) je prikazana na sliki 8. Izračunali bomo kapaciteto zadrževanja nafte na dveh odsekih različnih tipov obale in sicer za primer peščene in prodnate obale. Kot primer peščene obale smo izbrali odsek Debeli rtič 1, kot primer prodnate pa odsek Strunjan 4. Glede na omenjeno klasifikacijo se prvi uvršča med zelo ranljive obale, drugi pa med srednje ranljive. V primeru odseka Debeli rtič 1 smo ugotovili, da se stanje na terenu ne ujema z opisom v Bosnič (2014) in zato obravnavamo odsek Ankaran 5, ki smo ga preverili na terenu in ugotovili, da se na delu odseka nahaja območje peščene obale (preostali del prodnate obale). V nadaljevanju se bo odsek z imenom Ankaran 5 nanašal le na peščeni pas obale znotraj samega odseka. V diplomski nalogi Bosnič (2014) se tip obale in stopnje ranljivosti odseka označenega številko 40 nanašajo na odsek 38, v primeru odseka 41 pa na odsek 40. Na slikah 10 in 11 so prikazane popravljene stopnje ranljivosti slovenske obale za območja, ki vsebujeta izbrana odseka.

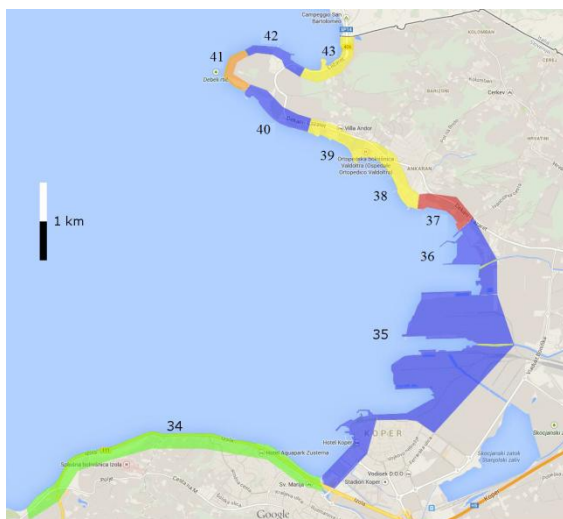


|    | Ime obale            | Tip obale                                | Stopnja ranljivosti (brez popravkov) | Stopnja ranljivosti (s popravki) | Dolžina (km) |
|----|----------------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1  | Izliv Dragonje       | Umetna obala                             | 1                                    | 3                                | 0,1          |
| 2  | Soline               | Umetna obala                             | 1                                    | 4                                | 4,6          |
| 3  | Izliv Kanal Dragonje | Zatravljen nasip                         | 2                                    | 3                                | 0,1          |
| 4  | Izliv Seče           | Prodната obala majhnega naklona          | 3                                    | 4                                | 0,6          |
| 5  | Seča 2               | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 0,3          |
| 6  | Seča 3               | Ozka prodната ravnica                    | 3                                    | 3                                | 0,7          |
| 7  | Lucija               | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 0,6          |
| 8  | Marina Portorož      | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 1,3          |
| 9  | Portorož 2           | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 0,3          |
| 10 | Portorož 3           | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,7          |
| 11 | Portorož 4           | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 2            |
| 12 | Piran 1              | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 0,7          |
| 13 | Piran 2              | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,6          |
| 14 | Marina Piran         | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,8          |
| 15 | Rt Madona v Piranu   | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 3                                | 0,7          |
| 16 | Piran 3              | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,5          |
| 17 | Piran 4              | Prodната obala majhnega naklona          | 3                                    | 3                                | 0,7          |
| 18 | Fiesa 1              | Umetna obala                             | 1                                    | 4                                | 0,1          |
| 19 | Jezera v Fiesi       | Kanal                                    | 3                                    | 4                                | 0,1          |
| 20 | Pacug 1              | Ozka prodната ravnica pod vnožjem pečine | 3                                    | 3                                | 1,6          |
| 21 | Pacug 2              | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 0,3          |
| 22 | Strunjan 1           | Poplavna ravnica                         | 5                                    | 5                                | 0,3          |
| 23 | Strunjan 2           | Zatravljen nasip                         | 2                                    | 2                                | 1,9          |
| 24 | Strunjan 3           | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,5          |
| 25 | Strunjan 4           | Prodната obala majhnega naklona          | 3                                    | 3                                | 0,7          |
| 26 | Strunjan 5           | Ozka prodната ravnica pod vnožjem pečine | 3                                    | 4                                | 0,4          |
| 27 | Strunjan 6           | Skalnata ravnica pod vnožjem pečine      | 3                                    | 4                                | 1,6          |
| 28 | Strunjan 7           | Ozka prodната ravnica pod vnožjem pečine | 3                                    | 3                                | 1,3          |
| 29 | Izola 1              | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 0,8          |
| 30 | Marina Izola         | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 1,5          |
| 31 | Izola 2              | Prodната obala majhnega naklona          | 3                                    | 4                                | 1,1          |
| 32 | Izola 3              | Umetna obala                             | 1                                    | 2                                | 0,2          |
| 33 | Izola 4              | Skalnata ravnica                         | 2                                    | 2                                | 0,6          |
| 34 | Semedela             | Umetna obala iz velikega kamna           | 2                                    | 2                                | 4,8          |
| 35 | Luka Koper           | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 5,4          |
| 36 | Ankaran 1            | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 2,2          |
| 37 | Sv. Katarina         | Močvirje                                 | 5                                    | 5                                | 0,6          |
| 38 | Ankaran 3            | Prodno-peščena obala                     | 3                                    | 3                                | 1            |
| 39 | Ankaran 4            | Prodната obala majhnega naklona          | 3                                    | 3                                | 0,5          |
| 40 | Ankaran 5            | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 1,2          |
| 41 | Debeli rtič 1        | Peščena obala                            | 4                                    | 4                                | 0,9          |
| 42 | Debeli rtič 2        | Umetna obala                             | 1                                    | 1                                | 0,8          |
| 43 | Debeli rtič 3        | Prodno-peščena obala                     | 3                                    | 3                                | 0,9          |

Slika 9: Odseki obale v Sloveniji, njihov tip, stopnja ranljivosti, popravljena stopnja ranljivosti in dolžina. Z modro barvo je označena stopnja ranljivosti 1, z zeleno stopnja 2, z rumeno 3, z oranžno 4 in z rdečo 5 (Bosnič, 2014)



Slika 10: Popravljene stopnje ranljivosti slovenske obale od Strunjana do Izole (Bosnič, 2014)



Slika 11: Popravljenе stopnje ranljivosti slovenske obale od Izole do meje z Italijo (Prirejeno po Bosnič, 2014)

### 4.3 Peščena obala – odsek Ankaran 5

Ocenjena dolžina peščene obale na odseku Ankaran 5 znaša  $d = 170$  m. Za račun maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali je najprej potrebno izračunati širino obale, ki je izpostavljena plimovanju in pljuskanju valov ( $L_t$ ) in širino območja pljuskanja valov ( $L_s$ ). Predhodno moramo določiti še naklon obale ( $s$ ), ki smo ga izračunali s pomočjo Mednarodne (INT) pomorske karte Koprski zaliv, iz razmerja med izmerjeno razdaljo med izobato globine 10 m in obalno črto ter njuno višinsko razliko. Naklon obale je v našem primeru  $s = 4,6$  %. Slika 12 prikazuje peščeno obalo na odseku Ankaran 5.



