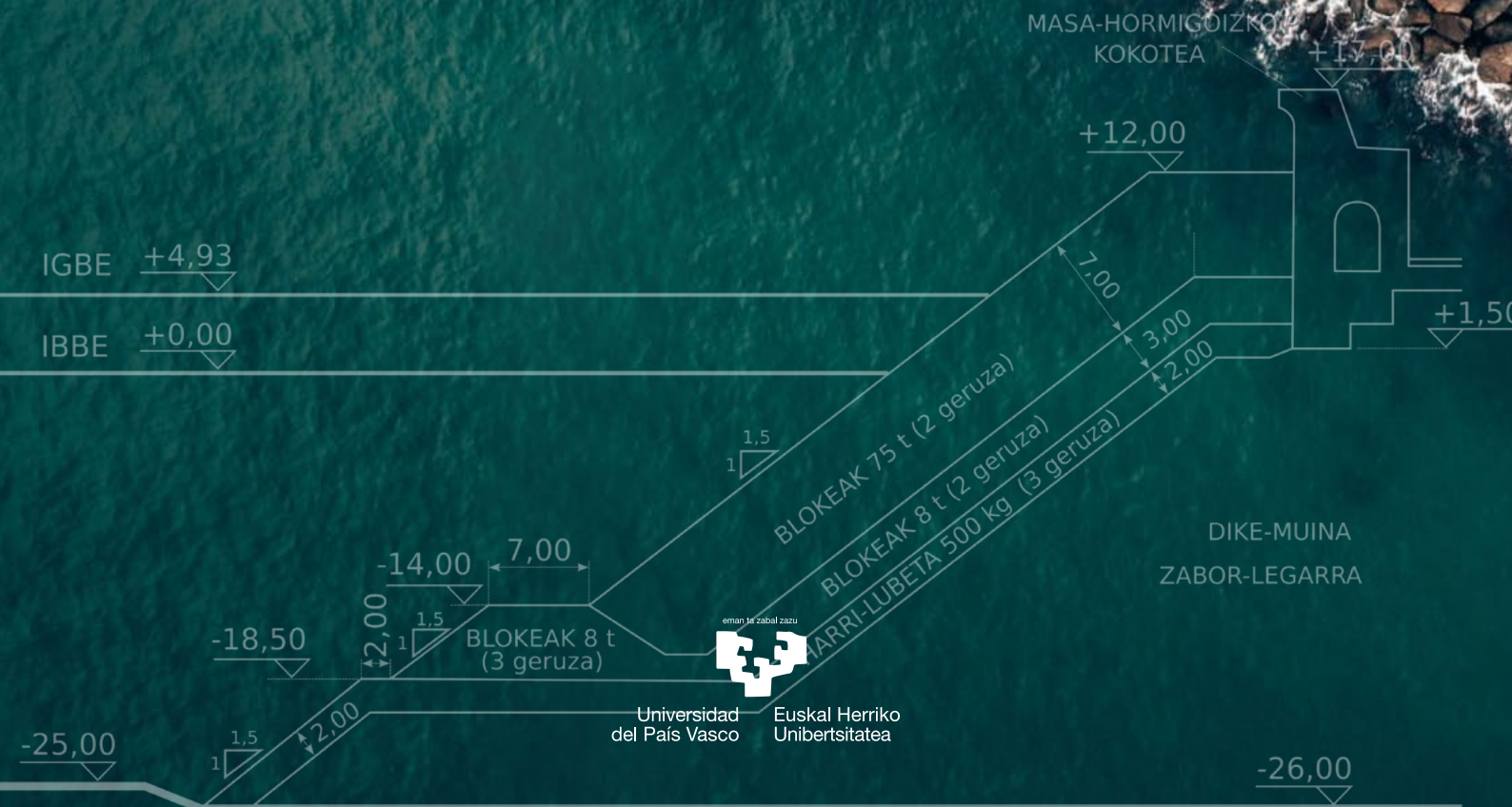


Portuak eta itsas lanak Ingeniaritza Zibilean

Ariketa ebatziak

Eneko Madrazo Uribeetxebarria
Román Santos Ciriquiain
Alberto Agirre Vicente



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

Portuak eta itsas lanak Ingeniaritza Zibilean

Ariketa ebatziak

Portuak eta itsas lanak Ingeniaritza Zibilean

Ariketa ebatziak

Eneko Madrazo Uribeetxebarria
Román Santos Ciriquiain
Alberto Agirre Vicente

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Laburpena

Liburu hau *Portuak eta itsas lanak* ikasgaiko ariketa ebatzien bilduma da. Ikasgaia *Ingeniaritza Zibileko Graduaren* hirugarren mailan irakasten da, *Gipuzkoako Ingeniaritza Eskolan* zein *Bilboko Ingeniaritza Eskolan*. Ikasgaiaren eduki teorikoetan oinarriturik, liburuak ikasgaiaren azken urteetako azterketetan proposatu diren ariketak ebatzen ditu. Soluzioak ez ezik, aukeraturiko formula eta ebazpenen azalpen laburrak ere ematen dira, ikaslearen zalantzak argitzeko asmoz. Kapitulu zein ariketak, gainera, kontzeptu sinpleetatik abiatu eta landuagoetara bidaia egiteko proposatzen dira. Horrela, liburuak zortzi kapitulu ditu: lehen lauak uhinen dinamikari buruzkoak dira, uhinaren izaera eta barreiatzea lantzen dituzte; hurrengoak olatuen aurreikuspena garatzen du, eta, azken hirurek itsas lan mota ohikoenen diseinuan sakontzen dute.

Resumen

Este libro es una recopilación de ejercicios resueltos de la asignatura de *Puertos y Obras Marítimas*, la cual se imparte en el tercer curso del *Grado en Ingeniería Civil*, tanto de la *Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa* como de la *Escuela de Ingeniería de Bilbao*. Basándose en los contenidos teóricos de la materia, el libro resuelve los ejercicios propuestos en los exámenes de los últimos años de la materia. Además de las soluciones, se ofrecen breves explicaciones de las fórmulas y resoluciones seleccionadas con el fin de resolver las dudas del alumno. Los capítulos y ejercicios se proponen, además, partiendo de conceptos sencillos y pasando a otros más elaborados. Así, el libro consta de ocho capítulos: los cuatro primeros se refieren a la dinámica de las ondas, tratan su naturaleza y su dispersión; el siguiente desarrolla la previsión de las olas; y los tres últimos profundizan en el diseño de los tipos de obras marítimas más habituales.

Abstract

This book is a compilation of solved exercises of the subject called *Ports and Maritime Structures*, which is taught in the third year of the Degree in Civil Engineering, both at the Gipuzkoa Engineering School and the Bilbao Engineering School. Based on the theoretical contents of the subject, the book solves the exercises proposed in the exams of the last years of the subject. In addition to the solutions, brief explanations of the selected formulas and resolutions are offered in order to resolve the student's doubts. The chapters and exercises are proposed, moreover, starting from simple concepts and moving on to more elaborate ones. Thus, the book consists of eight chapters: the first four deal with the dynamics of waves, their nature and dispersion; the next one develops wave forecasting; and the last three deal in depth with the design of the most common types of maritime structures.

Gaien aurkibidea

Gaien aurkibidea	i
Hitzaurrea	iii
1. Uhin erregularren dinamika	1
1.1. Presioaren kalkulua	1
1.2. Presioaren zehaztasuna	4
1.3. Sonarraren mugimendua	8
1.4. Dike flotatzailea	11
1.5. Laborategiko ubidea	14
2. Errefrakzioa eta <i>shoalinga</i>	19
2.1. <i>Shoaling</i> -koefizientea	19
2.2. Bi punturen arteko errefrakzioa	23
2.3. Eremuak	25
2.4. Altuera mugagabea energetik abiatuta	30
2.5. Errefrakzioa eta <i>shoalinga</i>	34
2.6. Donostiako Aquariuma	38
3. Haustura	43
3.1. Haustura-kasuak	43
3.2. Hauste-tarteak	49
3.3. Haustura La Palma uhartean	51
4. Difrakzioa	55
4.1. Difrakzioa bi puntutan	55
4.2. Difrakzioa portuan	58
4.3. Portuaren aukerak	63

5. Itsas klima	67
5.1. La Palma parametro-eredua hausturarekin	67
5.2. Villán-Sisargas buiako ekaitza	69
5.3. Zarautzen parametro-eredua eta haustura	71
5.4. Bakio-Landak parametro-eredua	77
5.5. Bermeon portua eta plataforma	81
5.6. Zurriolako hondartzan ekaitzaren eragina	86
5.7. Portuko ezponda-dikea	90
5.8. Zokoan barreiatzea eta difrakzioa	95
5.9. Gijóngo portuan olatuen azterketa	103
5.10. Sollanako eta Luzeroko obraren analisisa	113
6. Olatu-indarrak	121
6.1. Herrestatze-indarra zeharkako egituran	121
6.2. <i>Compliant Tower</i> elementu horizontala	125
6.3. Parke eolikoa: monopiloteko indarrak	129
6.4. Emisarioan eragindako indarrak	134
6.5. Bi kosta-lerro	140
7. Dike etzanak	151
7.1. Pisuen erlazioa	151
7.2. Sollana puntako ezponda-dikea	154
7.3. Santanderreko kontradikea	158
7.4. Energia sortzeko zentrala	161
7.5. Ezponda-dikea Baionako portuan	172
7.6. Orioko dikean kokotea	179
8. Dike bertikalak	187
8.1. Indarrak eta irristadura	187
8.2. Dikearen egiaztapena	190
8.3. Zabaleraren kalkulua	195
8.4. Aldagaien analisisa	200
8.5. Zumaiako portua	207
8.6. Bartzelonako portua	216
Eranskina: taulak eta nomogramak	225
Bibliografia	251

Hitzaurrea

Portuak ingeniari-tza zibileko eremu garrantzitsuak dira, horiek baitira itsas garrarioaren eta lur-reko garrarioaren arteko lotura. Ez da kasualitatea mundu mailako salgai-en %80 mugitzea, itsas garrarioa baita egungo sistemarik eraginkorrena tona eta kilometro bakoitzeko. Portuak, ezinbestean, oso ingurune aldakor-rean eraikitzen dira, eta, ondorioz, itsasaldiek eta olatuek modu bizian eragiten die euren funtzionamenduari. Hori dela eta, itsas lan ezberdinak diseinatu ohi dira portuak babesteko, eta olatuak izan ohi dira diseinuan parametro nagusietako bat.

Liburu hau *Portuak eta itsas lanak* ikasgaiko ariketa ebatzieren bilduma da, *Ingeniaritza Zibileko Graduaren* hirugarren mailako ikasgaia *Gipuzkoako* zein *Bilboko Ingeniaritza Eskoletan*. Ikasgaiaren eduki teorikoetan oinarriturik, liburuak ikasgaiaren azken urteetako azterketetan proposatu diren ariketak ebatzen ditu. Ebazpenak ez ezik, aukeraturiko formula eta soluzioen azalpen laburrak ere ematen dira, ikaslearen zalantzak argitzeko asmoz. Kapitulu zein ariketak, gainera, kontzeptu sinpleetatik abiatu eta landuagoetara bidaia egiteko proposatzen dira.

Horrela, lehen kapituluan, uhinen izaera eta horiek euren inguruan duten eragina lantzeko ariketak proposatzen dira, teoria lineala edo anplitude txikiko uhinen teoria oinarri hartuta. Hurrengo hiru kapituluetan, uhinak kostaldera gerturatu ahala nola eraldatzen diren aztertzen da, eta eragin horiek azaltzeko fenomenoak lantzen dira: errefrakzioa zein *shoalinga*, haustura eta difrakzioa.

Bosgarren kapituluan olatu irregularrekin lan egingo da, eta horien aurreikuspenarekin. Hala, haizeak sorturiko olatuen aurreikuspena landuko da, baita olatuen espektro-analisisa ere. Buietan jasoriko datuen analisiarekin ere lan egingo da, dikearen diseinuan baliatu diren ezaugarriak zehazteko.

Azken hiru kapituluetan itsas egiturak landuko dira. Seigarren kapituluan olatuek egitura zilindrikoetan duten eragina aztertuko da, hots, piloteetan. Hurrengo bietan, kostaren babeserako erabiltzen diren itsas lan mota nagusien diseinuaren funtsezko kontzeptuak aztertuko dira. Hala, dike etzanak eta bertikalak aztertu eta horien diseinuan erabiltzen diren parametro nagusiak landuko dira.

1. Uhin erregularren dinamika

Kapitulu honetan bi dimentsioko uhinak aztertuko ditugu, baita horien barreiatzeak sakonera anitzeko ur-partikulei nola eragiten dien ere. Landutako uhinak erregularrak dira, idealak nolabait, naturan nekez topa daitezke horrelakoak. Uhinaren dinamika azaltzeko teoria lineala baliatuko dugu, Airy edo anplitude txikiko uhinaren teoria ere esaten zaiona. Sinplea bada ere, baliagarria da oso uhinaren eragina ulertzeko eta arazoaren lehen hurbilketa bat egiteko. Teoria linealak ematen dizkigu uhin baten eraginaren ondorioak ere, hala nola ur-partikulen desplazamendua, abiadura, azelerazio edo baita sakonera ezberdinetako presioa ere. Gainera, atal honetan landuko da uhinaren energia orokorra ere.

1.1. Presioaren kalkulua¹

Itsas egitura bat eraiki nahi da sakonera 20 metrokoa den eremu batean. Egituraren zimendua itsas hondoa egongo da finkatua, eta gainazaleraino iritsiko da. Demagun 4 metrokoa dela diseinuzko olatu-altuera eta 12 segundokoa haren ondulazio-periodoa.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Egiturak jasango duen presio maximoa uraren gainazalean zein zimenduaren oinarrian. Itsas uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 dela joko da.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Presioaren kalkulua egiteko, teoria linealak ematen digun adierazpena erabil dezakegu. Horretarako, baina, aztertzen ari garen puntuaren sakonera erlatiboa finkatzea komeni da lehenik, presioaren adierazpen orokorra edo sinplifikazioaren bat erabil daitekeen erabakitzen lagunduko baitigu.

¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2017/18 ikasturtea (2017-11-09), partzialaren 3. ariketa.

Sakonera erlatiboa finkatzeko, baina, aztertzen ari garen puntuan sakonera mugagabetik barreiatzen ari diren olatuen uhin-luzera finkatu behar da. Horretarako, dispertsio-erlazioa erabiliko dugu (7.131), eta bertatik ebatzi uhin-luzera. Gogoratu uhin-luzera ebazteko metodo ezberdinak erabil ditzakegula: (i) aipaturiko adierazpenean oinarrituta, L aldagaiari balioak emanaz adierazpenaren bi aldeak berdindu arte hurbilketak egin, edo (ii) aurrez prestatuturiko taulak erabili, normalean d/L_0 kalkulatu eta d/L zehazteko aukera ematen dutenak. Edonola ere, egungo kalkulagailuek ere ebatz dezakete L , zenbakizko metodoak baitarabiltzate.

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (1.1)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 12^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 20}{L}\right)$$

$$L = 224,83 \cdot \tanh\left(\frac{125,66}{L}\right) \Rightarrow L = 152,4 \text{ m} \quad (1.2)$$

Sakonera horretako uhin-luzera jakinik (1.2), olatu horri dagokion sakonera erlatiboa finka dezakegu (1.3). Horrenbestez, badakigu presioaren kalkulua egiteko teoria linealak ematen digun adierazpen orokorra erabili behar dugula (1.4).

$$\frac{d}{L} = \frac{20}{L} = 0,13 \Rightarrow \text{sakonera ertaina} \quad (1.3)$$

Beraz, presioa kalkulatzeko, (1.4) adierazpena baliatuko dugu. Aztertzen ari garen puntuak eta olatu-ezaugarriak (L eta T) finkaturik daudenez, sakonera (d), urdentsitatea (ρ) eta uhin-zenbakia (k) ez dira aldatuko. Ondorioz, adierazpen hori uhin-gainarentzako izango da maximoa; hau da, $\eta_{max} = H/2$ denean izango da adierazpen hori maximoa (1.5).

$$p = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (1.4)$$

$$p_{max} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (1.5)$$

Horrenbestez, uraren gainazalean gertatzen dena aztertuz gero, $z = 0$ izango da, eta aurreko adierazpena sinpleagoa (1.6).

$$\begin{aligned} p_{max} &= \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \\ &= \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} = 1025 \cdot 9,81 \cdot \frac{4}{2} = 20\,110,5 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 20,1 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Bestalde, itsas hondoan presioa aztertuz gero, $z = -d$ izango da, eta (1.7) adierazpenak emango digu presio maximoa. Aurreikus zitekeen moduan, handiagoa da presioa itsas hondoan (1.9) gainazalean baino (1.6).

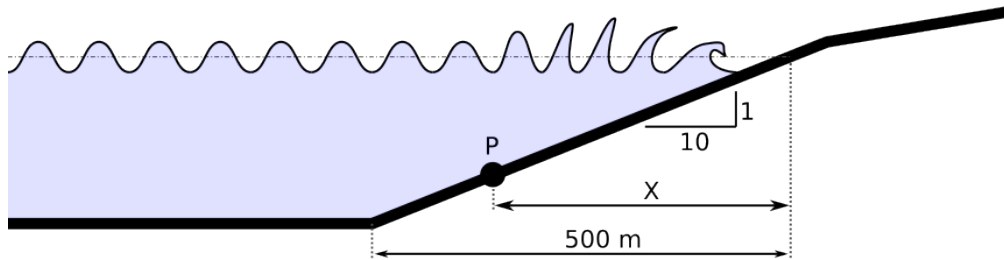
$$\begin{aligned} p_{max} &= \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z = \\ &= \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z = \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$= 1025 \cdot 9,81 \cdot \frac{4}{2} \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{152,4} \cdot 20\right)} - 1025 \cdot 9,81 \cdot (-20) = \quad (1.8)$$

$$= 215\,895,9 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 215,9 \text{ kPa} \quad (1.9)$$

1.2. Presioaren zehaztasuna²

Demagun presio-sentsore bat ipini nahi dela itsas hondoan, kostatik distantzia jakin batera, P deituriko puntu batean. Ereku horretan, batimetria-lerroak kostarekiko paraleloak dira, eta itsas hondoreen malda uniformea da sakonera jakin bateraino (1:10); handik aurrera horizontala da (ikus 1.1. irudia).