Slika 12: Peščena obala – Ankaran 5

Poleg naklona potrebujemo še podatek o višini plimovanja, ki smo ga dobili iz plimnih tablic (Ličer in sod., 2015). Povprečna višina plimovanja znaša 80 cm. Valovi se spreminjajo z vetrom (smerjo in jakostjo), vendar na območju slovenske obale v normalnih razmerah le redko presegajo višino 50 cm, kot povprečje pa smo izbrali višino vala za območje pljuska 30 cm. Ob poznavanju omenjenih višin in naklona obale lahko z uporabo kotnih funkcij enostavno izračunamo širino obale, ki je izpostavljena plimovanju in pljuskanju valov ( $L_t$ ) ter širino območja pljuskanja valov ( $L_s$ ). Širina obale, ki je izpostavljena plimovanju in pljuskanju valov znaša  $L_t = 23,9$  m, širina območja pljuskanja valov pa  $L_s$

= 6,5 m. Potrebujemo še podatke o maksimalni debelini nafte ( $T_m$ ), globini pronicanja ( $D_p$ ), vsebosti nafte v zemljini ( $C_v$ ) in gostoto nafte. Prve tri parametre odčitamo iz preglednice 6 (Cheng in sod., 2000), vendar moramo za določanje maksimalne debeline nafte ( $T_m$ ) poznati še viskoznost nafte. Globina pronicanja znaša  $D_p = 0,05$  m, vsebnost nafte v zemljini pa  $C_v = 9,8$  %. Maksimalno kapaciteto obale bomo izračunali za tri različne vrste nafte glede na viskoznost in za primer dizelskega goriva. Kot lahko nafto smo izbrali nafto tipa Arabian Light, kot srednje težko nafto tipa Lago Treco, kot težko nafto tip Point Arguello – Heavy in kot primer dizelskega goriva Diesel (2002). Podatke o gostoti ( $\rho$ ) in viskoznosti ( $\eta$ ) nafte smo dobili v literaturi (Šaponja, 2014). Ob poznavanju gostote lahko odčitamo iz preglednice 6 vrednosti maksimalne debeline nafte ( $T_m$ ) in izračunamo maksimalno kapaciteto obale na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) z enačbo (6). Gostota nafte ( $\rho$ ), maksimalna debelina nafte ( $T_m$ ) in izračunana maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) za posamezne vrste nafte so prikazane v preglednici 7. Maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte na obali na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) pomnožimo z dolžino odseka obale ( $d$ ) in dobimo maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte na obali izbranega odseka ( $M$ ). Izračunane vrednosti za posamezen tip nafte so prikazane v preglednici 7

V programu Microsoft Excel smo izdelali enostavno orodje v obliki preglednice (preglednica 7), ki omogoča hitro in enostavno računanje maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali peščenega tipa.

V preglednico je potrebno vnesti naslednje vhodne podatke:

- dolžina obale ( $d$ )
- naklon obale ( $s$ )
- višina plimovanja
- višina vala za območje pljuska
- gostota nafte ( $\rho$ )
- viskoznost nafte ( $\eta$ )

Ni nam pa potrebno vnašati podatkov o globini pronicanja ( $D_p$ ), vsebosti nafte v zemljini ( $C_v$ ) in maksimalni debelini nafte ( $T_m$ ). Prva dva sta konstantna znotraj posameznega tipa obale in sta že vnesena, vrednost zadnjega pa izbiramo z uporabo vgrajene funkcije IF. Ko vnesemo v preglednico potrebne vhodne podatke se nam izpišejo vrednosti preostalih parametrov, ki jih potrebujemo za račun maksimalne kapacitete obale z enačbo (6) in vrednost izračunane kapacitete. Preglednica za računanje maksimalne kapacitete peščene obale je prikazana v preglednici 7.

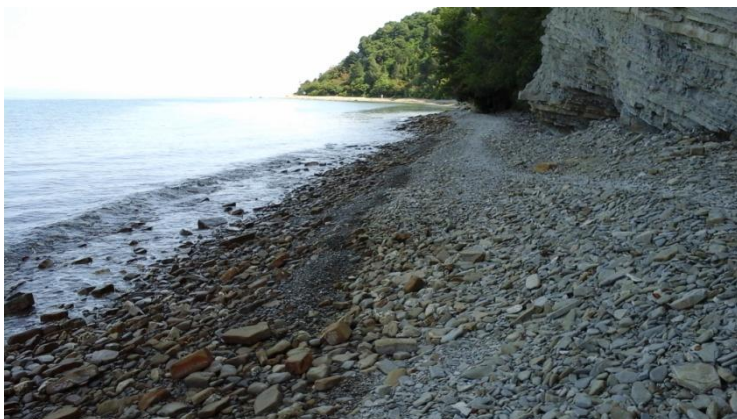
Preglednica 7: Podatki o gostoti ( $\rho$ ) in viskoznosti ( $\eta$ ) nafte, maksimalni debelini nafte ( $T_m$ ) in izračunana maksimalna kapaciteta obale na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) ter maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na obali izražena kot masa ( $M$ ) in kot prostornina ( $V$ ) za posamezni tip nafte (odsek Ankaran 5)

| PEŠČENA OBALA                       |               |            |                       |               |
|-------------------------------------|---------------|------------|-----------------------|---------------|
| Tip nafte                           | Arabian Light | Lago Treco | Point Arguelo - Heavy | Diesel (2002) |
| $d$ [m]                             | 170           | 170        | 170                   | 170           |
| $s$                                 | 0,046         | 0,046      | 0,046                 | 0,046         |
| Višina plimovanja [m]               | 0,8           | 0,8        | 0,8                   | 0,8           |
| Višina valov na območju pljuska [m] | 0,3           | 0,3        | 0,3                   | 0,3           |
| $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]         | 865,8         | 923        | 944,7                 | 846,8         |
| $\eta$ [mPas]                       | 14            | 272        | 3250                  | 2,76          |
| $L_s$ [m]                           | 6,5           | 6,5        | 6,5                   | 6,5           |
| $L_t$ [m]                           | 23,9          | 23,9       | 23,9                  | 23,9          |
| $T_m$ [m]                           | 0,004         | 0,017      | 0,025                 | 0,004         |
| $D_p$ [m]                           | 0,05          | 0,05       | 0,05                  | 0,05          |
| $C_v$                               | 0,098         | 0,098      | 0,098                 | 0,098         |
| $M_*$ [kg/m]                        | 110,5         | 404,9      | 595,2                 | 108,1         |
| $M$ [kg]                            | 18788,8       | 68825,9    | 101178,1              | 18376,5       |
| $V$ [m <sup>3</sup> ]               | 21,7          | 74,6       | 107,1                 | 21,7          |