1.1. irudia. Kostaldearen profila.

Sentsoreak 5 segundoko periodoa duten uhinek eragindako presioa neurtzea nahi da. Uraren dentsitatea 1030 kg/m^3 dela joko da eremu horretan.

Honako hau eskatzen da:

- Presio-sentsorea kostatik zer distantziatarra ipini beharko genuke, gehienez ere, neurketak egiteko gai izan dadin?
- P puntua 10 metroko sakoneran ipintzen baldin bada, eta sentsoreak 0,1 m dituzten olatuek eragindako aldaketak neurtzea nahi badugu, nolako sentikortasuna duen sentsorea erosi behar dugu (zein da neurtu behar dugun gutxieneko presio-aldaketa)?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Sentsorearen kokapena zehazteko, gogoan izan behar dugu zein den mugako baldintza uhinen eta hondoreen arteko elkarrekintza egon dadin, edo, beste modura batera esanda, zein sakonerara arte sumatzen den uhinen eragina (1.10). Mugako egoera hori ur sakonen eta bitartekoen arteko trantsizioan gauzatzen denez, uhin-luzera sakonera mugagabekoari dagokiona dela jo dezakegu (1.11), eta, beraz, sakonera 19,5 m baino txikiagoa izan beharko da presioak ezaugarri horiek dituen uhinak neurtzeko gai izan dadin (1.12).

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2021/22 ikasturtea (2021-11-08), partzialaren 2. ariketa.

$$\frac{d}{L} \leq 0,5 \quad (1.10)$$

$$d \leq L \cdot 0,5$$

$$d \leq L_o \cdot 0,5 \quad (1.11)$$

$$d \leq \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot 0,5 = \frac{9,81 \cdot 5^2}{2 \cdot \pi} \cdot 0,5 = 19,5 \text{ m} \quad (1.12)$$

Kasu honetan, batimetria erregularra denez, erraza da sakoneraren eta distantziaren arteko erlazioa lortzea, hots, $X = 10 \cdot d$. Beraz, (1.12) eta azken erlazio horren adierazpena baliatuz, kostaraino egon daitekeen gehieneko distantzia zehaztu daiteke (1.13).

$$\frac{X}{10} \leq 19,5 \text{ m} \quad (1.13)$$

$$X \leq 19,5 \text{ m} \cdot 10 = 195 \text{ m}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Lehenik, batez ere presioaren adierazpean sinplifikaziorik egin daitekeen zehazteko, azter dezagun zein den sakonera horri dagokion uhin-luzera. Horretarako, dispertsioa-erlazioa erabiliko dugu (1.14); gogoratu ekuazioaren ebazpenari buruz aipaturikoa 1.1. ariketan.

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (1.14)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 5^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{L}\right)$$

$$L = 39,0 \cdot \tanh\left(\frac{62,8}{L}\right) \Rightarrow L = 36,6 \text{ m} \quad (1.15)$$

Uhin-luzera zehazturik, olatuaren sakonera erlatiboa finka daiteke (1.16).

$$\frac{d}{L} = \frac{10}{36,6} = 0,27 \Rightarrow \text{sakonera ertaina} \quad (1.16)$$

Horrenbestez, badakigu presioaren kalkuluan erabiliko dugun adierazpena (1.17) ekuazioak emandakoa izan beharko dela. Ekuazio horrek presioaren bi gai ematen dizkigu: bata finkoa, aztertzen ari garen sakonerak baldintzatua, eta bestea aldakorra, uhinaren faseak baldintzatzen duena. Aldakorra da, hain zuzen ere, sentsoreak neurtu beharko duena, aldagai finkoan uhinen joan-etorriak ez baitu eraginik.

$$p = \overbrace{\rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)}}^{\text{aldakorra}} - \overbrace{\rho \cdot g \cdot z}^{\text{finkoa}} \quad (1.17)$$

$$p^{\text{aldakorra}} = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \quad (1.18)$$

Bada, sentsoreak presioaren aldagai aldakorra neurtu behar badu, gutxienez haren balio minimoaren eta maximoaren arteko diferentzia neurtzeko gai izan beharko luke; hau da, uhin-gainaren eta uhin-behearen arteko presio-aldaketa neurtzeko gai. Horrenbestez, presioan aldaketa eragiten duen aldagai bakarra η da. Beraz, puntu horrek neurtuko dituen presio aldakor maximoa eta minimoa (1.19) eta (1.20) adierazpenek emandakoak izango dira.

$$p_{max}^{\text{aldakorra}} = \rho \cdot g \cdot \eta_{max} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \quad (1.19)$$

$$p_{min}^{\text{aldakorra}} = \rho \cdot g \cdot \eta_{min} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \quad (1.20)$$

Ondorioz, sentsoreak gutxienez neurtu beharko duen presio-aldaketa bien arteko diferentzia izango da (1.21). Bada, (1.22) adierazpena izango da gutxieneko presio hori emango diguna. Kontuan hartu sentsorea itsas hondoa ipiniko dela ($z = -d$). Beraz, (1.23) adierazpenak emango digu bilatzen ari garen presioaren balioa.

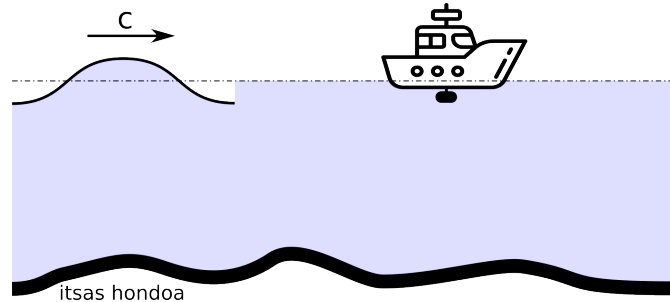
$$\Delta p = p_{max}^{aldakorra} - p_{min}^{aldakorra} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} &= (\eta_{max} - \eta_{min}) \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \\ &= \left(\frac{H}{2} - \left(-\frac{H}{2} \right) \right) \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \\ &= H \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \end{aligned} \quad (1.22)$$

$$= 0,1 \cdot 1030 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{36,6} \cdot 10\right)} = 351,7 \text{ Pa} \quad (1.23)$$

1.3. Sonarraren mugimendua³

Batimetria urpeko sonar bidez zehaztu daiteke, 1.2. irudian emandako ontzien modukoak erabiliz. Demagun seinalearen igorgailua, sonarra, urpean dagoela gainazaletik 0,5 metrora. Sonarrak seinale bat igortzen du, eta, jasotze-denbora kontuan hartuta, hondora dagoen distantzia ondorioztatzen du. Sonar-seinaleen abiadura 1,5 km/s da. Demagun ontzia 300 metroko sakonera dagoen eremuan lanean ari dela eta, neurketa egiten ari den unean, 10 segundoko periodoa eta 2 metroko altuera duten uhinak daudela neurketa-eremuan.



1.2. irudia. Sonarraren eskema, ezkerrean uhinarekin eta eskuinean batez besteko itsas mailarekin.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Seinalea igortzean sonarra uhin-gain batean badago, zehaztu zein izango den sonarraren desplazamendu bertikala seinalea igorri eta jaso bitartean. Sonarra urpean dagoen elementu independente bezala hartu, eta baztertu tarte horretan gauzatu daitezkeen desplazamendu horizontalak. Ontzia ere geldirik dagoela joko da.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Sonarra uhin-gain batean badago seinalea igortzean, uhin fasea $\theta = 0^\circ$ izango da. Aldiz, seinaleak joan-etorrian denbora bat egiten duenez, gutxi bada ere, aldatu egingo da uhinaren fasea, uhinak aurrera egingo baitu denbora horretan. Uhinaren abiadura eta egindako distantzia jakinik (gogoratu ibilbidean hondoraino iritsi eta itzuli egin behar dela seinalea), igortzearen eta jasotzearen artean pasaturiko denbora zehaztu daiteke (1.24) adierazpenarekin.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \implies \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{2 \text{ m} \cdot 300}{1500 \text{ m/s}} = 0,4 \text{ s} \quad (1.24)$$

³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2022/23 ikasturtea (2022-12-21), ohikoaren 2. ariketa.

Lehen pausoan, sakonera erlatiboa kalkulatu beharko genuke dispertsio-ekuazioa baliatuz (1.25). Oraingoan, suma zitekeen bezala, sakonera mugagabeen dagoez ontzia ($d/L > 0,5$), berdina izango dira sakonera mugagabeen uhin-luzera ($gT^2/2\pi$) eta kalkulaturikoa, (1.26) adierazpenean agerikoa den bezala.

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (1.25)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 300}{L}\right)$$

$$L = 156,1 \cdot \tanh\left(\frac{1885,0}{L}\right) \xrightarrow{\text{hurbilketak}} L = 156,1 \text{ m} \equiv L_o \quad (1.26)$$

Sakonera mugagabeen gaudenez, (1.29) adierazpenak emaniko sinplifikazioa erabil daiteke desplazamendu bertikalaren kalkulurako. Edonola ere, seinalea jasotzean uhin fasea zein den zehaztu beharko da lehenik. Horretarako, ontzia posizio finkoan dagoela hartu behar da kontuan ($x_1 = x_2$), hots, ez dela mugitzen seinalea igorri eta jaso bitartean. Beraz, sinplifikatzeko, $x_1 = x_2 = 0$ dela joko dugu. Aldiz, uhin-gainari dagokion unea $t_1 = 0$ bada, seinalea jasotzen den uneari $t_2 = 0,4$ dagokio. Ondorioz, hasierako eta bukaerako faseak (1.27) eta (1.28) adierazpenek jasotakoak dira.

$$\theta_1 = k_1 \cdot x_1 - \omega_1 \cdot t_1 = 0 \quad (1.27)$$

$$\theta_2 = k_2 \cdot x_2 - \omega_2 \cdot t_2 = -\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t_2 = -\frac{2 \cdot \pi}{10} \cdot 0,4 = -0,08 \cdot \pi \quad (1.28)$$

Orain, kalkula daiteke desplazamendu bertikala seinalea igorri eta jaso bitartean, (1.30) eta (1.31) adierazpenekin. Gogoratu posizio horiek pausagunearekiko desplazamendua adierazten dutela.

$$\xi = \frac{H}{2} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{L}} \cdot \cos \theta \quad (1.29)$$

$$\xi_1 = \frac{2}{2} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot (-0,5)}{156,1}} \cdot \cos 0 = 0,980 \text{ m} \quad (1.30)$$

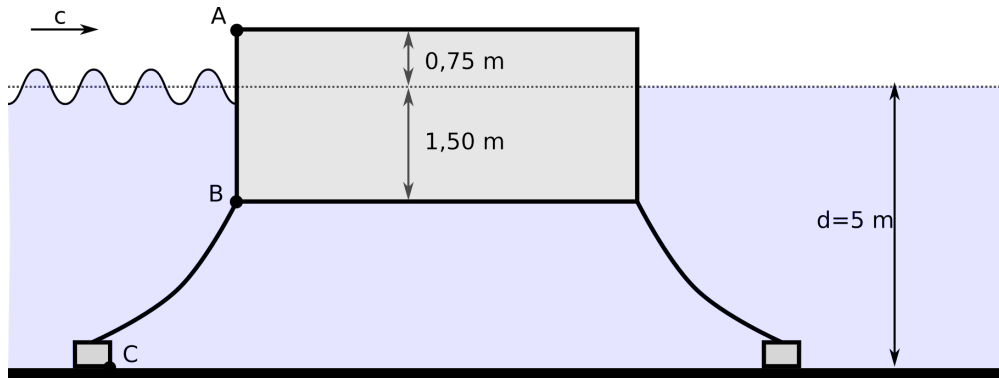
$$\xi_2 = \frac{2}{2} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot (-0,5)}{156,1}} \cdot \cos(-0,08 \cdot \pi) = 0,949 \text{ m} \quad (1.31)$$

Beraz, seinalea igorri eta jaso bitarteko desplazamendua aurreko bi desplazamenduen arteko diferentzia izango da (1.32). Balio negatiboak adierazten du puntu gorenean zegoela hasieran eta 3,1 cm beherago egongo dela bukaeran.

$$\Delta\xi = \xi_2 - \xi_1 = 0,949 \text{ m} - 0,980 \text{ m} = -0,031 \text{ m} \quad (1.32)$$

1.4. Dike flotatzailea⁴

Dike flotatzailea periodo txikiko eta altuera txikiko olatuei aurre egiteko erabil daitekeen egitura da. Horrelako bat diseinatu da, adibidez, Ribeirako portuan (Galizia), Arousako itsasadarrean. Dike-sekzioaren eskema 1.3. irudian emandakoa da.



1.3. irudia. Dike flotatzailearen eskema.

Dikea 5 metroko sakonera duen uretan eraikiko da. Dikearen zabalera 5 metrokoa da, eta haren altuera 2,25 metrokoa (urpean 1,5 metro geratuko dira). Horrela, dike flotatzailea diseinatzeko hautatu den olatuak 4,5 segundoko periodoa du, eta 30 metroko uhin-luzera. Uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 da.

- Kalkulatu diseinu-uhinaren altuera, jakinik B puntuan hark eragindako presio maximoa $p_{max}^B = 20,413 \text{ KN/m}^2$ dela.
- Kalkulatu uhinak AB aurpegiko ur-zutabean (uhin-frontearekiko elkarzuta dena) eragingo duen desplazamendu horizontal maximoa, eta zehaztu puntu hori AB lerroko zein punturi dagokion.
- Kalkulatu uraren abiadura horizontala ainguratzean (C puntua) baldin eta uhin baten behea pasatzen bada, eta uhinak 2 metroko altuera, 5 segundoko periodoa eta 40 metroko uhin-luzera baldin baditu.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Lehenik eta behin, sakonera erlatiboa zein den zehaztu beharko genuke. Horretarako ezagutzen dugu dikeari eragiten dion uhin-luzera, eta baita dikea dagoen eremuan urak duen sakonera ere. Beraz, (1.33) ekuazioaren arabera, dikea bitarteko uretan legoke.

⁴Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2018-10-31), partzialaren 1. ariketa.

$$\frac{d}{L} = \frac{5}{30} = 0,17 \quad \Longrightarrow \quad \text{bitarteko urak} \quad (1.33)$$

Ondorioz, urpean dagoen puntu baten presioa (1.34) adierazpenak emandakoa da. Ekuazio horretan, presio maximoa uhinaren gainarekin batera lortuko da, $\eta_{max} = H/2$, eta, beraz, presioa (1.35) ekuazioak emandakoa izango da.

$$p = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (1.34)$$

$$p^{max} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d+z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (1.35)$$

Horrela, baldintza hori beteko duen olatu-altuera lor daiteke, (1.36), ezagunak diren balioekin. Olatua-altuera hori 1,32 m da.

$$H = (p_B^{max} - \rho \cdot g \cdot z_B) \cdot \frac{\cosh(k \cdot d)}{\cosh(k \cdot (d+z_B))} \cdot \frac{2}{\rho \cdot g} \quad (1.36)$$

$$H = (20\,413 - 1025 \cdot 9,81 \cdot (-1,5)) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{30} \cdot 5\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi}{30}(5-1,5)\right)} \cdot \frac{2}{\rho g}$$

$$H = 5330,12 \cdot \frac{1,6003}{1,2809} \cdot \frac{2}{1025 \cdot 9,81} = 1,32 \text{ m}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Bestalde, AB lerroko puntuak izango duen desplazamendua (1.37) adierazpenak emango digu. Horren arabera, desplazamenduaren balioa uhin faseak baldintzatuko du, baina baita AB lerroan aukeratutako puntuak ere. Horrela, uhinaren fasea kontuan hartuta, desplazamendua maximoa izango da desfaseak $\pi/2$ edo $3\pi/2$ balio duenean, hots, uhinaren inflexio-puntuetan. Bigarren puntua aukeratzen badugu, $\sin \theta = -1$ izango da, eta desplazamendu maximoaren balioa positiboa, eskuinerantz, (1.38) ekuazioak emana.

Bestalde, AB lerroan desplazamendurik handiena izango duen puntua $(d+z)_{max}$ balioa ematen duen hori izango da. Sakonera finkoa denez, eta positiboa, desplazamendurik handiena duen puntua A puntua litzateke; baina, A puntua uretatik kanpo dagoenez, ezin daiteke aukeratu. Ondorioz, pausagunean uretan dagoen z baliorik altuena $z = 0$ litzateke. Hala, (1.39) ekuazioak emandakoa litzateke AB tarteko desplazamendurik handiena.

$$\xi = -\frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin \theta \quad (1.37)$$

$$\xi_{max} = -\frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot (-1) \quad (1.38)$$

$$\xi_{max}^{AB} = \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + 0))}{\sinh(k \cdot d)} \quad (1.39)$$

$$\xi_{max}^{AB} = \frac{1,32}{2} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{30} \cdot 5\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{30} \cdot 5\right)}$$

$$\xi_{max}^{AB} = 0,66 \cdot \frac{1,600}{1,249} = 0,845 \text{ m}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Ur partikula baten abiadura (1.40) adierazpenak emandakoa da. Uhinaren desfasea π izango da behea pasatzean. Dikea 5 metroko sakonera duen uretan dagoenez eta C puntua hondoan dagoenez, $d = 5$ m eta $z = -5$ m izango dira, eta abiadura (1.41) adierazpenekoa izango da. Uhinaren ezaugarriak kontuan hartuz gero, abiadura (1.42) ekuazioak emandakoa izango da.

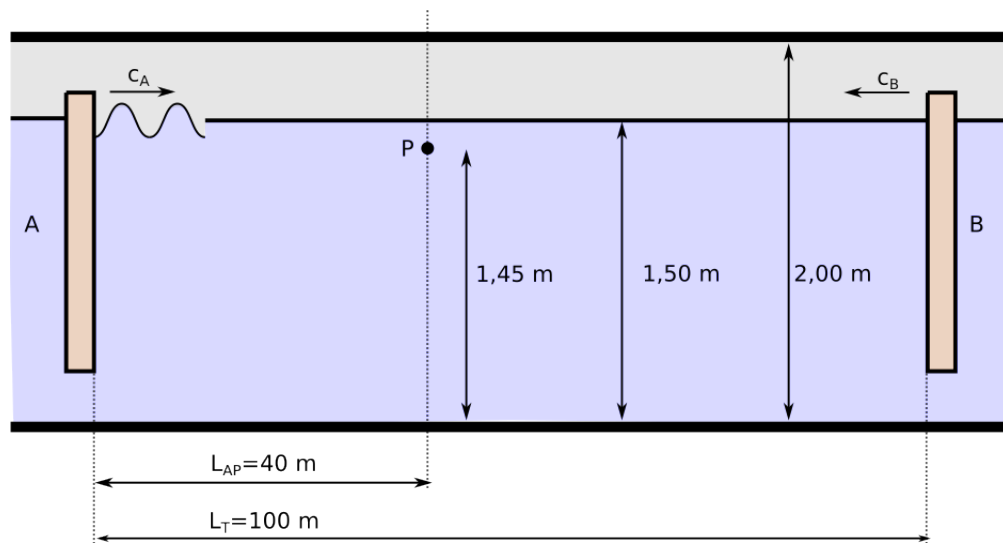
$$v = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos \theta \quad (1.40)$$

$$v_{behea}^C = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (5 + (-5)))}{\cosh(k \cdot 5)} \cdot (-1) \quad (1.41)$$

$$v_{behea}^C = -\frac{2}{2} \cdot \frac{9,81 \cdot 5}{40} \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi}{30} \cdot 5\right)} = -0,928 \text{ m/s} \quad (1.42)$$

1.5. Laborategiko ubidea⁵

Demagun laborategi batean ubide bat dugula, 2,5 metroko zabalera duena, itsas olatuen analisi ezberdinak egiteko erabiltzen dena. Saiakuntzak egitean baztertu egiten da ubidearen paretek duten eragina. Ubidearen luzetarako sekzioa 1.4. irudian emandakoa da. Ubidearen altuera totala 2 metrokoa da, eta 1,5 metro urez beterik daude. Itsas uraren ezaugarri berberak dituen urez bete da ubidea; hau da, uraren dentsitatea 1023 kg/m^3 dela joko da.



1.4. irudia. Ubidearen profila.

Ubideak bi mekanismo ditu alboetara, *A* eta *B*, olatuak sortzeko balio dutenak, eta horien arteko distantzia 100 metrokoa da. Ezkerreko mekanismoak eta eskuinekoak sortzen dituzten uhinak ezaugarri berekoak dira. Gainera, bi mekanismoak batera hasten dira uhinak sortzen.

Baldintza horietan, honako hau eskatzen da:

- Zehaztu zein den mugako uhin-zenbakia, uhinek sakonera mugagabekoen ezaugarriak izan ditzaten (hurrengo ataletan erabiliko da).
- Uhinek gainezka egin ez dezaten, zer baldintza bete beharko dute sorturiko olatuek?
- Uhinaren altuera maximoa balitz 0,5 metro, eta sorturiko uhinaren periodoa baldin bada 1 segundokoa, erabil al daiteke teoria lineala? Hala ez balitz,

⁵Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2021-06-14), ezohikoaren 1. ariketa.

zein da olatuek izan dezaketen altuera maximoa?

- (d) Demagun 20 mm dituzten uhinak sortzen ditugula 2 segundoko periodoarekin. Teoria lineala baliagarria baldin bada, zer-nolako presioa egongo da irudiko P puntuan (hondotik 1,45 metrora dago eta A mekanismotik 40 metrora) mekanismoa abiatu eta 100 segundora? Uhin-zenbakia (a) atalekoa dela joko da.
- (e) Zehaztu uhin horietako baten energia, aurreko atalekoa, ubidearen zabalera osoan, A mekanismoa baldin badabil soilik.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Uhinek sakonera mugagabekoen ezaugarriak izateko, sakonera erlatiboa 0,5 izan beharko da, gutxienez (1.43). Beraz, uhin-zenbakiaren gutxieneko balioa (1.44) adierazpenean emandakoa izango da. Hori da, hain zuzen ere, uhinek sakonera mugagabekoen ezaugarriak izan ditzaten bete beharreko baldintza.

$$\frac{d}{L} \geq 0,5 \quad (1.43)$$

$$d \geq 0,5 \cdot L$$

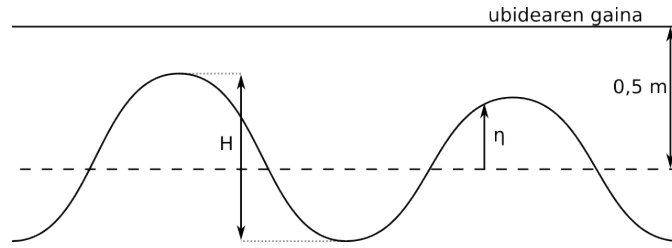
$$d \geq 0,5 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{\pi}{k}$$

$$k \geq \frac{\pi}{d} = \frac{\pi}{1,5 \text{ m}} = 2,094 \text{ rad/m} \quad (1.44)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Olatuek gainezka egin ez dezaten, ezingo dute gainditu ubide naturalaren gaina, uraren batez besteko maila baino 0,5 m gorago dagoena. Beraz, hori izango da η aldagaiak lor dezakeen baliorik handiena. Aldagai horrek ur-gainazalaren posizioa adierazten du batez besteko ur-mailarekiko, 1.5. irudian adierazten den moduan.

Baina, olatuak gainjarri egin daitezkeenez, η aldagaiak kontuan hartu beharko du ezkerretik eta eskuinetik datozen olatuen gainjartzea; eta, beraz, bi olatuek ezaugarri berdinak dituztenez, olatu bakoitzaren η ezingo da izan 0,25 m baino handiagoa (1.45).

$$\eta_{total}^{max} = \eta_A^{max} + \eta_B^{max} \equiv 2 \cdot \eta_{banakakoa}^{max} \leq 0,5 \text{ m} \quad \implies \quad \eta_{banakakoa}^{max} \leq 0,25 \text{ m} \quad (1.45)$$



1.5. irudia. Ubidearen goialdeko profila, olatu-altueraren (H), gainazaleko posizioaren (η) eta ubide gainaren erlazioa adierazten dituena.

Kontuan hartzen badugu olatu bakoitzaren η_{max} eta H aldagaien arteko erlazioa (1.46), olatuek izan dezaketen altuera maximoa zehaztu dezakegu, hau da, 0,5 m.

$$\eta_{banakakoa}^{max} = \frac{H_{banakakoa}}{2} \implies H_{banakakoa} \equiv H_A = H_B \leq 0,5 \text{ m} \quad (1.46)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Teoria linealaren hipotesiak betetzen ote diren frogatzeko Le Méhauté-ren grafikoa (1976) erabil dezakegu. Grafiko horretan gure olatuak kokatzeko, (1.47) eta (1.48) adierazpenak erabiliko ditugu. Aipaturiko grafikoa, bi puntu horiekin egiazta dezakegu olatuen ezaugarriak ez dutela teoria linealaren baldintzarik betetzen, besteak beste, olatu-altuera handiegia delako.

$$\frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{1,5}{9,81 \cdot 1^2} = 0,153 \quad (1.47)$$

$$\frac{H}{g \cdot T^2} = \frac{0,5}{9,81 \cdot 1^2} = 0,051 \quad (1.48)$$

Olatuek bete beharreko baldintza zehaztu nahi izanez gero, altuera azter dezakegu (1.49). Horrek adieraziko digu uhinek bete behar duten baldintza teoria linealaren hipotesiak gauzatzeko (1.50). Emaitzak agerian uzten duen moduan, olatu-anplitudeak txikia behar du teoria linealaren hipotesiak bete daitezen.

$$\frac{H}{g \cdot T^2} \leq 0,001 \quad (1.49)$$

$$H \leq 0,001 \cdot g \cdot T^2$$

$$H \leq 0,001 \cdot 9,81 \cdot 1^2$$

$$H \leq 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm} \quad (1.50)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Lehenik, sakonera erlatiboa finkatuko dugu. Uhin-zenbakia (a) atalekoa baldin bada, eta baldintza bezala sakonera mugagabeen egongo dela zehaztu dugunez ($d/L = 0,5$), uhin-luzera (1.51) adierazpenak emandakoa izango da.

$$L = d \cdot 2 = \frac{\pi}{k} \cdot 2 = \frac{\pi}{2,094} \cdot 2 = 3,0 \text{ m} \quad (1.51)$$

Aipaturiko P puntuan presioa kalkulatzeko, ur-gainazalak puntu horretan duen posizioa zehaztu behar da, (1.52) adierazpenaren arabera. Gainjartzea dagoenenez, olatu bakoitzaren balioa kalkulatu dugu, (1.53) eta (1.54) adierazpenekin.

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \cdot \cos(k_i \cdot x_i - \omega_i \cdot t_i) \quad (1.52)$$

$$\eta_A = \frac{20 \text{ mm}}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 40 - \frac{2 \cdot \pi}{2} \cdot 100\right) = -5 \text{ mm} = -0,005 \text{ m} \quad (1.53)$$

$$\eta_B = \frac{20 \text{ mm}}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 60 - \frac{2 \cdot \pi}{2} \cdot 100\right) = 10 \text{ mm} = 0,010 \text{ m} \quad (1.54)$$

Beraz, P puntuaren gainean ur-gainazalaren posizioa, ur lasaiekiko, (1.55) adierazpenak emandakoa da.

$$\eta = \eta_A + \eta_B = -0,005 \text{ m} + 0,010 \text{ m} = 0,005 \text{ m} \quad (1.55)$$

Datu horiekin, kalkula dezakegu presioa P puntuan. Horretarako presioaren adierazpen sinplifikatua erabiliko dugu, sakonera mugagabeari dagokiona (1.56), olatuek baldintza hori betetzen dutela esan baitugu aurrerago ($d/L = 0,5$).

$$\begin{aligned}
 p &= \rho \cdot g \cdot \eta \cdot e \frac{2 \cdot \pi \cdot z}{L} - \rho \cdot g \cdot z & (1.56) \\
 &= 1023 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot e \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (-0,05)}{3} \right) - 1023 \cdot 9,81 \cdot (-0,05) \\
 &= 45,2 + 501,8 = 547,0 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Uhinen energia totala, uhin-frontearen unitate bakoitzeko, (1.57) adierazpenak emandakoa da. Aztertzen ari garen ubideak 2,0 metroko zabalera duenez, hori da uhin-frontearen luzera, eta, ondorioz, (1.58) adierazpenak ematen digu fronte osoaren energia.

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \quad (1.57)$$

$$= \frac{1}{8} \cdot 1023 \cdot 9,81 \cdot 0,02^2 \cdot 3 = 1,51 \text{ J/m}$$

$$E_T = 1,51 \text{ J/m} \cdot 2,5 \text{ m} = 3,78 \text{ J} \quad (1.58)$$

2. Errefrakzioa eta *shoalinga*

Kapitulu honetan, sakonera mugagabetik txikietara uhinak barreiatzen direnean olatuei eragiten dieten bi fenomeno nagusiak aztertuko dira: shoalinga eta errefrakzioa. Lehenak olatu-altuerari eragingo dio; uhinak, orokorrean, handitu egiten dira kostaldera gerturatu ahala. Hala ere, handitze-fenomeno hori hasi baino lehen, hondoaren eragina sumatzen hasten direnean, uhinek apur bat murriztu egiten dute altuera. Bigarrenak, errefrakzioak, altuerari zein noranzkoari eragingo die.

2.1. *Shoaling*-koefizientea¹

Demagun sakonera mugagabeko uhin bat, haren altuera 2 metrokoa da, kostalderantz ari dela barreiatzen errefrakziorik gabe ($K_r = 1$). Uhinaren periodoa 3 segundokoa da.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu zein bi sakoneratan izango den uhinaren altuera sakonera mugagabekoa baino %5 txikiagoa.
- (b) Zehaztu, teoria linealaren arabera, uhinaren altuera minimoa haren ibilbidean, eta zer sakoneratan gauzatuko den.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Kostaldera barreiatzen den olatu baten altuera *shoaling* eta errefrakzio-koefizienteek baldintzatzen dute; hau da, sakonera mugagabeko olatu-altuera *shoaling*- eta errefrakzio-koefizienteen bidez erlazionatzen da sakonera jakineko olatuaren altuerarekin, (2.1) adierazpenaren arabera. Horrenbestez, *shoaling*-koefizientearen balioa ondoriozta dezakegu, (2.2) adierazpenarekin. Altuera %5 murrizten denez, aztertzen ari garen puntuan olatu-altuera $H = 0,95 \cdot H_o$ izango da, eta *shoaling*-koefizientea (2.3) adierazpenak emango digu.

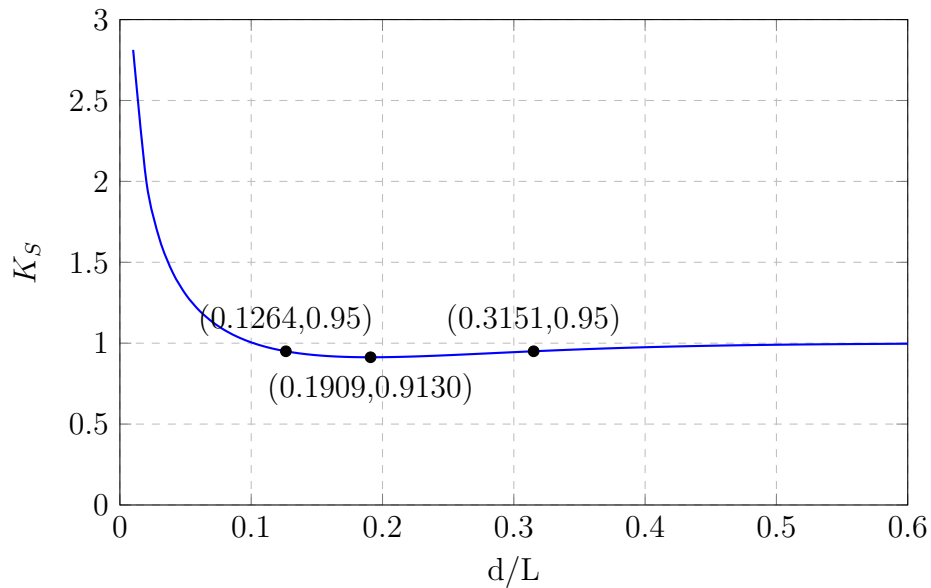
¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2022/23 ikasturtea (2022-11-10), partzialaren 1. ariketa.

$$H = H_o \cdot K_s \cdot K_r \quad (2.1)$$

$$K_s = \frac{H}{H_o} \cdot K_r \quad (2.2)$$

$$K_s = \frac{0,95 \cdot H_o}{H_o} \cdot 1 = 0,95 \quad (2.3)$$

Ariketa ebazteko garbi eduki behar da *shoalingak* nola eragiten dien olatu-altuerei. Shoaling-koefizientea handitzen doa sakonera erlatibo txikietan, baina bada eremu bat koefiziente hori murriztu egiten dena. Horrela, 2.1. irudian ikus daiteke nola, sakonera erlatiboa murrizten doan heinean (eskuinetik ezkerrean), *shoaling*-koefizientearen balioa zertxobait murriztu eta, jarraian, nabarmen hazten den. Irudian ikus daiteke, baita ere, *shoaling*-koefizienteak bi soluzio posible dituela tarte batean, besteak beste, enuntziatuan eskatzen den 0,95 balioarentzat.



2.1. irudia. *Shoaling*-koefizientearen aldaketa sakonera erlatiboarekin, (2.4) ekuazioaren arabera emana.