Iz rezultatov je razvidno, da ima viskoznost nafte velik vpliv na kapaciteto zadrževanja nafte na obali. Razlika v maksimalni kapaciteti med lahko nafto Arabian Light in težko nafto Point Arguello – Heavy znaša približno 85,4 m<sup>3</sup> nafte. Maksimalna kapaciteta pri težki nafti je približno petkrat večja. Razvidno je tudi, da je zadržana količina dizelskega goriva Diesel (2002) volumsko enaka količini lahke nafte Arabian Light, saj se dizelsko gorivo uvršča glede na viskoznost med lahke nafte in je tako razlika v maksimalni kapaciteti odvisna samo od gostote izbranih tipov nafte. Razlika znaša približno 412 kg oziroma 2,2%.

#### 4.4 Prodnata obala – odsek Strunjan 4

Račun za maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte na obali na odseku Strunjan 4 smo izvedli po enakem postopku kot za odsek Ankaran 5. Dolžina odseka znaša  $d = 700$  m, naklon obale pa  $s = 8,7\%$  in smo ga izračunali iz razmerja med izmerjeno razdaljo med izobato globine 10 m in obalno črto ter njuno višinsko razliko, za kar smo uporabili Pomorsko karto Piranski zaliv. Tudi v tem primeru višina plimovanja znaša 80 cm in višina vala za območje pljuska 30 cm. Širina obale, ki je izpostavljena plimovanju in pljuskanju valov znaša  $L_t = 12,7$  m, širina območja pljuskanja valov  $L_s = 3,5$  m in sta bili izračunani na enak način kot za odsek Ankaran 5. Na sliki 13 je prikazana prodnata obala na odseku Strunjan 4, na sliki 14 pa lahko vidimo različne velikosti prodnikov, ki se pojavljajo na omenjeni obali.



Slika 13: Prodnata obala – Strunjan 4



Slika 14: Različne velikosti prodnikov (od 0,2 do 25 cm) – Strunjan 4

Račun maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali smo izvedli za enake tipe nafte kot na odseku opisanem v poglavju 4.3. Globina pronicanja znaša  $D_p = 0,18$  m, vsebnost nafte v zemljini  $C_v = 8,3$  %, podatki o maksimalni debelini nafte  $T_m$  za posamezne tipe nafte pa so prikazani v preglednici 8. Vsi trije parametri izhajajo iz preglednice 6 (Cheng in sod., 2000).

Maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) izračunano z enačbo (6), rezultat pa pomnožimo z dolžino odseka obale ( $d$ ) in dobimo maksimalno kapaciteto zadrževanja nafte na obali ( $M$ ) odseka Strunjan 4. Izračunane vrednosti za posamezen tip nafte so prikazane v preglednici 8.

V programu Microsoft Excel smo uporabili isto preglednico kot za peščeno obalo, le da smo vnesli ustrezne podatke o nafti in obali (preglednica 8) s katero smo hitro in enostavno izračunali maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali prodnatega tipa.



Preglednica 8: Podatki o gostoti ( $\rho$ ) in viskoznosti ( $\eta$ ) nafte, maksimalni debelini nafte ( $T_m$ ) in izračunana maksimalna kapaciteta obale na dolžinski meter obale ( $M_*$ ) ter maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na obali izražena kot masa ( $M$ ) in kot prostornina ( $V$ ) za posamezni tip nafte (odsek Strunjan 4)

| PRODNATA OBALA                      |               |            |                       |               |
|-------------------------------------|---------------|------------|-----------------------|---------------|
| Tip nafte                           | Arabian Light | Lago Treco | Point Arguelo - Heavy | Diesel (2002) |
| $d$ [m]                             | 700           | 700        | 700                   | 700           |
| $s$                                 | 0,087         | 0,09       | 0,09                  | 0,09          |
| Višina plimovanja [m]               | 0,8           | 0,8        | 0,8                   | 0,8           |
| Višina valov na območju pljuska [m] | 0,3           | 0,3        | 0,3                   | 0,3           |
| $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]         | 865,8         | 923        | 944,7                 | 846,8         |
| $\eta$ [mPas]                       | 14            | 272        | 3250                  | 2,76          |
| $L_s$ [m]                           | 3,5           | 3,5        | 3,5                   | 3,5           |
| $L_t$ [m]                           | 12,7          | 12,7       | 12,7                  | 12,7          |
| $T_m$ [m]                           | 0,002         | 0,009      | 0,015                 | 0,002         |
| $D_p$ [m]                           | 0,18          | 0,18       | 0,18                  | 0,18          |
| $C_v$                               | 0,083         | 0,083      | 0,083                 | 0,083         |
| $M_*$ [kg/m]                        | 66,6          | 152,8      | 228,1                 | 65,1          |
| $M$ [kg]                            | 46607,0       | 106941,9   | 159686,3              | 45584,2       |
| $V$ [m <sup>3</sup> ]               | 53,8          | 115,9      | 169,0                 | 53,8          |

Izkazalo se je, da ima viskoznost znaten vpliv tudi na kapaciteto zadrževanja nafte na obali prodnatega tipa. Razlika v maksimalni kapaciteti med lahko nafto Arabian Light in težko nafto Point Arguello – Heavy znaša približno 115 m<sup>3</sup> nafte. V tem primeru je volumsko razmerje med maksimalno kapaciteto obale pri težki in lahki nafti 3:1. Kot smo omenili že v prejšnjem poglavju, se dizelsko gorivo uvršča med lahke nafte glede na viskoznost, zato je količina zadržanega dizelskega goriva Diesel (2002) volumsko enaka količini lahke nafte Arabian Light. Razlika v maksimalni kapaciteti obale za omenjena tipa nafte znaša manj kot 1 m<sup>3</sup> oziroma približno 1023 kg nafte (2,2%).