Shoaling-koefizienteak zein sakonera erlatibotan betetzen duen aurreko baldintza aztertzeko, koefizientearen definizioa erabiliko dugu, (2.4) ekuazioan jasoan. Baldintza betetzen duen sakonera zehazteko, (2.5) adierazpena erabiliko dugu. Ekuazioa ebazteko, d/L aldagaia bakarria dela jo eta hurbilketak eginez ebatziko dugu haren

balioa. Grafikoan ikus zitekeen moduan, ekuazioak bi soluzio ditu, (2.6) adierazpenekoak. Ondorioz, bi sakonera erlatibotan izango du *shoaling*-koefizienteak 0,95 balioa, biak bitarteko uretan.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right)}} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{K_s^2} = \tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right)$$

$$\frac{1}{0,95^2} = \tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right)$$

$$1,108 = \tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right) \quad (2.5)$$

$$\implies \begin{cases} d_1/L_1 = 0,1264 \\ d_2/L_2 = 0,3151 \end{cases} \quad (2.6)$$

Bi sakonera erlatibo horiei dagozkien sakonera absolutuak kalkulatzeko, uhin-luzera kalkula dezakegu lehenik, sakonera erlatibo bakoitzarentzat (2.7) adierazpenak emandako dispertsio-erlazioa baliatuz. Bi puntu horien uhin-luzerak, (2.8) eta (2.9) adierazpenetan emandakoak lirarteke. Espero moduan, uhin-luzera handiagoa da sakonera erlatiboa handiagoa den heinean ($L_2 > L_1$).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (2.7)$$

$$L_1 = \frac{9,81 \cdot 3^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,1264) = 9,28 \text{ m} \quad (2.8)$$

$$L_2 = \frac{9,81 \cdot 3^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,3151) = 13,53 \text{ m} \quad (2.9)$$

Bukatzeko, uhin-luzera eta sakonera erlatiboen balioekin kalkula daiteke jada sakonera absolutua bi kasuetan, (2.10) eta (2.11) adierazpenetan egin bezala. Aurre-rago azaldu dugun moduan, bi sakoneretan izango du *shoaling*-koefizienteak balio bera.

$$d_1 = 0,1264 \cdot L_1 = 0,1264 \cdot 9,28 = 1,17 \text{ m} \quad (2.10)$$

$$d_2 = 0,3151 \cdot L_1 = 0,3151 \cdot 13,53 = 4,26 \text{ m} \quad (2.11)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Oraingoan bada, *shoaling*-koefizientearen balio minimoa zehaztu behar da. *Shoaling*-koefizientearen definizio analitikoa ematen duen ekuazioa (2.12) adierazpenekoa da. Ekuazio hori deribatzea litzateke aukeretako bat, baina errazagoa da balio taularatuak erabiliz *shoaling*-koefizientearen balio minimoa topatzea. Aipaturiko balioak eranskinetako E.7 taulan jasoak daude (H/H'_0). *Shoaling*-koefizientearen balio minimoa, grafikoan ere ikus daiteke, 0,9130 da, eta hori sakonera erlatiboak 0,1909 balioa duenean gauzatzen da, (2.13) adierazpenean jaso bezala. Beraz, altuera minimoa (2.14) adierazpenak emandakoa izango da.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right)}} \quad (2.12)$$

$$\implies (K_s)_{min} [d/L = 0,1909] = 0,9130 \quad (2.13)$$

$$\implies H_{min} = H_o \cdot (K_s)_{min} = 2 \cdot 0,913 = 1,83 \text{ m} \quad (2.14)$$

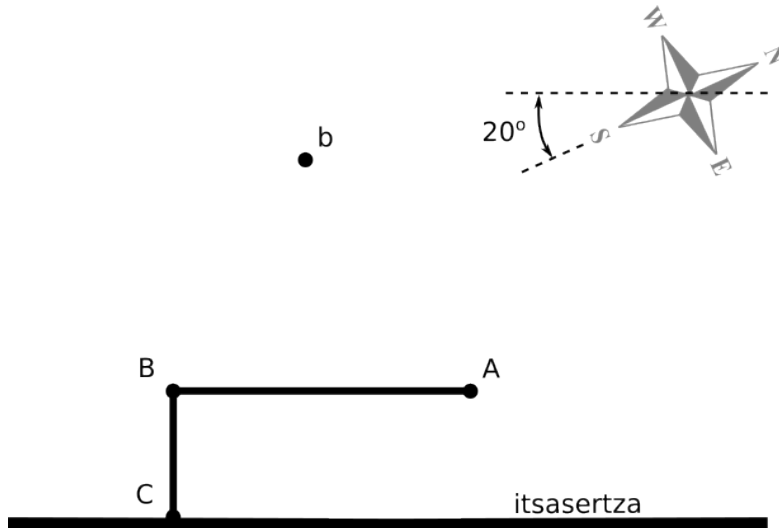
Azkenik, sakonera zehazteko dispertsio-ekuazioa baliatuko dugu (2.7), uhin-luzera kalkulatz lehenik (2.15) eta sakonera absolutua ondoren (2.16).

$$d/L = 0,1909 \implies L = 11,71 \text{ m} \quad (2.15)$$

$$\implies d = 0,1909 \cdot L = 0,1909 \cdot 11,71 = 2,24 \text{ m} \quad (2.16)$$

2.2. Bi punturen arteko errefrakzioa²

Demagun 2.2. irudiko bi dike dituen portua diseinatzen ari zarela: \overline{AB} eta \overline{BC} . \overline{AB} dikea kostarekiko paraleloa da, eta 20° dago inklinatua iparraldearekiko. Portuaren azterketan, portutik gertu dagoen buia (b) baten informazioa erabiliko da, badakigu-eta baliatuko dugun olatuaren noranzkoa iparraldekoa dela buian bertan. Batimetria uniforme eta kostarekiko paraleloa da eremuan.



2.2. irudia. Portua (ABC), buia (b), eta kosta-orientazioaren eskema.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu olatuaren eraso-angelua A puntuan, jakinik A eta b puntuetako bizkortasunak 7 m/s eta 5 m/s direla (ez dakigu zein dagokion puntu bakoitzari).

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuak datu gutxi ematen baditu ere, uhinen eraso-angelua errefrakzioak aldatzen duela hartu behar dugu kontuan. Horren arabera, (2.18) adierazpenean jasotako Snell legea aztertzen badugu (bi puntuetako bizkortasunen eta eraso-angeluen arteko erlazioa ematen diguna), ia datu guztiak dauzkagula jabetuko gara, ezagunak baitira bizkortasunak A zein b puntuetan eta eraso-angelua b puntuan.

Edonola ere, zehaztu beharra dago, lehenik, zein punturi dagokion emandako bizkortasun bietako bakoitza. Bizkortasunaren definiziori begiratuz gero ($C = L/T$)

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2022/23 ikasturtea (2022-11-10), partzialaren 2. ariketa.

eta periodoa konstantea dela jakinik, buiako bizkortasuna dike-muturrekoa baino handiagoa dela ondoriozta dezakegu, kontuan hartuz gero uhin-luzera kostara gerturatu ahala murriztu egiten dela (2.17).

$$L_b > L_A \quad \implies \quad C_b > C_A \quad (2.17)$$

Horrela, Snell legea aplika dezakegu uhinen eraso-angeluan dagoen aldaketa aztertzeko (2.19). Ezagunak dira bizkortasunak bi puntuetan, baita uhinaren angelua buian ere ($\theta_b = 70^\circ$). Espero zitekeen moduan, handiagoa da angelua buian dike-muturrean baino.

$$\frac{C_b}{\sin \theta_b} = \frac{C_A}{\sin \theta_A} \quad (2.18)$$

$$\sin \theta_A = \frac{C_A}{C_b} \cdot \sin \theta_b = \frac{5}{7} \cdot \sin 70^\circ = 0,671 \quad \implies \quad \theta_A = 42,1^\circ \quad (2.19)$$

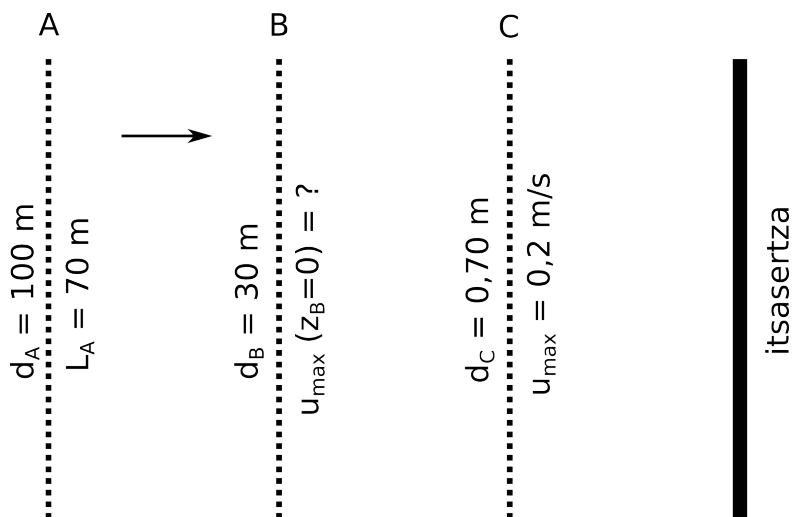
2.3. Eremuak³

Demagun uhin-segida monokromatiko bat kostalderantz barreiatzen dela. Gainera, segida horretako uhin-luzera satelite bidezko argazki batekin neurtu ahal izan dela joko dugu, eta 70 metrokoa dela sakonera 100 metrokoa den eremuan. Uhin horien abiadura orbital horizontal maximoa 0,2 m/s dela neurtu da hondoaren sakonera 0,7 m den eremuan.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Uhinaren abiadura orbital horizontal maximoa gainazaleko partikula baten-tzat, sakonera 30 metro denean. Baztertu errefrakzioa, batimetria lerroak kostarekiko paraleloak direla joko da eta. Teoria lineala ontzat emango dugu emaniko puntuetan.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuak hiru puntu aipatzen ditu uhin monokromatikoen bidean, 2.3. irudiak erakusten duen moduan. Puntu horiei, uhinen ibilbidean, *A*, *B* eta *C* deituko diegu ezkerretik eskuinera.



2.3. irudia. Uhinek kostarako bidean, ezkerretik eskuinera, iragaten dituzten hiru sakonerak.

Interesgarria litzateke jakitea uhinak zein sakonera erlatibotan dauden aipaturiko puntu bakoitzean. Hori zehazterik izango genuke periodoa jakinik, baina ez dugu halakorik. Edonola ere, lehen puntuan uhin-luzera ezaguna denez, puntu horren

³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2021/22 ikasturtea (2022-06-17), ezohikoaren 1. ariketa.

sakonera erlatiboa zehaztu dezakegu (2.20), eta sakonera mugagabea dagoela baieztatu.

$$\begin{aligned} \frac{d_A}{L_A} = \frac{100}{70} = 1,43 > 0,5 & \implies \text{sakonera mugagabea} & (2.20) \\ & \implies L_o = L_A = 70 \text{ m} \end{aligned}$$

Sakonera mugagabeko uhin-luzeraren datuarekin uhin-segidaren periodoa zehaztu daiteke sakonera mugagabeko uhin luzeraren definizioa baliatuz (2.21).

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \implies T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot L_o}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 70}{9,81}} = 6,70 \text{ s} \quad (2.21)$$

Horrek beste bi puntuetako sakonera erlatiboak kalkulatzeko aukera ematen digu, dispertsio-erlazioa baliatuz (2.22). Lehen puntua, B, bitarteko uretan dago, sakonera erlatiboa $\frac{1}{2}$ eta $\frac{1}{20}$ balioen artean baitago (2.23).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (2.22)$$

$$L_B = L_o \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_B}{L_B}\right)$$

$$L_B = 70 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 30}{L_B}\right) \implies L_B = 69,4 \text{ m}$$

$$\frac{d_B}{L_B} = \frac{30}{69,4} = 0,432 \implies \text{bitarteko urak} \quad (2.23)$$

C puntua, aldiz, sakonera txikian dago, sakonera erlatiboa $\frac{1}{2}$ baino txikiagoa baita (2.24).

$$\begin{aligned}
L_C &= L_o \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_C}{L_C}\right) \\
L_C &= 70 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0,70}{L_C}\right) \quad \Rightarrow \quad L_C = 17,4 \text{ m} \\
\frac{d_C}{L_C} &= \frac{0,70}{17,4} = 0,040 \quad \Rightarrow \quad \text{sakonera txikia} \quad (2.24)
\end{aligned}$$

Sakonera erlatiboak ezaguturik, (2.32) adierazpena erabil dezakegu abiadura orbitala zehazteko. Edonola ere, olatuaren altuera jakin behar dugu horretarako. B puntuan olatu-altuera ezaguna ez bada ere, zehaztu daiteke C puntuan eta, ondoren, teoria lineala ontzat emanik, B puntukoa ondorioztatu *shoalinga* kontuan hartuta.

C puntua sakonera murriztuan dagoenez, puntu horretako abiadura definitzeko (2.25) adierazpen sinplifikatua erabil daiteke, partikularen sakonerarekiko independentea dena. Kontuan hartuta emandako datua abiadura maximoa dela (2.26), C puntuko olatu-altuera zehaztu daiteke adierazpen horrekin (2.27).

$$u_C = \frac{H_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d_C}} \cdot \cos \theta_C \quad (2.25)$$

$$u_C^{max} = \frac{H_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d_C}} \cdot 1 \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}
H_C &= 2 \cdot u_C^{max} \cdot \sqrt{\frac{d_C}{g}} \\
&= 2 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{\frac{0,7}{9,81}} = 0,107 \text{ m} \quad (2.27)
\end{aligned}$$

Orain, sakonera ezberdineko olatu-altuerak erlazionatu behar ditugu. Enuntziatua aipatzen den moduan, errefrakziorik gabe *shoalinga* da olatu-altuerari eragiten dion fenomeno bakarra. Hortaz, A puntuko olatuaren altuera, sakonera mugagabea dagoena, eta B puntuko olatuaren altuera erlaziona daitezke (2.28) adierazpenarekin. Kontuan harturik A eta C altuerak ere antzera erlaziona daitezkeela, (2.29) adierazpenak emango digu B eta C olatuen arteko erlazioa. Hau da,

azken bi puntu horien arteko *shoaling*-koefizienteen erlazioak emango digu olatu-altuera zenbat aldatzen den B puntutik C puntura. Kontuan hartuz *shoaling*-koefiziente horien definizioa, (2.30) adierazpena lortuko dugu. Olatuaren altuera (2.31) adierazpenak emandakoa litzateke.

$$H_B = H_A \cdot K_{s,B} \quad (2.28)$$

$$H_B = \frac{H_C}{K_{s,C}} \cdot K_{s,B} \quad (2.29)$$

$$H_B = H_C \cdot \frac{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d_C/L_C) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d_C/L_C}{\sinh 4 \cdot \pi \cdot d_C/L_C}\right)}}{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d_B/L_B) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d_B/L_B}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d_B/L_B)}\right)}} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} H_B &= 0,107 \cdot \frac{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,040) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,040}{\sinh 4 \cdot \pi \cdot 0,040}\right)}}{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,432) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,432}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot 0,432)}\right)}} \\ &= 0,107 \cdot \frac{0,981}{1,440} = 0,073 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Azkenik, bilatzen ari ginen abiadura kalkulatu genduz (2.32) adierazpenarekin. Kontuan hartuta abiadura maximoa eskatzen zaigula, $\cos \theta_B = 1$ litzateke adierazpen horretan. Gainazaleko partikula bat denez, $z_B = 0$ izango da, eta (2.33) adierazpenak emango digu gainazaleko partikularen abiadura.

$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh(2 \cdot \pi \cdot (z + d)/L)}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot d/L)} \cdot \cos \theta \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} u_B^{max} &= \frac{H_B}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L_B} \cdot \frac{\cosh(2 \cdot \pi \cdot (0 + d_B)/L_B)}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot d_B/L_B)} \cdot 1 \\ u_B^{max} &= \frac{0,074}{2} \cdot \frac{9,81 \cdot 6,7}{69,4} \cdot 1 \cdot 1 = 0,035 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Edonola ere, eta enuntziatuak teoria lineala ontzat emateko eskatzen badigu ere, frogatu dezagun ea baliagarria den C puntuan. Le Méhauté-ren (1976) grafikoa erabiliz (2.34) eta (2.35) ekuazioek emandako balioekin, aztertutako kasua baliagarritasun-eremutik kanpo dagoela frogatu dezakegu.

$$\frac{d_C}{g \cdot T^2} = \frac{0,70}{9,81 \cdot 6,70^2} = 0,0016 \quad (2.34)$$

$$\frac{H_C}{g \cdot T^2} = \frac{0,107}{9,81 \cdot 6,70^2} = 0,00024 \quad (2.35)$$

2.4. Altuera mugagabea energetik abiatuta⁴

Demagun 10 metroko altuera duen uhin baten energia totala 15 321 kJ/m dela 20 metroko sakoneran (A puntua deituko diogu). Batimetria kostarekiko paraleloa da, eta aipaturiko A puntuan olatuaren eraso-angelua 10° .

Honako hau eskatzen da:

- (a) Olatuaren periodoa eta altuera sakonera mugagabea. Uraren dentsitatea 1030 kg/m^3 dela joko da.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Kasu honetan bi puntu ditugu, aipaturiko A puntua eta sakonera mugagabea. Eskatzen zaizkigun datuak zehazteko, bi puntu horien arteko erlazioari begiratu beharko diogu, besteak beste. Edonola ere, olatuek duten energiaren adierazpenari begiratzen badiogu (2.36), olatuen uhin-luzera zehaztu dezakegula ikus dezakegu (2.37), eta datu hori ezinbestekoa izango da uhinak A puntuan dituen ezaugarriak zehazteko.

$$E_A = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_A^2 \cdot L_A \quad (2.36)$$

$$L_A = \frac{E_A \cdot 8}{\rho \cdot g \cdot H_A^2}$$

$$L_A = \frac{1532 \cdot 10^3 \cdot 8}{1030 \cdot 9,81 \cdot 10^2} = 121,3 \text{ m} \quad (2.37)$$

Besteak beste, uhin-luzerak A puntuan uhin horren sakonera erlatiboaren informazioa ematen digu, (2.38) adierazpenak erakusten duen moduan.

$$\frac{d_A}{L_A} = \frac{20}{121,3} = 0,1649 \quad \implies \quad \text{bitarteko urak} \quad (2.38)$$

Uhin-luzerak aukera ematen du, baita ere, A puntuko informazioa baliaturik, uhinaren periodoa zehazteko. Hala, dispertsio-ekuazioa baliatuz (2.39), uhinaren periodoa kalkula dezakegu (2.40).

⁴Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2021/22 ikasturtea (2022-01-12), ohikoaren 2. ariketa.

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (2.39)$$

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot L}{9,81 \cdot \tanh(2 \cdot \pi \cdot d/L)}}$$

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 121,3}{9,81 \cdot \tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,1649)}} = 10,0 \text{ s} \quad (2.40)$$

Hala ere, olatuaren altuera zehaztu nahi badugu sakonera mugagabeen, errefrakzioaren eta *shoaling*aren eragina hartu beharko ditugu kontuan, biak batera, (2.47) adierazpenak erakusten duen moduan. Horretarako, errefrakzioaren koefizientea kalkulatu dugu lehenik, angeluen arteko erlazioa erabiliz (2.43). Lehenik, baina, olatuak sakonera mugagabeen kostarekiko zuen angelua zehaztu behar dugu, eta Snell legea baliatuko dugu horretarako (2.41). Espero zitekeen moduan, olatuen angelua handiagoa da sakonera mugagabeen A puntuan baino (2.42).

$$\frac{C_o}{\sin \theta_o} = \frac{C_A}{\sin \theta_A} \quad (2.41)$$

$$\sin \theta_o = \frac{C_o}{C_A} \cdot \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_o = \frac{L_o/T}{L_A/T} \cdot \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_o = \frac{L_o}{L_A} \cdot \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_o = \frac{\frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}}{L_A} \cdot \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi \cdot L_A} \cdot \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_o = \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot 121,3} \cdot \sin 10^\circ = 0,2235$$

$$\implies \theta_o = 12,9^\circ \quad (2.42)$$

Horrela, bi angeluak jakinik, kalkula daiteke A puntuari dagokion errefrakzio-koefizientea (2.44). Ikus daitekeen moduan, errefrakzioak ez du ia eraginik olatu-altueran.

$$K_{r,A} = \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta_A}} \quad (2.43)$$

$$K_{r,A} = \sqrt{\frac{\cos 12,9^\circ}{\cos 10,0^\circ}} = 0,99 \quad (2.44)$$

Olatu-altueren erlazioa guztiz zehazteko, *shoalinga* ere kontuan hartu behar da. *Shoaling*-koefizientearen definizioa baliatuko dugu hura kalkulatzeko, (2.45) adierazpenaren arabera. Emaitzak erakusten duen moduan, (2.46) adierazpena, kasu honetan *shoalingak* eragin handiagoa du errefrakzioak baino olatu-altueran.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(k \cdot d) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)}\right)}} \quad (2.45)$$

$$K_{s,A} = \frac{1}{\sqrt{\tanh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L_A} \cdot d_A\right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{L_A} \cdot d_A}{\sinh\left(2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{L_A} \cdot d_A\right)}\right)}}$$

$$K_{s,A} = \frac{1}{\sqrt{\tanh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d_A}{L_A}\right) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{d_A}{L_A}}{\sinh\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{d_A}{L_A}\right)}\right)}}$$

$$K_{s,A} = \frac{1}{\sqrt{\tanh(2 \cdot \pi \cdot 0,1649) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,1649}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot 0,1649)}\right)}} = 0,92 \quad (2.46)$$

Beraz, jada kalkula daiteke olatuak sakonera mugagabeen zuen altuera (2.48). Oraingoan, espero daitekeenaren aurka, handiagoa da olatu-altuera sakonera mugagabeen A puntuan baino. Hori da errefrakzioak eraginik ez duelako, batetik, eta *shoalingaren* balioa olatu-altuera murrizten den sakonera erlatiboen eremuan dagoelako, bestetik, 2.1. ariketan azaldu bezala.

$$H = H_o \cdot K_s \cdot K_r \quad (2.47)$$

$$H_o = \frac{H_A}{K_{s,A} \cdot K_{r,A}}$$

$$H_o = \frac{10}{0,92 \cdot 0,99} = 10,98 \text{ m} \quad (2.48)$$

2.5. Errefrakzioa eta *shoalinga*⁵

Bi olatuk, A eta B olatuek, altuera eta noranzko bera dute 5 metroko sakoneran. Olatu horien periodoak, hurrenez hurren, $T_A = 10$ s eta $T_B = 12$ s dira.

Honako hau eskatzen da:

- Jakinik A olatuaren eraso-angelua txikiagoa dela B olatuarena baino sakonera mugagabean, zehaztu al daiteke bi olatuetarik zein den altuagoa sakonera mugagabean? Arrazoitu erantzuna.
- Kalkulatu A olatuaren noranzkoa sakonera mugagabean, baldin eta B olatuaren noranzkoa 10° bada sakonera mugagabean.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuak emandako baldintzen arabera, uhinek altuera bera dute 5 metroko sakoneran, (2.49) ekuazioan adierazi bezala. Gainera, sakonera mugagabeko eta A zein B puntuetako olatu-altuerak (2.50) zein (2.51) adierazpenen arabera erlaziona daitezke, uhinen altuera aldatu egiten baita *shoalingaren* eta errefrakzioaren ondorioz. Hala, hiru ekuazio horien arabera, sakonera mugagabeko bi altuerak erlaziona genitzake, (2.52) adierazpenean jaso bezala, soilik jakinik sakonera murriztuko olatu-altuerak berdinak direla.

$$H_A = H_B \quad (2.49)$$

$$H_A = K_{r,A} \cdot K_{s,A} \cdot H_{o,A} \quad (2.50)$$

$$H_B = K_{r,B} \cdot K_{s,B} \cdot H_{o,B} \quad (2.51)$$

$$\implies H_{o,A} = H_{o,B} \cdot \frac{K_{r,B}}{K_{r,A}} \cdot \frac{K_{s,B}}{K_{s,A}} \quad (2.52)$$

Sakonera mugagabeko altuera zehazteko, (2.52) erlazioaren arabera, olatu bakoitzaren shoaling- eta errefrakzio-koefizienteak zehaztu beharko genituzke, edo, gutxienez, horien arteko erlazioak finkatu.

Lehenik, *shoaling*-koefizienteak zehaztuko ditugu; horretarako, analitikoki kalkulatu beharrean, uhinen periodoak eta sakonera erlatiboan ezaugarriak ematen dituzten balio taularatuak erabiliko ditugu, eranskineko E.7 taulan emanak. Hala, (2.53) eta (2.55) adierazpenetan sakonera mugagabeko uhin-luzerak kalkulatu dira,

⁵Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2021/22 ikasturtea (2021-11-08), partzialaren 1. ariketa.

eta (2.54) eta (2.56) adierazpenetan *shoaling*-koefizienteak zehaztu dira, aipaturiko taulak baliatuz. Ondorioz, badakigu B olatuari gehiago eragiten diola *shoaling*ak A olatuari baino.

$$L_{0,A} = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi} = 156,1 \text{ m} \quad (2.53)$$

$$\frac{d_A}{L_{o,A}} = \frac{5}{156,1} = 0,032 \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} K_{s,A} = 1,111 \quad (2.54)$$

$$L_{0,B} = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 12^2}{2 \cdot \pi} = 224,6 \text{ m} \quad (2.55)$$

$$\frac{d_B}{L_{o,B}} = \frac{5}{224,6} = 0,022 \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} K_{s,B} = 1,201 \quad (2.56)$$

Bestalde, errefrakzioaren eragina ere aztertu beharko genuke. Hala, (2.57) eta (2.58) ekuazioek emango dizkigute errefrakzio-koefizienteak, olatuek dituzten noranzkoak erlazionatuz 5 metrotan eta sakonera mugagabeen. Gainera, kontuan hartu beharko dugu eraso-angelu biak berdinak direla 5 metroko sakoneran, eta, ondorioz, baita horien kosinuak ere (2.59). Horrela, bi errefrakzio-koefizienteen arteko erlazioa (2.60) adierazpenak emandakoa da. Erlazio horretan kontuan hartuz gero eraso-angeluak 0° eta 90° artean egon behar duela, eta sakonera mugagabeen B eraso-angelua handiagoa dela, $\cos \theta_{o,B} > \cos \theta_{o,A}$ dela ondoriozta dezakegu. Beraz, $K_{r,B} > K_{r,A}$ izango da, (2.61) adierazpenaren arabera; hau da, errefrakzioak gehiago eragingo dio B olatuari.

$$K_{r,A} = \sqrt{\frac{\cos \theta_{o,A}}{\cos \theta_A}} \quad (2.57)$$

$$K_{r,B} = \sqrt{\frac{\cos \theta_{o,B}}{\cos \theta_B}} \quad (2.58)$$

$$\theta_A = \theta_B \implies \cos \theta_A = \cos \theta_B \quad (2.59)$$

$$\implies \frac{K_{r,B}}{K_{r,A}} = \sqrt{\frac{\cos \theta_{o,B}}{\cos \theta_B} \cdot \frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_{o,A}}} = \sqrt{\frac{\cos \theta_{o,B}}{\cos \theta_{o,A}}} \quad (2.60)$$

$$\xrightarrow[\theta_{o,A} < \theta_{o,B}]{0^\circ < \theta < 90^\circ} \frac{K_{r,B}}{K_{r,A}} = \sqrt{\frac{\cos \theta_{o,B}}{\cos \theta_{o,A}}} < 1 \quad (2.61)$$

Beraz, (2.54) eta (2.56) emaitzen arabera, badakigu $K_{s,B} > K_{s,A}$ dela. Aldiz, (2.61) adierazpenaren arabera, $K_{r,A} > K_{r,B}$ dela dakigu. Ondorioz, koefiziente horien balioak ezagutu gabe, edo *shoalingaren* eta errefrakzioaren eragin erlatiboa ezagutu gabe, ezin dugu zehaztu (2.52) adierazpenaren arabera bietako zein olatu zen handiagoa sakonera mugagabeen.

ARIKETAREN EBAZPEN A (a). *B* olatuaren eraso-angelua zehazteko Snell legea balia genezake, sakonera mugagabeko eta 5 metroko sakoneran angeluek uhin-luzerarekin duten erlazioa eman baitigu, (2.62) eta (2.63) adierazpenen arabera.

$$\frac{C_A}{\sin \theta_A} = \frac{C_{o,A}}{\sin \theta_{o,A}} \implies \sin \theta_A = \sin \theta_{o,A} \cdot \frac{C_A}{C_{o,A}} \quad (2.62)$$

$$\sin \theta_A = \sin \theta_{o,A} \cdot \frac{L_A}{L_{o,A}}$$

$$\frac{C_B}{\sin \theta_B} = \frac{C_{o,B}}{\sin \theta_{o,B}} \implies \sin \theta_B = \sin \theta_{o,B} \cdot \frac{L_B}{L_{o,B}} \quad (2.63)$$

Sakonera mugagabeko uhin-luzerak aurreko atalean zehaztu ditugu, eta 5 metroko sakonerei dagozkien uhin-luzerak zehaztu ditzakegu, balio taularatuak erabiliz, (2.64) eta (2.65) adierazpenetan erakutsi bezala.

$$\frac{d_A}{L_{o,A}} = \frac{5}{156,1} = 0,032 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} \quad \frac{d_A}{L_A} = 0,07385 \implies L_A = 67,7 \text{ m} \quad (2.64)$$

$$\frac{d_B}{L_{o,B}} = \frac{5}{224,6} = 0,022 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} \quad \frac{d_B}{L_B} = 0,06057 \implies L_B = 82,6 \text{ m} \quad (2.65)$$

Hala, kontuan hartuta eraso-angeluak berdinak direla 5 metroko sakoneran, (2.66), eta $\theta_{o,B} = 10^\circ$ dela jakinik, *A* olatuaren eraso-angelua zehaztu daiteke sakonera mugagabeen. Egiazta daitekeen moduan, sakonera mugagabeen handiagoa zen *B* olatuaren eraso-angelua. Orain, nahiko bagenu, froga dezakegu bi olatuetatik zein den altuena, aurreko atalean eskatu bezala. Horretarako, errefrakzio-koefizienteak kalkulatu beharko genituzke lehenago.

$$\theta_A = \theta_B \implies \sin \theta_A = \sin \theta_B \quad (2.66)$$

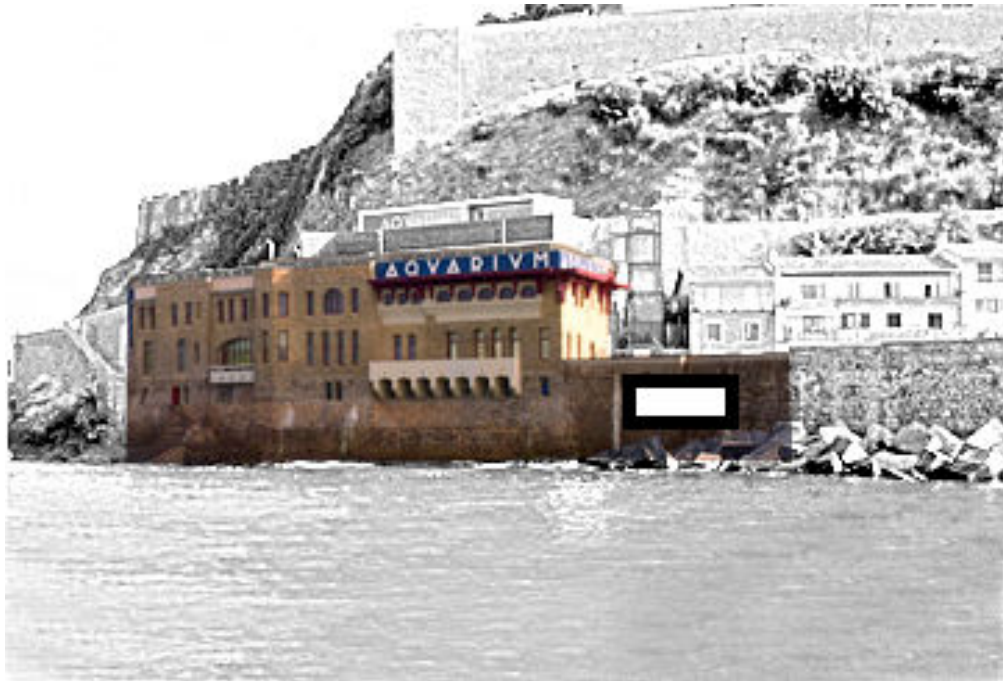
$$\sin \theta_{o,A} \cdot \frac{L_A}{L_{o,A}} = \sin \theta_{o,B} \cdot \frac{L_B}{L_{o,B}}$$

$$\sin \theta_{o,A} = \sin \theta_{o,B} \cdot \frac{L_B \cdot L_{o,A}}{L_{o,B} \cdot L_A}$$

$$\sin \theta_{o,A} = \sin 10 \cdot \frac{82,6 \cdot 156,1}{224,6 \cdot 67,7} \implies \theta_{o,A} = 8,46^\circ \quad (2.67)$$

2.6. Donostiako Aquariuma⁶

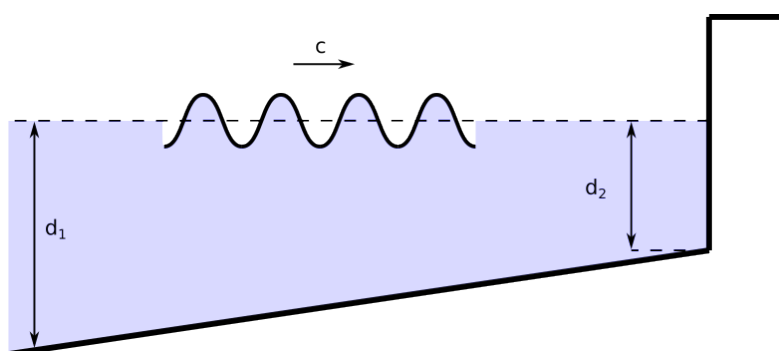
Donostiako Aquariuma portuaren ertz batean dago kokatua, Donostiako irlaren eta Urgull mendixkaren artean dagoen badiarako sarbidearen parean. Han, Aquariumean, leiho berri bat jartzeko aukera ari dira aztertzen (ikus 2.4. irudia). Leihoaren behe-lerroakadura +4,00 metrora dago kokatua, eta 3 metroko altuera izango duela aurreikusi da. Leihoa diseinatzeko, baina, hari eragingo dioten olatuen ondorioz zer-nolako presioa jasan beharko duen kalkulatu behar da.



2.4. irudia. Donostiako Aquariuma eta leihoaren aurreikuspena (behean eskui-nean).

Helburu horrekin, Kantabriako Unibertsitateko ikerlariak sakonera mugagabeko uhinen barreatze-azterketa egin dute, baita itsasaldiena ere. Hala, ikerlariak beheko irudian agertzen den profila aztertu dute (ikus 2.5. irudia). Profil horretan, d_1 hasierako sakonera da, 20 metro, eta d_2 Aquarium pareko sakonera, 5 metro; sakonera biak ur lasaien itsas mailarekiko daude emanak. Puntu bien arteko distantzia 300 metrokoa da. Egindako azterketaren arabera, diseinurako baldintzarik okerrenak badian sartzeko olatu batentzat (d_1 puntuan) honako hauek dira: 7,00 metroko uhin-altuera eta 16 segundoko uhin-periodoa. Gainera, itsas maila +5,00 metro dela joko da egoera horretan.

⁶Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2019-06-28), ezohikoaren 1. ariketa.



2.5. irudia. Aztertutako profila.

Honako hau eskatzen da:

- Kalkulatu Aquarium parean (d_2 puntua), aipatutako egoeran, diseinuko uhinaren ezaugarri hauek: L , H , C eta T . Horretarako, $K_{rs}=1,2$ dela joko da d_1 eta d_2 puntuen artean.
- Kalkulatu aipatutako uhinak eragingo duen presio maximoa leihoan. Itsas uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 dela joko da. Presioaren kalkuluan ez da kontuan hartuko bestelako fenomenorik.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Lehenik, uhinaren periodoa aldatzen ez denez, $T = 16 \text{ m}$ dela zehaztu dezakegu, baita Aquarium parean ere. Bestalde, H_1 datu izanik, H_2 erraz kalkula daiteke, altuerak profilean zehar izango duen aldaketa K_{rs} koefizienteak karakterizatzen baitu, (2.68) adierazpenaren arabera.

$$H_2 = H_1 \cdot K_{rs} = 7,00 \cdot 1,2 = 8,4 \text{ m} \quad (2.68)$$

Profila aztertzen badugu, diseinurako ur-mailak edo sakonerak zein diren adieraz dezakegu, 2.5. irudiko eskemaren arabera. Enuntziatuak ez dira izango ur lasaiei dagozkienak, itsas maila 5 metro gorago baitago. Hala, lehen puntuko sakonera, d'_1 deituko diogu, 25 m izango da, eta Aquarium pareko sakonera, d'_2 , 10 m.

Uhin-luzerak zehazteko dispersio-erlazioa erabil dezakegu, (2.69) ekuazioan jaso. Horrela, Aquarium pareko uhin-luzera zehaztu dezakegu, (2.70) adierazpena, baita sakonera erlatiboa ere (2.71).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (2.69)$$

$$L'_2 = \frac{9,81 \cdot 16^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{L'_2}\right)$$

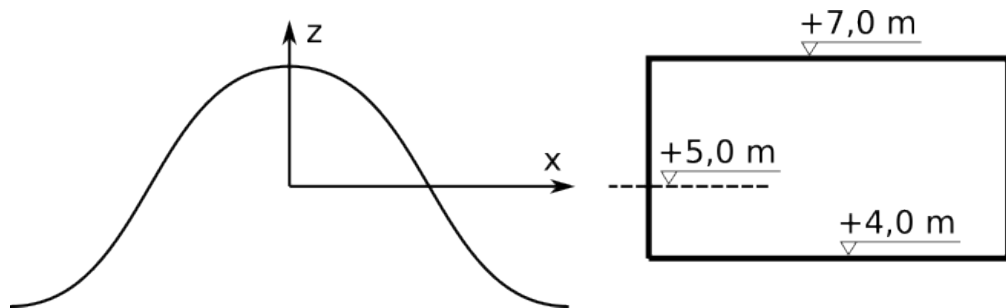
$$L'_2 = 399,7 \cdot \tanh\left(\frac{62,8}{L'_2}\right) \implies L'_2 = 154,3 \text{ m} \quad (2.70)$$

$$\frac{d'_2}{L'_2} = \frac{10}{154,3} = 0,0648 \implies \text{bitarteko urak} \quad (2.71)$$

Azkenik, uhin-luzera eta periodoa ezagututa, uhin-bizkortasuna kalkula daiteke, (2.72) adierazpenean jasota dagoen modura.

$$C'_2 = \frac{L'_2}{T} = \frac{154,3 \text{ m}}{16 \text{ s}} = 9,64 \text{ m/s} \quad (2.72)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Presioa kalkulatzeko, kontuan hartu behar dugu leihoaren kokapena zein den, 2.6. irudiaren arabera. Ur-maila +5,0 kotara dagoenez, z ardatzaren jatorria ere bertan egongo da.