## 5 SPROŠČANJE NAFTE Z OBALE NA ODSEKIH ANKARAN 5 IN STRUNJAN 4

Ob stiku nafte z morsko obalo je poleg odlaganja pomemben še proces ponovnega sproščanja nafte z obale. Zato smo za odseka Ankaran 5 in Strunjan 4 izvedli tudi račun sproščanja, ki bi bilo mogoče ob morebitnem razlitju. Za račun smo uporabili enačbo (2) in pri tem predpostavili, da je zapolnjena maksimalna kapaciteta zadrževanja nafte na obali. Sproščanje nafte v posameznem časovnem koraku smo izračunali za iste tipe nafte, ki smo jih uporabili za določanje maksimalne kapacitete obale.

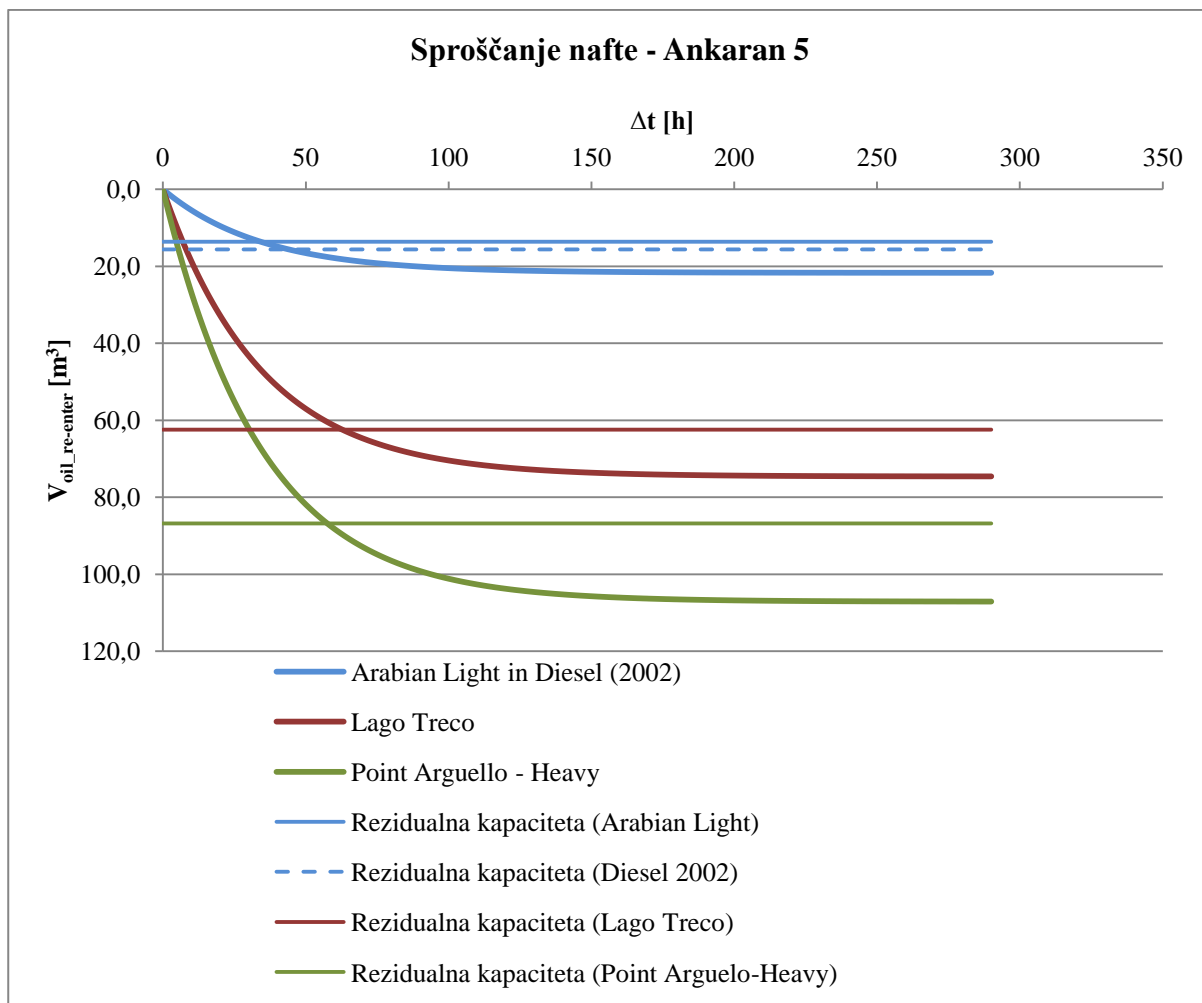
### 5.1 Sproščanje nafte z obale na odseku Ankaran 5

Za račun sproščanja nafte z obale moramo najprej izračunati konstanto razgradnje ( $k$ ) po enačbi (3). Za to potrebujemo podatek o razpolovnem času ( $\lambda$ ), ki ga odčitamo v preglednici 1. V izbranem primeru znaša razpolovni čas  $\lambda = 24$  h, vrednost izračunane konstante razgradnje pa  $k = 0,0289$ . Prostornina prvotno odložene nafte na obalo ( $V_{oil\_beach}$ ) je v izbranem primeru enaka maksimalni kapaciteti obale, kakor smo opisali v poglavju 4.3. Prostornine prvotno odložene nafte na obalo ( $V_{oil\_beach}$ ) za posamezni tip nafte so prikazane v preglednici 9.

Na podlagi znanega razpolovnega časa ( $\lambda$ ) smo izbrali časovni korak  $\Delta t = 1$  h, ki omogoča gladek grafični prikaz pojava. Račun smo izvedli v programu Microsoft Excel in rezultat prikazali v raztresenem grafikonu na sliki 15. Na X os smo nanašali časovni korak ( $\Delta t$ ), na Y os pa prostornino nafte, ki se sprosti v morje. Proces sproščanja se zaključi, ko je dosežena rezidualna kapaciteta obale, zato smo izračunali še prostornino rezidualne nafte. Za račun smo uporabili ocenjeno vrednost rezidualne kapacitete na podlagi eksperimentalnih podatkov (Humprey in Harper, 1993). Na podlagi viskoznosti izbranih vrst nafte smo, kakor je opisano v poglavju 3.1.2, izbrali vrednosti specifične rezidualne kapacitete zadrževanja nafte na obali na  $m^3$  zemljine, ki znašajo za lahko nafto  $40 l/m^3$  zemljine, za srednje težko nafto  $60 l/m^3$  zemljine, za težko nafto  $100 l/m^3$  zemljine in za dizelsko gorivo  $30 l/m^3$  zemljine. Iz podatkov dolžine odseka obale ( $d$ ), širine obale ( $L_t$ ) in globine pronicanja nafte ( $D_p$ ), podanih v preglednici 7, smo izračunali prostornino z nafto onesnažene zemljine, ki znaša  $203,3 m^3$ . Prostornino smo pomnožili s specifično rezidualno kapaciteto. Rezidualne kapacitete izbranega odseka obale za posamezni tip nafte so prikazane v preglednici 9.

Preglednica 9: Prostornina prvotno odložene nafte na obalo ( $V_{oil\_beach}$ ) in rezidualna kapaciteta obale za posamezni tip nafte – odsek Ankaran 5

| Tip nafte              | $V_{oil\_beach} [m^3]$ | Rezidualna kapaciteta [ $m^3$ ] |
|------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Arabian Light          | 21,7                   | 8,1                             |
| Lago Treco             | 74,6                   | 12,2                            |
| Point Arguello - Heavy | 107,1                  | 20,3                            |
| Diesel (2002)          | 21,7                   | 6,1                             |



Slika 15: Grafikon sproščanja nafte – Ankaran 5

Razpolovni čas ( $\lambda$ ), ki ga je definiral Torgrimson (1984) je odvisen samo od tipa obale in ne od tipa nafte. Prav tako enačbi (2) in (3) ne upoštevata lastnosti nafte, iz česar sledi, da je delež sproščene nafte glede na prvotno prostornino na obalo odložene nafte za posamezni časovni korak enak za vse tipe nafte, kar je razvidno iz slike 14. Iz rezultatov lahko razberemo, da je rezidualna kapaciteta za lahko nafto dosežena v času  $t = 34$  h, za dizelsko gorivo v času  $t = 44$  h, za srednje težko nafto v času približno  $t = 63$  h in za težko nafto v času  $t = 57,5$  h. Račun sproščanja nafte je pokazal, da je proces sproščanja nafte iz peščene obale razmeroma hiter, saj se pri izbranih vrstah nafte zaključi prej kot v treh dneh. Po končanem procesu sproščanja ostane na obali še rezidualna nafta, ki je izpostavljena procesom razgradnje, kot so izhlapevanje, disperzija, biorazgradnja in emulzifikacija. Iz grafikona vidimo še, da bi se, če ne bi upoštevali omejitve (rezidualne kapacitete) sproščanje nafte nadaljevalo in se v daljšem času asimptotično približevalo maksimalni kapaciteti obale. Po približno 250-300 urah bi tako vsa nafta z obale prešla nazaj v morje.

## 5.2 Sproščanje nafte z obale na odseku Strunjan 4

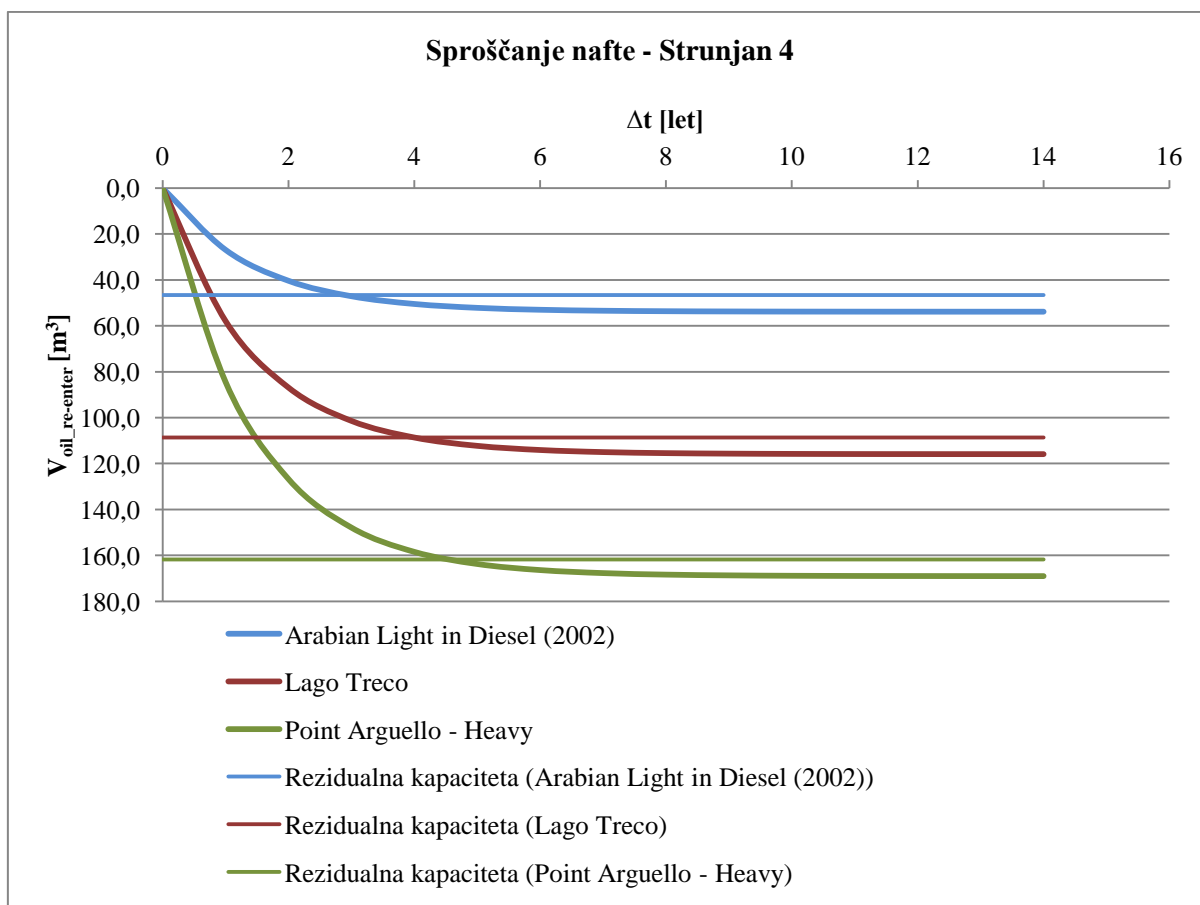
Račun sproščanja nafte z obale na odseku Strunjan 4 smo izvedli na enak način kot za odsek Ankaran 5. Najprej smo v preglednici 1 odčitali vrednost razpolovnega časa, ki znaša  $\lambda = 8760$  h (1 leto). Po enačbi 3 izračunamo konstanto razgradnje, ki znaša v izbranem primeru  $k = 0,6931$ . Prostornine prvotno odložene nafte na obalo ( $V_{oil\_beach}$ ) za posamezni tip nafte so prikazane v preglednici 10.