2.6. irudia. Uhinaren profila (ezkerrean) eta leihoaren aurrebista kotekin (eskui-
nean).

Beraz, presioa kalkulatzeko (2.73) adierazpena erabil daiteke, bitarteko uretan egongo baita aztertzen ari garen uhina. Aurreko atalean zehaztu dugunez sakone-
ra erlatiboa—bitarteko uretan dago— (2.73) adierazpena erabiliko dugu presioa kalkulatzeko. Leihoari eragiten dion presio maximoa kalkulatu nahi badugu, bi al-
dagai hauek hartu beharko dira kontuan: leihoaren zein puntutan kalkulatu nahi

dugun presioa (z aldagaia finkatu beharko da), eta uhinaren fasea zein den (η finkatu beharko da).

Leioa uhinei aurre egiteko diseinatu nahi bada, olatuek eragin dezaketen presio maximoa zehaztu beharko da. Beraz, z finkatzeko kontuan hartuko da sakonera handitzearekin batera presioa ere handitu egiten dela; hots, $z = -1$ m denean izango da presioa maximoa. Kasu horretan, presioaren bigarren gaia ($\rho g z$) maximoa izango da. Bestalde, presioa maximoa izango da $\theta = 0^\circ$ denean. Kasu horretan, $\eta = H/2$. Ondorioz, (2.74) adierazpenak emango digu leihoaren kalkuluan erabiliko dugun presioa.

$$p = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (2.73)$$

$$p_{max} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d - 1))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot (-1) \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} &= 1025 \cdot 9,81 \cdot \frac{8,4}{2} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{154,3} \cdot (10 - 1)\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi}{154,3} \cdot 10\right)} + 1025 \cdot 9,81 \\ &= 42\,232 \cdot \frac{1,0679}{1,0840} + 10\,055 = 51\,660 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3. Haustura

Olatuak sortze-eremutik urrundu eta kostalderantz gerturatu ahal, shoalingaren eta errefrakzioaren eraginez altuera eta norabidea aldatuko dituzte. Hala ere, ibilbidearen amaieran kostara iristen dira eta, ezinbestean, hautsi egingo dira. Hausturan, dela hondartzan dela portu bateko dikean, olatuek energia galtzen dute. Horrexegatik, hain zuzen ere, garrantzitsua da jakitea olatuak dikera iritsi aurretik hautsiko ote diren ala ez, dikeen diseinuan eragina izango baitu olatuen energia dikera iritsi aurretik xahutuko ote den zehazteak. Kapitulu honetan olatuen haustura hori karakterizatuko dugu, eta hori lantzeko ariketak jorratuko.

3.1. Haustura-kasuak¹

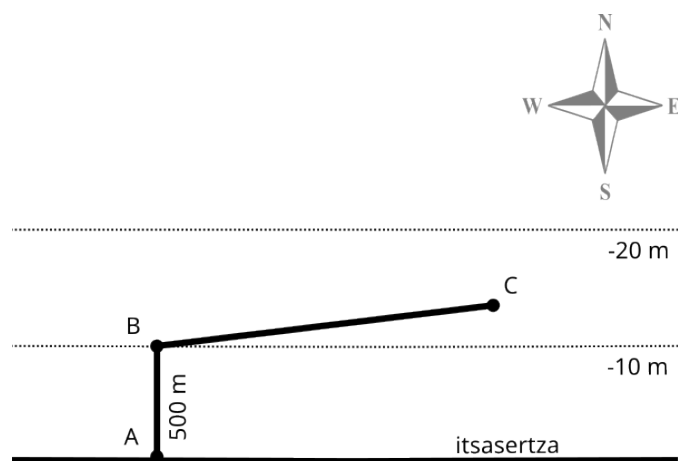
Eremu jakin batean olatu-horma etzan bat diseinatu da (ikus 3.1. irudia). Eremu horretan, kostaren malda konstantea da, eta kosta-lerroa iparralderantz begira dago. Olatu-horma bi tartetan diseinatu da. Lehena (AB tartea) kostarekiko elkarzuta da (N-S noranzkoa du), eta 500 metro ditu. Bigarrenak (BC tartea) kostarekiko inklinazio bat du, irudian ageri den bezala. Tarte bien sakonera ez da konstantea; lehena 0 eta 10 metroko sakonera artean eraiki da, eta, bigarrena, 10 eta 14 metroko sakonera artean.

Dikearen diseinuan erabili den olatuaren noranzkoa N da, eta haren periodoa 12 segundokoa. Badakigu, baita ere, dikerik gabe, diseinu-olatuen surfaren antzekotasun-parametroaren balioa 0,1 dela ($\xi_0 = 0,1$).

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu diseinu-olatuen altuera sakonera mugagabeen.
- (b) Zehaztu, dikerik eraiki gabe, diseinu-olatuen hauste-altuera; baita haustura hori gertatuko den sakonera ere. Erabili *Shore Protection Manual* (SPM)

¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2020-01-13), ohikoaren 4. ariketa.



3.1. irudia. Dikearen eta kontradikearen eskema.

eskuliburuan emandako irizpidea.

- (c) Kalkulatu olatuaren altuera B eta C puntuetan, teoria lineala erabiliz, sakonera mugagabetik B eta C puntuetarainoko *shoaling*-koefizientearen balioak hauek baldin badira: $K_{s,C}=1,02$ eta $K_{s,B}=1,06$. Teoria lineala eremu horretan baligarri balitz, zer ondorio aterako zenuke lorturiko balioak eta aurreko atalekoak alderatuz gero? Egokia al da teoria lineala erabiltzea kasu honetan?
- (d) Zehaztu, *SPM* irizpidearen arabera eta dikerik gabe, zer sakoneratan hasiko litzatekeen haustura-prozesua.
- (e) Zehaztu diseinu-olatuaren altuera, baldin eta sekzio berarekin diseinatuko balitz olatu-hormaren BC tarte osoa. Ez dugu kontuan hartuko olatuek dikea jotzean duten inklinazioa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Sakonera mugagabeen olatuak zuen altuera zehazteko, surfaren antzekotasun-parametrora joko dugu (3.1). Ekuazioan ezezaguna den bakarra sakonera mugagabeko uhinaren altuera da; beraz, ekuazioa eraldatu daiteke H_o ebazteko. Bertan, sakonera mugagabeari dagokion uhin-luzera ordezkatu dugu, eta periodoaren menpe ipiniko.

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \Rightarrow H_o = L_o \cdot \left(\frac{m}{\xi_o}\right)^2 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \left(\frac{m}{\xi_o}\right)^2 \quad (3.1)$$

Aurreko adierazpenean agertzen den hondartzaren malda irudiko batimetriatik ondoriozta daiteke, \overline{AB} tarteko datuak baliatuz: $m = 10/500 = 0,02$. Beste bi aldagaiak enuntziatuak ematen ditu. Beraz, emandako baldintzetan hausten den olatuaren altuera, sakonera mugagabea, (3.2) adierazpenekoa da.

$$H_0 = \frac{9,81}{2\pi} \cdot \left(\frac{10/500 \cdot 12}{0,1} \right)^2 = 9,0 \text{ m} \quad (3.2)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Olatuak haustean izango dituen ezaugarriak zehazteko SPM irizpidearen arabera, eranskinen E.3 irudiko abakoa eta (3.8) adierazpenak erabiliko ditugu. Azken ekuazio hori erabili beharrean, (3.8), eranskinen E.4 irudiko nomograma ere erabil daiteke. Hala ere, kasu honetan adierazpen analitikoa lehenetsiko dugu.

Beraz, bi horiek olatuaren hauste-ezaugarriak emango dizkigute hondartzan inongo dikerik ez dagoenean. Lehen nomogramak, eranskinen E.3 irudikoak, sakonera mugagabeko altueraren eta haustura-altueraren arteko erlazioak ematen ditu. Horretarako, baina, sakonera mugagabea errefrakziorik gabeko olatu-altuera behar du, (3.3) adierazpenaren arabera. Gure kasuan, batimetria eta olatuaren noranzkoa elkarzutak direnez, ez da errefrakziorik egongo eta, ondorioz, $K_r = 1,0$ izango da.

$$H'_0 = K_r \cdot H_0 = 1,0 \cdot 9 = 9,0 \text{ m} \quad (3.3)$$

Hala, errefrakziorik gabeko altuera jakinik, zehaztu daiteke uhin hori zein altuerarekin hautsiko den, Godak emandako abakoan oinarriturik. Horretarako, olatuaren ezaugarriak, H'_0 eta T , eta baita hondartzaren malda ere ezagutu behar dira, E.3 irudiko nomograman H_b/H'_0 lortzeko. Datu horiek (3.4) adierazpenean daude emanak, eta lorturiko hauste-altuera (3.5) adierazpenean.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{H'_0}{gT^2} = 0,0064 \\ m = 0,02 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{abakoa}]{\text{E.3}} \frac{H_b}{H'_0} = 1,055 \quad (3.4)$$

$$\implies H_b = 9,0 \cdot 1,055 = 9,50 \text{ m} \quad (3.5)$$

Orain, hauste-altuera eta hondartzaren malda jakinik, kalkula daiteke zein sakoneratan gauzatuko den hauste-altuera hori, (3.8) adierazpenaren bidez. Aldez aurretik, maldaren menpe dauden A eta B koefizienteak kalkulatu behar dira,

(3.6) eta (3.7) adierazpenekoak hain zuzen ere. Horrenbestez, sakonera 11,31 m denean hautsiko da olatua. Beraz, hasierako eskeman ikusten den moduan, sakonera hori BC tartea dagoen eremuari dagokio; hau da, olatua kostalderako bidean hautsiko da, C puntuaren ondoren baina B puntura iritsi aurretik.

$$A(m) = 43,8 \cdot (1 - e^{-19 \cdot m}) = 43,8 \cdot (1 - e^{-19 \cdot 0,02}) = 13,85 \quad (3.6)$$

$$B(m) = \frac{1,56}{1 + e^{-19,5 \cdot m}} = \frac{1,56}{1 + e^{-19,5 \cdot 0,02}} = 0,93 \quad (3.7)$$

$$\frac{H_b}{d_b} = B(m) - A(m) \cdot \frac{H_b}{g \cdot T^2} = 0,93 - 13,85 \cdot \frac{9,50}{9,81 \cdot 12^2} = 0,84 \quad (3.8)$$

$$\implies d_b = \frac{9,50}{0,84} = 11,31 \text{ m}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Aipaturiko bi puntuetan, B eta C , olatu-altuerak kalkulatzeko teoria linealaren arabera (3.9) eta (3.10) erlazioak erabil daitezke. Gogoan izan errefrakzioak ez duela eraginik ($K_r = 1,00$).

$$H_B = H_o \cdot K_{s,B} \cdot K_{r,B} = 9,0 \cdot 1,06 \cdot 1,0 = 9,54 \text{ m} \quad (3.9)$$

$$H_C = H_o \cdot K_{s,C} \cdot K_{r,C} = 9,0 \cdot 1,02 \cdot 1,0 = 9,18 \text{ m} \quad (3.10)$$

Aurreko (b) atalean kalkulatu ditugun datuei erreparatuz gero, olatuak B eta C puntuen artean hausten direla ondorioztatu dugu ($d_b = 11,31 \text{ m}$), olatu-altuera 9,50 metrokoa denean. Aldiz, teoria linealeko altuerak diote C puntuan olatu-altuera ez dela hauste-mugara iritsi eta, ondorioz, ez direla hautsiko. Bai, ordea, B puntuan, orduan olatu-altuerak apurtuko diren altuera-muga hori gainditu egingo baitute. Horrenbestez, teoria linealak B eta C puntuetan ematen dizkigun olatu-altuerak bateragarriak dira SPM irizpideak emaniko hauste-altuerekin eta hauste-sakonerekin.

Bestalde, teoria linealaren egokitasuna aztertu nahi badugu, eranskinen E.1 irudiko nomograma erabil daiteke, (3.11) eta (3.12) adierazpenetako balioak erabiliz. Dike-buruan egingo dugu analisia, C puntuan. Emandako puntua aztertuz ikus daiteke erabiltzen ari garen balioak teoria linealaren erabilgarritasun-eremutik oso urrun daudela. Hori haustura-eremuan gaudelako da, eta teoria lineala ez da horretarako egokia.

$$\frac{d_{b,C}}{gT^2} = \frac{14}{9,81 \cdot 12^2} = 0,007 \quad (3.11)$$

$$\frac{H_C}{gT^2} = \frac{9,18}{9,81 \cdot 12^2} = 0,0065 \quad (3.12)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Haustura-prozesua sakonera bitarte batean gauzatzen dela kontuan hartuko bagenu, haustura hori hasten eta bukatzen den sakonerak zehazteko eskatzen zaigu. Hala, eranskinean jasotako E.5 irudiko abakoa erabil dezakegu α eta β koefizienteak zehazteko; d_b/H_b erlazioaren goi- eta behe-mugak.

Esan bezala, hauste-altuera ezaguna denez, (3.13) adierazpeneko erlazioak lor daitezke abakotik, H_b/gT^2 koefiziente adimentsionalarekin eta maldaren balioekin. Ondorioz, olatuaren haustura 11,40 m eta 14,72 m sakoneraren artean gauzatuko da. Haustura-hasieraren balio hori bat dator (b) atalean kalkulatu dugunarekin.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{H_b}{gT^2} = 0,007 \\ m = 0,02 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{abakoa}]{\text{E.5}} \left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{d_b^{\min}}{H_b} = 1,20 \quad \Rightarrow \quad d_b^{\min} = 11,40 \text{ m} \\ \alpha = \frac{d_b^{\max}}{H_b} = 1,55 \quad \Rightarrow \quad d_b^{\max} = 14,72 \text{ m} \end{array} \right. \quad (3.13)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Egitura bat sakonera jakinean eraikitzen denean eta olatu bat haren parean hausten denean, olatu-hormari eragiten dion olatuaren altuera ez da hauste-altuera bera; hausten denetik egituraraino sakonera murrizten doa eta (ikus E.6 irudiko eskema). Hala, eranskineko E.6 abakoarekin, egituraren aurka hausten den olatu-altuera zehaztuko dugu, distantzia hori kontuan hartuz.

Gure kasuan, egitura bi sakonera artean eraikiko da (B eta C); ondorioz, bi egoera horietan aztertuko dugu egiturari eragiten dion olatuaren hauste-altuera. Hala, (3.14) eta (3.15) ekuazioetan jasotako koefiziente adimentsionala eta hondartzaren malda baliatuko ditugu. Ondorioz, olatua 9,00 m eta 12,18 m altueren artean hautsiko da. Gure kasuan, diseinurako altuerarik handiena hartuko dugu, eta hori izango da olatu-horma diseinatzeke erabiliko duguna.

$$\frac{d_{s,B}}{gT^2} = \frac{10}{9,81 \cdot 12^2} = 0,007 \quad \xrightarrow[\text{abakoa}]{\text{E.6}} \quad \frac{H_{b,B}}{d_{s,B}} = 0,90 \quad \Rightarrow \quad H_{b,B} = 9,00 \text{ m} \quad (3.14)$$

$$\frac{d_{s,C}}{gT^2} = \frac{14}{9,81 \cdot 12^2} = 0,01 \quad \xrightarrow[\text{abakoa}]{\text{E.6}} \quad \frac{H_{b,C}}{d_{s,C}} = 0,87 \quad \Rightarrow \quad H_{b,C} = 12,18 \text{ m} \quad (3.15)$$

3.2. Hauste-tarteak²

Wavegarden euskal enpresa bat da, surfearn egiteko eremu artifizialak diseinatzen dituena. Eremu artifizial horiek igerileku edo urmael antzeko ontziak dira, eta olatu artifizialak sortzen dituzte, hausteko ondoren. Horietan, orduko 1000 olatu sor daitezke, haustean 0,5 eta 2,0 metro artekoak.

Olatuen haustura-kasuak aztertzeko surfaren antzekotasun-parametroa edo Iribarren zenbakia erabili ohi da: $\xi = \frac{m}{\sqrt{H/L_o}}$. Adierazpena sakonera mugagabeen edo hausturan defini daiteke, H_b edo H_0 erabiliz, 3.1. taulan jasotako balioen arabera.

3.1. taula. Iribarren zenbakien arteko erlazioak (Batjes, 1974).

Haustura mota	ξ_o	ξ_b
<i>surging / collapsing</i>	3,3	2,0
<i>plunging</i>	0,5-3,3	0,4-2,0
<i>spilling</i>	0,5	0,4

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zer maldarekin diseinatuko zenuke hondoa, sorturiko olatuen haustura *plunging* motakoa izatea nahiko bazenu?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Olatuen haustura *plunging* motakoa izan dadin, ξ aldagaia taulan emandako balioen artean egon beharko da. ξ_o aldagaiak H_o uhin-altuera baliatzen duenez, eta altuera hori ezezaguna ez ezik zehazten zaila litzatekeenez, ξ_b aldagaiarekin lan egingo dugu; hau da, haustura-altuera darabilen aldagaia erabiliko dugu, (3.17) ekuazioan jaso bezala.

Hala ere, ekuazio hori erabiltzeko uhinak sakonera mugagabeen izango lukeen uhin-luzera zehaztu behar dugu. Uhin-luzera hori zehazteko, (3.16) adierazpenaren arabera, uhin-periodoa behar dugu. Datu hori ez da ezaguna zuzenean; bai, ordea, zeharka. Kontuan hartu behar da uhinak artifizialki sortuak direla modu jarraituan, orduko 1000 uhin. Beraz, horietako bakoitzaren artean iragaten den denbora periodoa dela joko dugu.