Preglednica 10: Prostornina prvotno odložene nafte na obalo ( $V_{oil\_beach}$ ) za posamezni tip nafte – Strunjan 4

| Tip nafte              | $V_{oil\_beach}$ [m <sup>3</sup> ] | Rezidualna kapaciteta [m <sup>3</sup> ] |
|------------------------|------------------------------------|---|
| Arabian Light          | 53,8                               | 7,2                                     |
| Lago Treco             | 115,9                              | 7,2                                     |
| Point Arguello - Heavy | 169                                | 7,2                                     |
| Diesel (2002)          | 53,8                               | 7,2                                     |

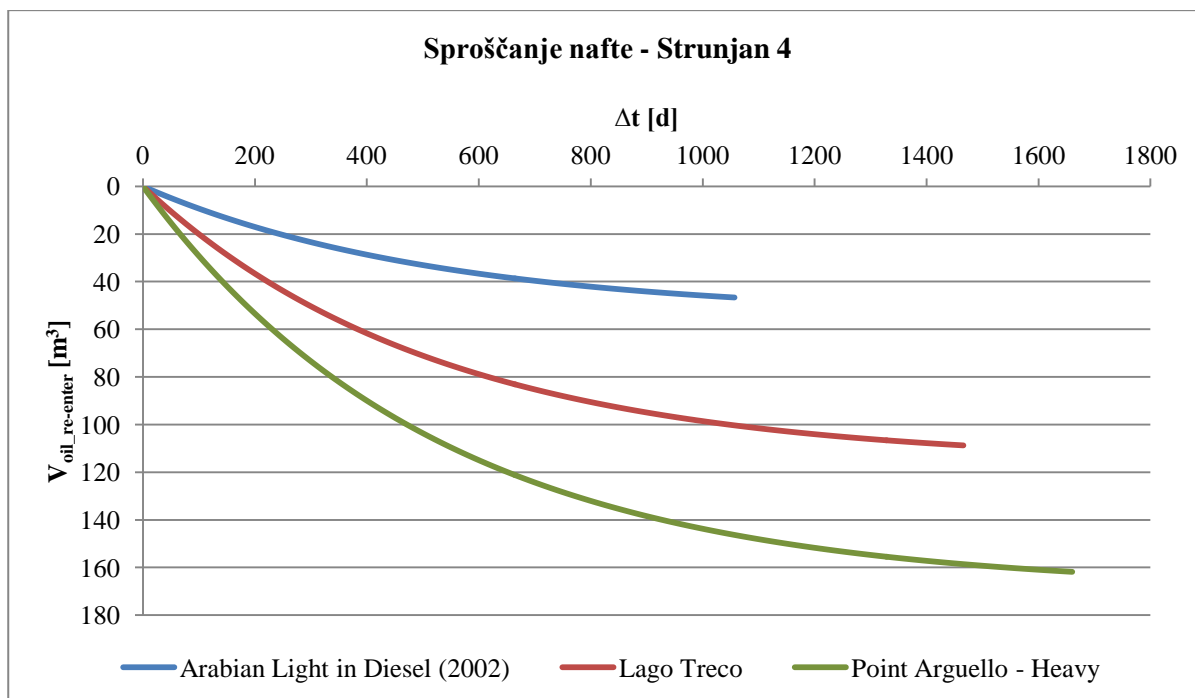
Pri prvem poskusu računa smo uporabili časovni korak  $\Delta t = 1$  leto. Račun smo izvedli v programu Microsoft Excel in rezultat prikazali v raztresenem grafikonu na sliki 14. Na X os smo nanašali časovni korak ( $\Delta t$ ), na Y os pa prostornino nafte, ki se sprosti v morje. Pri računu prostornine rezidualne nafte smo uporabili oceno rezidualne kapacitete za prodnato obalo na podlagi podatkov projekta BIOS (Humphrey in sod., 1993), ki znaša 4,5 l/m<sup>3</sup> zemljine ne glede na vrsto nafte. Prostornino z nafto prepojene zemljine smo izračunali iz podatkov dolžine odseka obale ( $d$ ), širine obale ( $L_t$ ) in globine pronicanja nafte ( $D_p$ ), ki se nahajajo v preglednici 8. Omenjena prostornina znaša 1595,1 m<sup>3</sup>, to smo pomnožili z ocenjeno rezidualno kapaciteto in tako dobili vrednost 7,2 m<sup>3</sup>, ki predstavlja rezidualno kapaciteto obale na izbranem odseku.



Slika 16: Grafikon sproščanja nafte – Strunjan 4

Tudi iz slike 16 je razvidno, da je odstotek sproščene nafte glede na prvotno prostornino nafte odložene na obalo, za posamezni časovni korak enak za vse tipe nafte. Proces sproščanja je za lahko nafto in dizelsko gorivo zaključen v obdobju dveh do treh let, za srednje težko in težko nafto pa v

obdobju štirih do petih let. Da bi dobili natančnejši potek krivulj sproščanja, smo račun do časa, ko je dosežena rezidualna kapaciteta, ponovili še s časovnim korakom  $\Delta t = 1$  dan. Razpolovni čas znaša v tem primeru  $\lambda = 365$  d, vrednost konstante razgradnje pa  $k = 0,0019$ . Rezultati so prikazani na sliki 16.



Slika 17: Grafikon sproščanja nafte do dosega rezidualne kapacitete – Strunjan 4

Iz slike 17 je razvidno, da z naraščanjem viskoznosti nafte, narašča tudi trajanje sproščanja nafte z obale. Sproščanje nafte, ki se ob upoštevanju rezidualne kapacitete obale sprosti v morje, traja  $t = 1057$  d v primeru lahke nafte in dizelskega goriva,  $t = 1466$  d v primeru srednje težke nafte in  $t = 1660$  d v primeru težke nafte. Proces sproščanja bi na prodnati obali torej trajal štiri do pet let, kar je popolnoma drugačno časovno merilo kot v primeru peščene obale. Rezidualna nafta se namreč na prodnati obali zaradi možnosti globokega prodiranja obdrži dlje časa v primerjavi s peščeno obalo. Potrebno pa je omeniti, da nismo imeli na razpolago različnih ocen rezidualne kapacitete na  $m^3$  zemljine glede na viskoznost nafte in smo zato uporabili eno samo ocenjeno vrednost za vse vrste nafte. Dejansko rezidualna kapaciteta narašča sorazmerno z viskoznostjo nafte. Poleg tega je potrebno omeniti še, da v tako dolgem časovnem merilu (več let) na količino nafte znatno vplivajo tudi procesi izhlapevanja, diperzije, biorazgradnje, emulzifikacije in možnost nastanka naravnega asfalta, ki v uporabljenih enačbah niso zajete. Del nafte pa bi zelo verjetno odstranili tudi v čistilnih akcijah, ki bi se ob onesnaženju slovenske obale nedvomno sprožile v najkrajšem možnem času.