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2020-11-05), partzialaren 3. ariketa.

$$L_o = \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T^2 = \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{3600 \text{ s/h}}{1000 \text{ uhin/h}} \right)^2 = 20,2 \text{ m} \quad (3.16)$$

Hala, olatuak haustean izango duten altuera jakinik, ezagunak diren beste aldagaien menpe jar dezakegu malda, (3.18) adierazpenarekin.

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{H_b/L_o}} \quad (3.17)$$

$$m = \xi_b \cdot \sqrt{H_b/L_o} \quad (3.18)$$

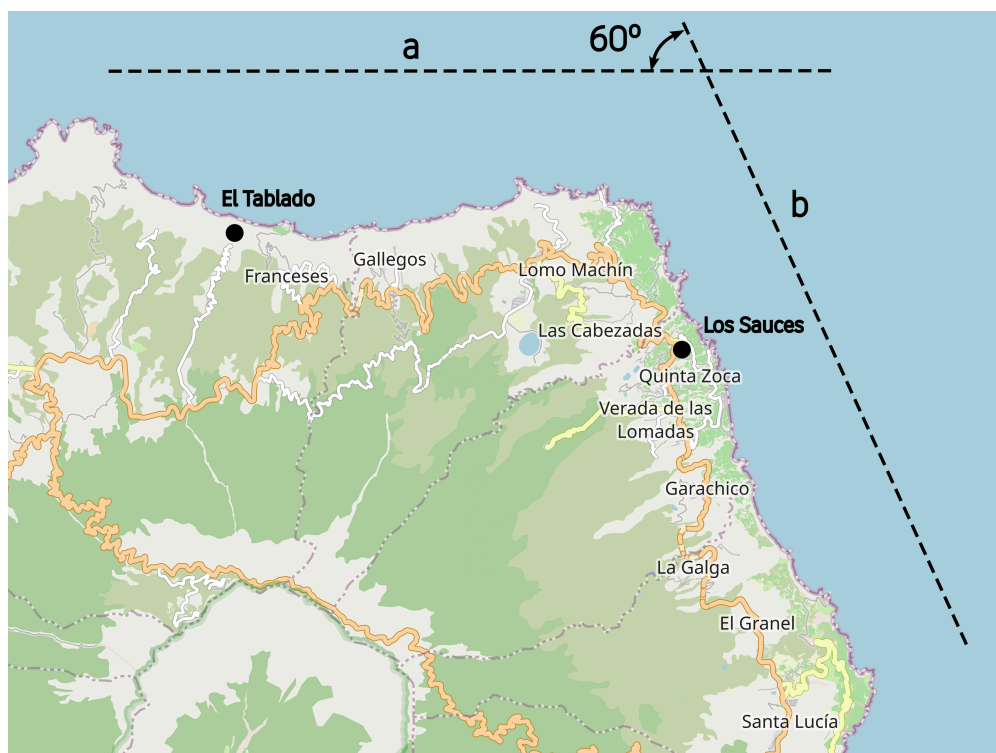
Edonola ere, surfaren antzekotasun-parametroarentzat ez dugu balio zehatzik, ezta olatuaren hauste-altuerarentzat ere, balio-tarteak baizik. Kontuan hartuta (3.17) adierazpenaren arabera ξ_b handitu egiten dela H_b txikitu ahala, malda handienak ξ_b maximoa emango digu. Beraz, (3.19) adierazpenak emango digu hondoak izan dezakeen maldarik handiena. Modu berean, (3.20) adierazpenak emango digu maldarik txikiena. Ondorioz, aipaturiko bi balioen artean egon beharko luke hondoaren maldak.

$$m_{max} = (\xi_b)_{max} \cdot \sqrt{\frac{(H_b)_{min}}{L_o}} = 2,0 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{20,2}} = 0,315 \quad (3.19)$$

$$m_{min} = (\xi_b)_{min} \cdot \sqrt{\frac{(H_b)_{min}}{L_o}} = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{2,0}{20,2}} = 0,126 \quad (3.20)$$

3.3. Haustura La Palma uhartean³

La Palma uhartetik iparraldera kokatuta dagoen 4008024 SIMAR puntuaren arabera, itsasoaren egoera sakonera mugagabeen honako hau da: $H_s=1,8\text{ m}$, $T=6\text{ s}$ eta $\theta=10^\circ$. La Palma uharteko bi herri ageri dira 3.2. irudian, El Tablado eta Los Sauces, baita horien kostalderoak ere (a eta b). Irudia iparralderantz begira dago.



3.2. irudia. La Palma uhartearen ipar-ekialdea (OSM, 2024).

Honako hau eskatzen da:

- Batimetria zuzena eta kostaldearekiko paraleloa izanik, bi herrietatik non egongo da itsasoa bareago 10 metroko sakoneran?
- Los Sauces-en olatuak *spilling* moduan hautsiko balira, zer malda izango du hondartza horrek, gehienez ere? Erabili 3.1. taulako datuak.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Sakonera mugagabeen $T=6\text{ s}$ duen uhinak 10 metroko sakoneran izango duen uhin-luzera (3.21) ekuaziotik L ebatziz

³Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2016/17 ikasturtea (2016-11-07), partzialaren 1. ariketa.

lor daiteke, horretarako hurbilketak eginez. Hala, sakonera eta uhin-luzera ezaguturik, sakonera erlatiboa finka daiteke (3.22) adierazpenarekin. Beraz, bitarteko uretan egongo dira uhin horiek.

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right) \quad (3.21)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 6^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{L}\right)$$

$$L = 56,20 \cdot \tanh\left(\frac{62,83}{L}\right) \Rightarrow L = 48,4 \text{ m}$$

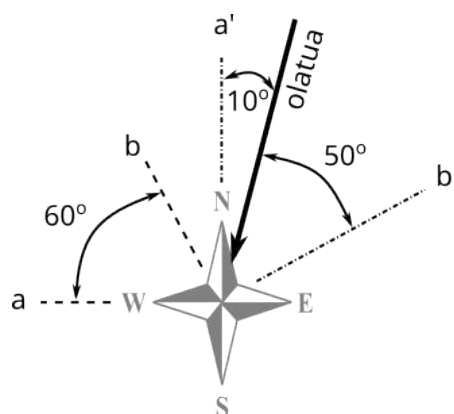
$$\Rightarrow \frac{d}{L} = \frac{10}{48,4} = 0,21 \Rightarrow \text{bitarteko urak} \quad (3.22)$$

Hala ere, sakonera mugagabeko olatuari *shoaling*ak eta errefrakzioak eragingo die kostaldera hurbildu ahala, altuera hori aldatuz, (3.28) eta (3.29) ekuazioetan ikus daitekeen modura. Lehenik, kalkula dezagun *shoaling*aren eragina, kontuan hartuta kalkulaturiko koefiziente hori berdina izango dela bi herrietan. Horretarako, (3.23) adierazpena erabiliko dugu *shoaling*-koefizientea kalkulatzeko, kontuan izanik $k = 2\pi/L = 2\pi/48,4 = 0,1298 \text{ rad/m}$ dela.

$$\begin{aligned} K_s &= \left(\tanh(k \cdot d) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \right)^{-1/2} \quad (3.23) \\ &= \left(\tanh(0,1298 \cdot 10) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,1298 \cdot 10}{\sinh(2 \cdot 0,1298 \cdot 10)} \right) \right)^{-1/2} = 0,914 \end{aligned}$$

Aldiz, errefrakzioaren eragina ezberdina izango da bi herrietan, sakonera mugagabean olatuek kostarekiko osatzen duten angelua ezberdina baita, 3.3. irudian ikus daitekeen modura.

Hala, kontuan hartzen bada sakonera mugagabeko uhin-luzera, $L_o = gT^2/2\pi = 9,81 \cdot 6^2/2\pi = 56,2 \text{ m}$, 10 metroko sakoneran olatuen noranzkoa kalkula daiteke (3.24) eta (3.26) ekuazioekin, Snell legea aplikatuta. Ondoren, errefrakzio-koefizienteak kalkula daitezke bi kasuetan, (3.25) eta (3.27) ekuazioekin.



3.3. irudia. Itsas egoerak sakonera mugagabeen dituen eraso-angeluen eskema bi kostekiko (a,b kosta-lerroekiko paraleloak dira, eta a',b' horiekiko elkarzutak).

$$\theta_{10m}^{tablado} = \arcsin \left(\frac{C}{C_o} \cdot \sin \theta_o^{tablado} \right) \quad (3.24)$$

$$= \arcsin \left(\frac{L}{L_o} \cdot \sin \theta_o^{tablado} \right)$$

$$= \arcsin \left(\frac{48.4}{56.2} \cdot \sin 10^\circ \right) = 8,6^\circ$$

$$\Rightarrow K_r^{tablado} = \sqrt{\frac{\cos \theta_o^{tablado}}{\cos \theta_{10m}^{tablado}}} = \sqrt{\frac{\cos 10^\circ}{\cos 8,6^\circ}} = 0,998 \quad (3.25)$$

$$\theta_{10m}^{sauces} = \arcsin \left(\frac{L}{L_o} \cdot \sin \theta_o^{sauces} \right)$$

$$= \arcsin \left(\frac{48.4}{56.2} \cdot \sin 50^\circ \right) = 41,3^\circ \quad (3.26)$$

$$\Rightarrow K_r^{sauces} = \sqrt{\frac{\cos \theta_o^{sauces}}{\cos \theta_{10m}^{sauces}}} = \sqrt{\frac{\cos 50^\circ}{\cos 41,3^\circ}} = 0,925 \quad (3.27)$$

Ondorioz, olatu-altuerak kalkula ditzakegu, (3.28) eta (3.29) ekuazioak erabiliz. Edonola ere, ez da beharrezkoa, nahikoa baita soilik K_r txikiena duen eremua

identifikatzea, beste aldagaiak berdinak direlako. Ikus daitekeen moduan, txikia-goia da olatu-altuera Los Sauces kostan.

$$H_{10m}^{tablado} = H_o \cdot K_s \cdot K_r^{tablado} = 1,8 \cdot 0,91 \cdot 0,998 = 1,63 \text{ m} \quad (3.28)$$

$$H_{10m}^{sauces} = H_o \cdot K_s \cdot K_r^{sauces} = 1,8 \cdot 0,91 \cdot 0,925 = 1,52 \text{ m} \quad (3.29)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Haustura mota surfaren antzekotasun-parametroak baldintzatua da (3.30). Gure kasuan, sakonera mugagabeko olatu-altuera eta uhin-luzera ezagunak dira, eta antzekotasun-parametroak bete behar duen baldintza, *spilling* motako haustura gauza dadin, $\xi_o \leq 0,5$ izatea da (3.30). Ondorioz, hondartzak izan behar duen gutxieneko malda (3.31) adierazpenean emandakoa da.

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \Rightarrow 0,5 \geq \frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \quad (3.30)$$

$$m \leq 0,5 \cdot \sqrt{\frac{H_o}{L_o}}$$

$$m \leq 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1,8}{56,2}} = 0,0895 \text{ m/m} = \%8,95 \quad (3.31)$$

4. Difrakzioa

Difrakzioa portu barruan edo eremu babestuetan olatu-altuera baldintzatzen duen fenomeno nagusia da, errefrakzio eta shoalinga baztertu egin daitezke eta sakonera konstanteko portuetan. Ondorioz, parametro garrantzitsua da portuetan sor daitezkeen gehieneko olatu-altuerak aztertzeke garaian. Kapitulu honetan dike mugagabe bakarrak sorturiko difrakzioa landuko da. Fenomenoa enpirikoki landu izan da, taula eta nomogramez baliatuz.

4.1. Difrakzioa bi puntutan¹

Batimetria kostaldearekiko zuzena eta paraleloa den eremu batean, 4.1. irudiko portua dago. Portuaren barruko sakonera konstantea da, 15 m. Demagun portuko dikeetara iristen diren olatuen periodoa 8 s dela.

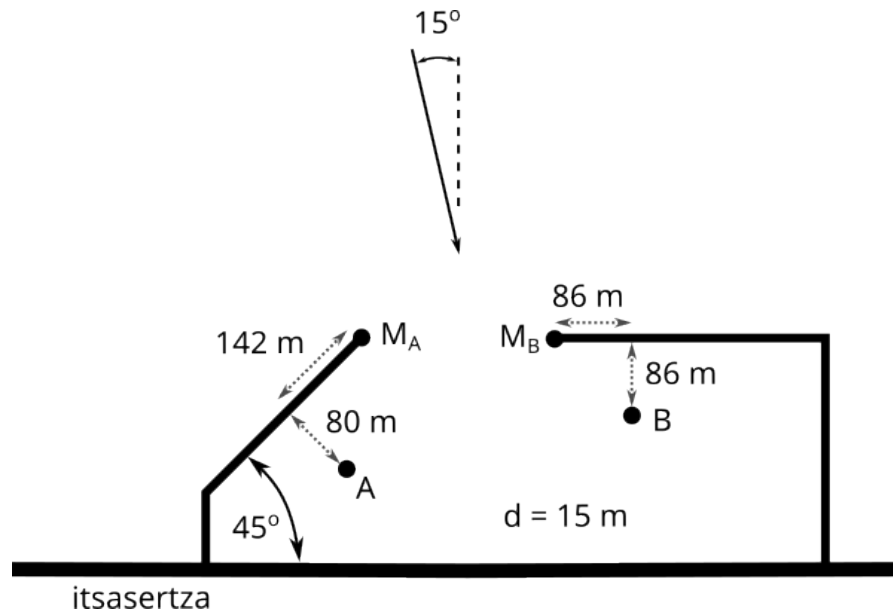
Honako hau eskatzen da:

- (a) Agitazioa non da txikiagoa, A edo B puntuan? Analisia egiteko dike biak independenteak direla joko da, hots, alde bakoitzera iristen diren olatuek beren aldameneko dikearen eragina soilik dutela.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Agitazio handiagoa non den zehazteko, portu barruko difrakzioa hartuko dugu kontuan. Hala, $H_i = K_d^i \cdot H_M$ adierazpenaren arabera, difrakzio-koefiziente txikiena duenak izango du agitaziorik txikiena edo olatu-altuera txikiena portu barruan.

Horretarako, lehenik dike-muturrean uhin-luzera zehaztu beharko dugu, difrakzioan eragina baitu. Hori egiteko, eraso-olatuaren uhin-luzera zehaztu beharko dugu sakonera mugagabea, (4.1) ekuazioaren arabera. Oraingoan, uhin-luzera zehazteko, eranskineko E.7 taula erabiliko dugu, eta (4.2) adierazpeneko balioa lortuko.

¹Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2015/16 ikasturtea (2015-10-26), partzialaren 1. ariketa.

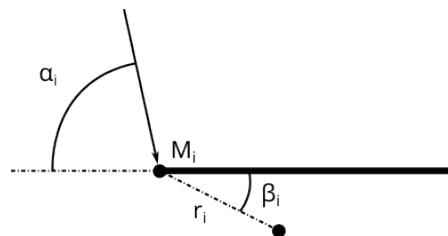


4.1. irudia. Portuaren eskema, A eta B puntuen kokapenarekin, eta olaturen noranzkoa portu-sarreran (M_i puntua).

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 8^2}{2 \cdot \pi} = 99,9 \text{ m} \quad (4.1)$$

$$\frac{d}{L_o} = \frac{15}{99,9} = 0,150 \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \frac{d}{L} = 0,1833 \Rightarrow L = 81,8 \text{ m} \quad (4.2)$$

Gainera, difrakzioaren eragina aztertzeko, dike-muturrean olatuek izango luketen eraso-angelua zehaztu beharko dugu. Eraso-angelu horri, α_i deituko diogu, 4.2. irudiko eskeman eman bezala. Eskemaren arabera, eraso-angelua 60° da A dikean, eta 75° B dikean.



4.2. irudia. Difrakzioaren kalkulurako aldagaien eskema.

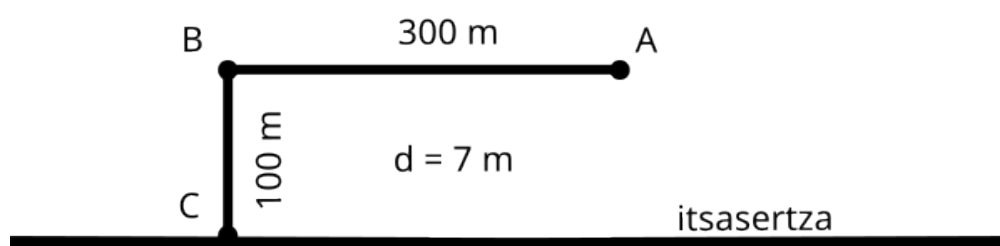
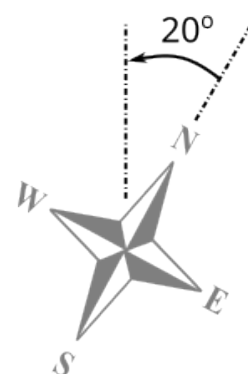
Behin eraso-angelua jakinik, portu barruko A eta B puntuei dagokien difrakzioa zehaztuko dugu, (4.3) eta (4.4) adierazpenetakoak. Horretan eragina duten aldagaiak dira lehen aipatu dugun dike kanpoko eraso-angelua (α_i), eta portu barruko posizioa ematen diguten distantzia (r_i) eta angelua (β_i). Horiakin zehaztu dezakegu difrakzio-koefizientea, eranskineko E.8 taula baliatuz. Ikus daitekeen moduan, difrakzioaren eragina handiagoa da A puntuan, eta, ondorioz, agitazioa txikiagoa B puntuan baino.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_A = 60^\circ \\ r_A = \sqrt{80^2 + 142^2} = 163,0 \text{ m} \implies \frac{r_A}{L} = \frac{163}{81,8} \approx 2 \\ \beta_A = \arctan(80/142) = 29,4^\circ \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.8}} K_{d,A} = 0,28 \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_B = 75^\circ \\ r_B = \sqrt{86^2 + 86^2} = 121,6 \text{ m} \implies \frac{r_B}{L} = \frac{121,6}{81,8} \approx 1,5 \\ \beta_B = \arctan(106/106) = 45^\circ \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.8}} K_{d,B} = 0,30 \quad (4.4)$$

4.2. Difrakzioa portuan²

Demagun irudiko portuaren agitazioa aztertzen ari garela, batimetria zuzena den eremu batean. Portuaren sakonera 7 metrokoa da, eta portuaren noranzkoa 20° dago mendebaldera begira iparraldearekiko. \overline{AB} tarteak 300 metro ditu, eta \overline{AC} tarteak 100 metro. Sakonera mugagabeen honako ezaugarri hauek dituen olatu baten eragina aztertu nahi da: olatu-altuera 6 metro, periodoa 15 segundo eta jatorria iparraldetik 30 gradura ekialderantz.