## 6 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo se osredotočili na procese odlaganja in sproščanja nafte na obalo in z obale v primeru naftnega razlitja. Ugotovili smo, da je kapaciteta zadrževanja nafte na obali odvisna predvsem od tipa obale in vrste nafte. Tako imajo skalnate obale zaradi majhne globine pronicanja in strmega terena manjšo kapaciteto od položnejših prodnatih in peščenih obal. Količina nafte, ki se odloži na obalo je odvisna tudi od lastnosti nafte. Lahke nafte imajo večjo globino pronicanja od težkih, težke pa ustvarijo večjo debelino plasti na površini zrn zemljine. Prikazali smo različne načine določanja maksimalne kapacitete zadrževanja nafte na obali. Poenostavljeni ne vključujejo nekaterih pomembnih dejavnikov in lastnosti, ki zagotavljajo zanesljivost rezultatov, zahtevnejši in kompleksni načini pa zahtevajo veliko količino pogosto težko dostopnih podatkov.

Na podlagi zasnovane klasifikacije tipov obale v Sloveniji (Bosnič, 2014) smo izbrali dva odseka obale, pogosta v Sloveniji. Prvi je značilen primer peščene obale (Ankaran 5), drugi pa značilen primer prodnate obale (Strunjan 4). Izračunali smo zadrževalno kapaciteto obale na omenjenih odsekih, pri čemer smo izbrali metodo, ki ponuja ugodno razmerje med številom potrebnih in razpoložljivih podatkov ter v literaturi ovrednoteno zanesljivostjo rezultatov. Uporabili smo razmeroma preprosto empirično enačbo, ki temelji na terenskih podatkih sedmih identificiranih najpogostejših tipov obal (Gundlach, 1987; Reed in sod., 1989). Dobljeni rezultati so v skladu s pričakovanji. Račun smo izvedli za štiri različne vrste nafte in en primer dizelskega goriva. Izkazalo se je, da se z večanjem viskoznosti nafte povečuje maksimalna kapaciteta obale ne glede na tip obale.

V programu Microsoft Excel smo izdelali preglednico, ki omogoča hitro in enostavno računanje maksimalne kapacitete obale za zadrževanje nafte. Eden od ciljev diplomske naloge je bil predstaviti čim bolj enostaven, hkrati pa dovolj zanesljiv način določanja kapacitete obale, ki bi ga lahko vgradili tudi v numerične modele širjenja naftnih madežev. Večina matematičnih modelov za simulacijo razlitja nafte na morju namreč nima vgrajenega ustreznega upoštevanja procesa nalaganja nafte na obalo. Pristop, ki smo ga izbrali, omogoča razmeroma preprosto vgradnjo v model in bi lahko prispeval k večji zanesljivosti tovrstnih modelov. Preizkušena metoda in uporabljena tehnologija sta robustni in dovolj enostavni za vgradnjo v modele, ki se razvijajo na UL FGG.

Za izbrana odseka peščene in prodnate obale smo izvedli tudi račun sproščanja nafte z obale, pri katerem smo predpostavili, da je zapolnjena maksimalna kapaciteta obale. Ugotovili smo, da vrsta nafte ne vpliva na delež sproščene nafte glede na prvotno količino odložene nafte na obalo. Ker pa ima vrsta nafte znaten vpliv na kapaciteto obale, je tudi količina nafte, ki se sprosti v morje v določenem času naraščala z viskoznostjo nafte. Ugotovili smo, da se proces sproščanja nafte s peščene obale zaključi v vsega nekaj dneh, kar je zelo hitro, sploh v primerjavi z rezultati za prodnato obalo. Na slednji sproščanje poteka nekaj let. Peščena obala ima sicer znatno večjo specifično rezidualno kapaciteto na m<sup>3</sup> zemljine, vendar pa je sproščanje nafte s prodnate obale bistveno dolgotrajnejši proces.

Dobljeni rezultati sproščanja nafte z obale skupaj z rezultati določanja maksimalne in rezidualne kapacitete obale bi lahko v primeru morebitne nezgode služili Službi za varstvo obalnega morja in drugim organizacijam zadolženim za ukrepanje v primeru nevarnosti za okolje kot uporabno orodje za predhodne izračune in načrtovanje ukrepov. Tako lahko iz rezultatov sklepamo, da je potrebno peščene obale pred sproščanjem in prehajanjem nafte nazaj na morsko gladino in v vodni stolpec

zaščititi takoj ali pa sploh ne, saj je sproščanje končano že po nekaj dneh, ko je dosežena rezidualna kapaciteta obale. Zelo verjetno je v tem kratkem času pozornost služb, ki preprečujejo posledice razlitja usmerjena drugam in na takem tipu obale ne bodo ukrepale. Pri prodnatih obalah je proces dolgotrajen in zahteva drugačne ukrepe, saj se nafta sprošča zelo dolgo. Poznavanje količine sproščene nafte v morje in časa sproščanja za različne tipe nafte in obale torej omogoča smiselno ukrepanje oziroma zaščito predelov obale, ki bi jih sproščena nafta lahko dosegla.

## VIRI

Bosnič, M. 2014. Ranljivost slovenske obale za onesnaženje z nafto. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bosnič): 38 str.

Boufadel, M. C. 2000. A mechanistic study of nonlinear solute transport in a groundwater-surface water system under steady state and transient hydraulic conditions. *Water Resources Research* 36, 9: 2549–2565.

Boufadel, M. C., Li, H., Suidan, M. T., Venosa, A. D. 2007. Tracer studies in a laboratory beach subjected to waves. *Journal of Environmental Engineering* 133, 7: 722–732.

Cheng, N. S., Law, A. W. K., Findikakis, A. N. 2000. Oil transport in the surf zone. *Journal of Hydraulic Engineering* 126, 11: 803–809.

Etkin, D. S., French-McCay, D., Michel, J. 2007. Review of the State-Of-The-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling. MMS OCS Study 2007-063. New York, Cortlandt Manor, Environmental Research Consulting, MMS Contract 0106PO39962: 157 str.

Fate of marine oil spills. 2011. Technical information papers 1. Canterbury, ITOPF. <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-2-fate-of-marine-oil-spills/> (Pridobljeno 10. 2. 2015.)

Fingas, M. 2000. Basics of oil spill cleanup. Boca Raton, CRC Press: 256 str.

Fingas, M. 2011. Oil spill science and technology: prevention, response, and clean up. Burlington, Elsevier: 1156 str.

French, D., Reed, M., Jayko, K., Feng, S., Rines, H., Pavignano, S., Isaji, T., Puckett, S., Keller, A., French III, F. W., Gifford, D., McCue, J., Brown, G., MacDonald, E., Quirk, J., Natzke, S., Bishop, R., Welsh, M., Phillips, M., Ingram, B. S. 1996. The CERCLA Type A Natural Resource Damage Assessment Model for Coastal and Marine Environments (NRDAM/CME), Technical Documentation, Vol. I–V. Washington, Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior.

Gillie, R., Harper, J., McCullough, D. 1999. Development of a Probe to Detect Oil in Shorelines. Concepts for a Probe and Initial Testing. Ottawa, Environmental Protection Service, Environment Canada: 13 str.

Gundlach, E. R. 1987. Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters. V: Ludwigson J. O. (ur.). Proceedings 1987 Oil Spill Conference (Prevention, Behavior, Control, Cleanup), Tenth Biennial, April 6–9, 1987, Baltimore, Maryland. Washington, American Petroleum Institute: p. 451–457.

Hardisty, J. 1990. Beaches. Form and Process. London, Unwin Hyman: 324 str.

Harper, J. R., Sergy, G. 2007. Experimental observations of oil interaction within coarse sediment beaches. Marine Pollution Bulletin 56, 1: 14–26.

Hayes, M. O., Michel, J., Noe, D. C. 1991. Factors controlling initial deposition and long-term fate of spilled oil on gravel beaches. V: Ludwigson, J. (ur.). Proceedings 1991 Oil Spill Conference (Prevention, Behavior, Control, Cleanup), March 4–7, 1991, San Diego, California. Washington, American Petroleum Institute: p. 453–460.

Huguenin, M. T., Haury, D. H., Weiss, J. C., Helton, D., Manen, C. A., Reinharz, E., Michel, J. 1996. Injury Assessment. Guidance Document for Natural Resource Damage Assessment Under the Oil Pollution Act of 1990. Washington, National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.darrp.noaa.gov/library/pdf/iad.pdf> (Pridobljeno 1. 2. 2015.)

Humphrey, B., Owens, E. H., Sergy, G. 1993. Development of a stranded oil in coarse sediment (SOCS) model. V: Ludwigson, J. (ur.). Proceedings 1993 International Oil Spill Conference (Prevention, Preparedness, Response), March 29–April 1, 1993, Tampa, Florida. Washington, American Petroleum Institute: p. 575–582.

Jeglič, T. 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Jeglič): 51 str.

Li, H., Zhao, Q., Venosa, A. D., Boufadel, M. C. 2007. A universal nutrient application strategy for the bioremediation of oil polluted beaches. Marine Pollution Bulletin 54, 8: 1146–1161.

Ličer, M., Jeromel, M., Fettich, A. 2015. Prognozirano plimovanje morja. Tide tables 2015. Jadransko morje – Koprski zaliv. <http://www.arso.gov.si/vode/morje/> (Pridobljeno 19. 5. 2015.)

Lindstedt-Siva, J., Chamberlain, D. W., Mancini, E. R. 1987. Environmental aspects of the Arco Anchorage oil spill, Port Angeles, Washington. V: Ludwigson J. O. (ur.). Proceedings 1987 Oil Spill Conference (Prevention, Behavior, Control, Cleanup), Tenth Biennial, April 6–9, 1987, Baltimore, Maryland. Washington, American Petroleum Institute: p. 407–410.

Little, D. I. 1987. Oiled sediments in the Humber estuary following the Sivand incident. V: Ludwigson J. O. (ur.). Proceedings 1987 Oil Spill Conference (Prevention, Behaviour, Control, Cleanup), Tenth Biennial, April 6–9, 1987, Baltimore, Maryland. Washington, American Petroleum Institute: p. 419–426.

Maslo, A., Panjan, J., Žagar, D. 2014. Large-scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. *Marine Pollution Bulletin* 84, 1–2: 225–235.

Naba, B., Boufadel, M. C., Weaver, J. 2002. The role of capillary forces in steady-state and transient seepage flows. *Ground Water* 40, 4: 407–415.

Owens, E. H., Humphrey, H. B., Hope, D., Robson, W., Harper, J. R. 1987. The fate of stranded oil four years after an experimental spill on a sheltered gravel beach. V: Ludwigson J. O. (ur.). Proceedings 1987 Oil Spill Conference (Prevention, Behavior, Control, Cleanup), Tenth Biennial, April 6–9, 1987, Baltimore, Maryland. Washington, American Petroleum Institute: p. 473–478.

Reed, M., Gundlach E., Kana, T. 1989. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies. *Oil & Chemical Pollution* 5: 411–449.

Reed, M., Gundlach, E. R. 1989. Coastal interaction processes in the Mineral Management Service Coastal Zone Oil Spill Model. V: Ludwigson, J. O. (ur.). Proceedings 1989 Oil Spill Conference (Prevention, Behavior, Control, Cleanup), 20th Anniversary Conference, February 13–16, 1989, San Antonio, Texas. Washington, American Petroleum Institute: p. 539–545.

Robinson, J. H. 1979. The Peck Slip Oil Spill. A Preliminary Scientific Report. Boulder, NOAA, Office of Marine Pollution Assessment: 190 str.

Sotlar, Z. 2013. Skrb za kakovost slovenskega morja.

[http://slovensko-morje.net/?page=info&info\\_id=32](http://slovensko-morje.net/?page=info&info_id=32) (Pridobljeno 2. 2. 2015.)

Šaponja, M. 2014. Modeliranje izhlapevanja nafte po metodi Fingas. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šaponja): 48 str.

Torgrimson, G. M., 1984. The On-scene Spill Model. Rockville, U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OMA: 100 str.

Trobec, A. 2007. Onesnaževanje slovenskega morja z nafto. Diplomaska naloga. Koper, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije (samozaložba A. Trobec): 104 str.

Types of Crude Oil. 2015. Washington: United States Environmental Protection Agency (USEPA).  
<http://www2.epa.gov/emergency-response/types-crude-oil> (Pridobljeno 10. 2. 2015.)

Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 5: 892–898.

Wang, S. D., Shen, Y. M., Zheng, Y. H. 2005. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering* 32, 13: 1556–1571.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju. *Ujma* 24, 1: 168–174.