4.3. irudia. Portuaren eta eraso-olatuaren eskema.

Honako hau eskatzen da:

- Zehaztu B puntuan, portuaren babesean, izango genukeen olatu-altuera.
- Zer luzera izan beharko luke \overline{AB} tarteak, uhin-altuerak gainditu ez dezan $0,6$ metro C puntuan, portuaren babesean?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Olatua portu barruan nola barreiatuko den aztertu baino lehen, olatua nola barreiatzen den aztertu behar dugu sakonera

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2022/23 ikasturtea (2022-12-21), ohikoaren 3. ariketa.

mugagabetik A puntura. Hori argitzeko, bi aldagai nola aldatzen diren aztertuko dugu: olatu-altuera eta olatu-noranzkoa. Zehatzago, A puntuan uhin erasotzaileak izango dituen altuera eta noranzkoa zehaztu behar dira.

Altuera-aldaketa zehazteko, *shoaling*- eta errefrakzio-koefizienteak kalkulatu behar-ko ditugu (K_s eta K_r). Bi koefizienteak kalkulatu gabe ere, kalkula dezakegu zuzenean bien eragina batera kontuan hartzen duen *shoaling*-errefrakzio koefiziente (K_{rs}). Noranzkoaren aldaketa zehazteko, aldiz, Snell legea aplikatu beharko genuke.

Kasu honetan, bi aldagaien aldaketa zehazteko aukera ematen duten nomograma erabiliko dugu, eranskineko E.2 irudian jaso. Hala, nomogramak K_{rs} koefizientea eta θ_A emango dizkigu, eta karakterizatua geratuko da A puntuko olatua. Beraz, θ_o eta d/gT^2 koefizienteak nomograman sartu, eta aipaturiko θ_A zein $K_{rs,A}$ zehaztuko ditugu, (4.5) adierazpeneko balioak lortuz 4.4. irudiko eskemaren arabera.

$$\left. \begin{array}{l} \theta_o = 20^\circ + 30^\circ = 50^\circ \\ \frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{7}{9,81 \cdot 15^2} = 0,0032 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{nomograma}]{\text{E.2}} \left\{ \begin{array}{l} \theta_A = 15^\circ \\ K_{rs,A} = 1,0 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Beraz, olatu-altuera A puntuan, (4.6) adierazpenaren arabera zehaztuko dugu.

$$H_A = H_o \cdot K_{rs,A} = 6,0 \cdot 1,0 = 6,0 \text{ m} \quad (4.6)$$

Portu barruan olatu-barreiatzea aztertzeke, baina, olatuak portu-sarreran dituen ezaugarriak finkatu behar dira; besteak beste, olatuaren uhin-luzera. Beraz, (4.7) adierazpeneko dispersio-erlazioa baliatuz, portu-sarrerako uhin-luzera zehaztuko dugu, (4.8) adierazpenean jaso. Gogoratu (4.7) ekuazioa ebazteko 1.1. ariketan esandakoa. Gogoratu, baita ere, uhin-luzerari ere λ deitu ohi zaiola, eta horrela agertzen dela difrakzioaren taula eta nomograma ugaritan.

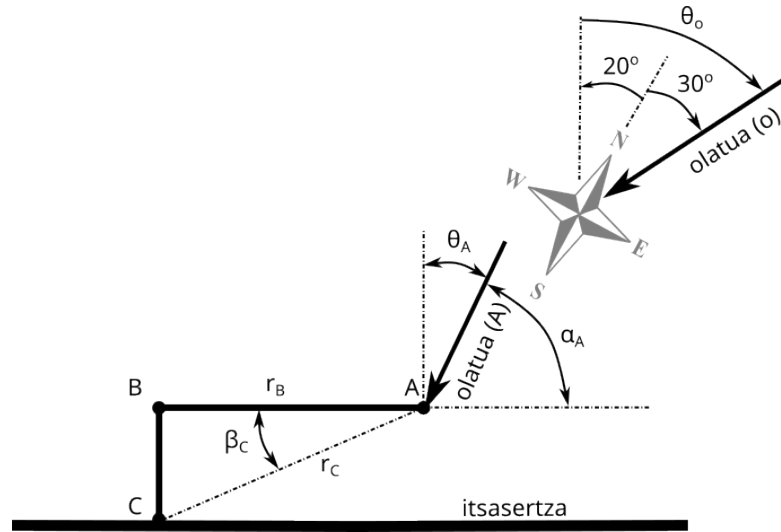
$$L_A = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_A}{L_A} \right) \quad (4.7)$$

$$L_A = \frac{9,81 \cdot 15^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 7}{L_A} \right)$$

$$L_A = 351,3 \cdot \tanh \left(\frac{44,0}{L_A} \right) \Rightarrow L_A = 121,7 \text{ m} \equiv \lambda_A \quad (4.8)$$

Beraz, portu-sarreran diseinu-olatuak dituen altuera, noranzkoa eta uhin-luzera jakinik, difrakzioa kontuan hartuta zehaztu dezakegu nola barreiatuko den uhina portu barruan. Hala, olatuak B puntuan izango duen altuera finkatzeko, A eta B puntuen arteko difrakzio-koefizientea zehaztuko dugu.

Horretarako behar ditugun datuak honako hauek dira (ikus 4.4. irudia): (a) uhinak eta dike-luzapenak osatzen duten angelua, α_A , (b) B puntuak dikearekiko duen angelua, β , eta (c) dike-muturretik B puntura dagoen distantziaren eta uhin-luzeraren arteko koefizientea, r/λ .



4.4. irudia. Kalkulurako aldagaien eskema.

Beraz, aldagai horiekin E.8 eranskineko difrakzioaren balio taularatuetara jo daiteke, eta A eta B puntuen arteko difrakzio-koefizientea edo K_d zehazteko, (4.9) adierazpenean ageri den moduan.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_A = 75^\circ \\ \beta_B = 0^\circ \\ \frac{r_B}{\lambda_A} = \frac{300}{121,7} = 2,5 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.8}} K_{d,B} = 0,178 \quad (4.9)$$

Ondorioz, badakigu zenbat aldatuko den olatuaren altuera dike-muturretik (A puntua) portu barruko B puntura, (4.10) adierazpenaren arabera.

$$H_B = H_A \cdot K_{d,B} = 6,0 \cdot 0,178 = 1,07 \text{ m} \quad (4.10)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Dike-muturreko uhin-ezaugarriak finkoak direnean, portu barruko puntu baten olatu-altuera puntu horretatik A dike-muturrera dagoen distantziaren (r_C) eta puntu horrek \overline{AB} dikearekiko osatzen duen angeluaren arabera (β_C) aldatuko da. Oraingoan, baina, aurreko atalean ez bezala, ezagunak dira olatuaren ezaugarriak C puntuan; badakigu, beraz, zein den difrakzio-koefizientea. Ondorioz, atzeranzko analisisa egingo dugu, eta koefiziente jakina emango digun r_C/λ_A erlazioa zehaztu beharko dugu. Horretarako, balio taularatuak erabiliko ditugu (4.11) adierazpenean jaso den moduan.

Edonola ere, r/λ aukera bat baino gehiago ematen du eranskinetako E.8 taulak; hiru, hain zuzen ere, guztiak $5 < r/\lambda < 10$ eta $0^\circ < \beta < 30^\circ$ tartetarako. Kontuan hartuz gero r egungoa baino handiagoa izango dela balio horiekin, β_C egungoa baino txikiagoa izan beharko da, hau da, $\beta_C \leq \arctan(100/300) = 18,5^\circ$. Angelua 0° eta 15° artean dagoenean r/λ erlazioa aldatzen ez denez, balio hori aukeratuko dugu, (4.11) adierazpenekoa, eta ondoren angeluak baldintza betetzen duela egiaztatuko.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_A = 75^\circ \\ K_{d,C} = \frac{H_C}{H_A} = \frac{0,6}{6,0} = 0,1 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{E.8} \frac{r_C}{\lambda_A} \approx 7 \quad (4.11)$$

Hala, r eta λ aldagaien erlazioa ezaguturik, r_C distantzia kalkula daiteke, (4.12) adierazpenean jaso bezala. Luzera horrekin, angelua posible den horien tartean dagoela frogatuko dugu, (4.13) adierazpenean jaso bezala. Ikus daitekeenez, bateagarriak dira lorturiko r/λ eta β erlazioak.

$$\frac{r_C}{\lambda_A} \approx 7 \quad \Rightarrow \quad r_C = 7 \cdot \lambda_A = 7 \cdot 124,7 = 872,9 \text{ m} \quad (4.12)$$

$$\sin \beta_C = \frac{\overline{BC}}{r_C} = \frac{100}{872,9} = 0,1146 \quad \Rightarrow \quad \beta_C = 6,6^\circ \quad (4.13)$$

Aurrerago kalkulatu dugun distantzia A eta C puntuen artekoa da; guk \overline{AB} tarteara kalkulatu behar dugu. Horretarako, (4.14) adierazpenak baliatu eta \overline{AB} tartearen gutxieneko luzera zehaztuko dugu.

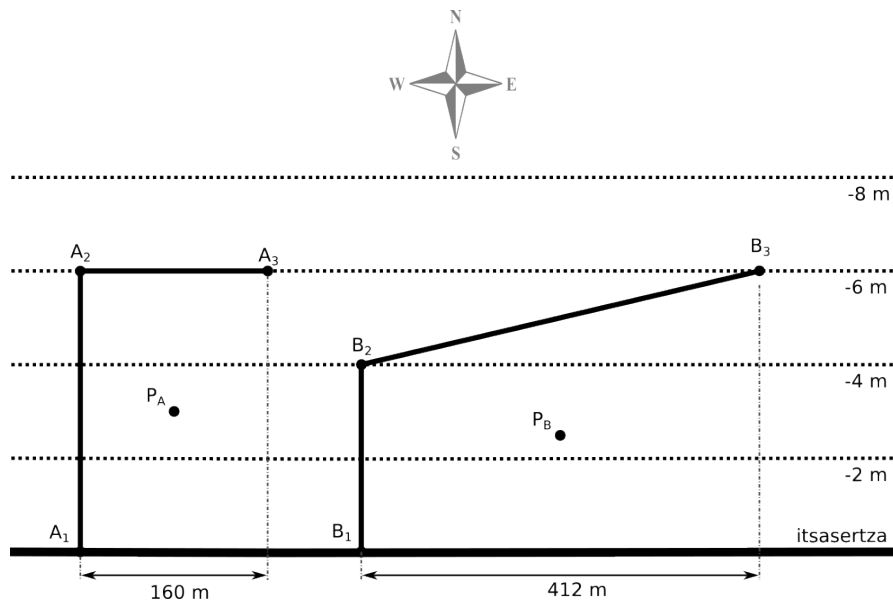
$$\cos \beta_C = \frac{\overline{AB}}{r_C} \quad \Rightarrow \quad \overline{AB} = r_C \cdot \cos \theta = 872,9 \cdot \cos 6,6^\circ = 867,1 \text{ m} \quad (4.14)$$

Dikea aipaturiko distantzia baino laburragoa balitz, olatu-altuera eskatzen zaigun 0,6 balioa baino handiagoa litzateke diseinuko olatuak eragitean. Aldiz, AB handiagoa balitz, ez legoke arazorik, olatu-altuera eskatzen zaiguna baino txikiagoa litzateke-eta difrakzioaren ondorioz.

4.3. Portuaren aukerak³

Kosta-lerroa iparralderantz begira dagoen eremuan portu bat eraiki nahi da eta, horretarako, dike bat aurreikusi da hura babesteko. Dikearen aurre-diseinuan bi aukera aztertuko dira (ikus 4.5. irudia): A (ezkerrean) eta B (eskuinean). A zein B aukerak bi tarte dituzte: $\overline{A_1A_2}$ eta $\overline{A_2A_3}$ lehenak eta $\overline{B_1B_2}$ eta $\overline{B_2B_3}$ bigarrenak. Bi aukeren lehen tarteak kostarekiko elkarzuta da; bigarren tartearen proiektzioa ezaguna da kosta-lerroan: 160 m batean eta 412 m bestean.

Dikea eraiki nahi den eremuan batimetria kostarekiko paraleloa da, eta malda uniformekoa; $\overline{A_1A_2}$ dikearen luzera 240 m da; batimetria-lerroak eta horien sakonera irudian jasotakoak dira. Aukera biak dikea kosta-lerrotik hasi eta 6 metroko sakoneraraino aurreikusi dira. Hala, dikeak babesturiko eremua dragatuz, 6 metroko sakoneran egongo lirarteke portuen barnealdeak.



4.5. irudia. Bi portuen eskema, A aukera ezkerrean eta B aukera eskuinean.

Honako hau eskatzen da:

- Zehaztu, olatu-altueraren ikuspuntutik, zein izango litzatekeen egokiena bi aukeretatik, baldin eta diseinu-olatuaren ezaugarriak, sakonera mugagabea, honako hauek badira: 6 metroko altuera, 10 segundoko periodoa eta NW noranzkoa. Bi aukerak aztertzeko P_i puntuetan aztertuko da olatu-altuera. Puntu horiek $\overline{X_1X_2}$ zein $\overline{X_2X_3}$ dikeen erdi-erdian kokaturik daude.

³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2020-11-05), partzialaren 1. ariketa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuan eskatzen zaiguna da sakonera mugagabea ezaugarri jakinak dituen olatu batek nolako ezaugarriak izango dituen portu barruko puntu batean, baldin eta portuaren diseinua aldatzen bada. Portuaren diseinua ezberdina izanik ere, dike-muturra sakonera berean dago bi aukeretan. Ondorioz, sakonera mugagabeko olatuak ezaugarri bera izango du dike-muturrean, A zein B aukeran. Hori izango da beraz eman beharreko lehen pausoa: olatuak A_1 edo B_1 puntuan izango dituen noranzkoa (θ) eta altuera (H) zehaztea.

Olatu-altuera eta noranzkoa zehazteko, *shoaling*-errefrakzioaren nomograma baliatuko dugu, eranskineko E.2 irudian emana. Beraz, $\theta_o = 45^\circ$ eta d/gT^2 aldagaiekin dike-muturreko angelua eta *shoaling*-errefrakzioaren koefizientea zehaztu daitezke, (4.15) adierazpenean jaso bezala.

$$\left. \begin{array}{l} \theta_o = 45^\circ \\ \frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{6}{9,81 \cdot 10^2} = 0,00612 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{nomograma}]{E.2} \left\{ \begin{array}{l} \theta = 17^\circ \\ K_{rs} = 0,96 \end{array} \right. \quad (4.15)$$

Edonola ere, dike barruan difrakzioak olatu-altuerari nola eragingo dion zehazteko baliatuko dugun angelua ez da θ , baizik eta uhinaren eraso-lerroak dike-luzapenarekin eratzen duen angelua, α deitu duguna, 4.6. irudiak jaso bezala. Beraz, angelu horiek ezberdinak izango dira kasu bakoitzean, (4.16) eta (4.17) adierazpenek erakusten duten moduan. Malda uniformearen denez, badakigu $\overline{B_2B_3}$ tartearen proiektzioa kostaren elkarzutarekiko $240 \text{ m}/83 = 80 \text{ m}$ dela.

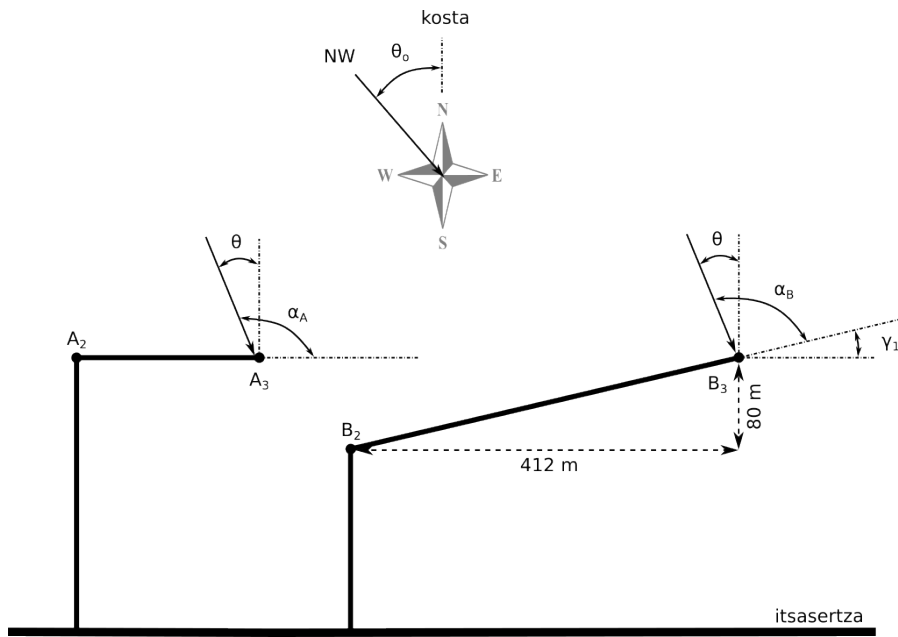
$$\alpha_A = \theta + 90^\circ = 17^\circ + 90^\circ = 107^\circ \quad (4.16)$$

$$\alpha_B + \gamma_1 = \theta + 90^\circ \quad (4.17)$$

$$\alpha_B = \theta + 90^\circ - \gamma_1$$

$$\alpha_B = \theta + 90^\circ - \arctan\left(\frac{80}{412}\right) = 17^\circ + 90^\circ - 11^\circ = 96^\circ$$

Difrakzioa kalkulatzeko, hala ere, dike-muturrean uhin-luzera zehaztu behar da. Dispersio-erlazioa ebatziz, (4.18) adierazpenean jaso, uhin-luzera hori zehaztuko dugu (4.19).



4.6. irudia. Eraso-uhinaren noranzkoa sakonera mugagabea eta dike-muturrean, A eta B aukeretan.

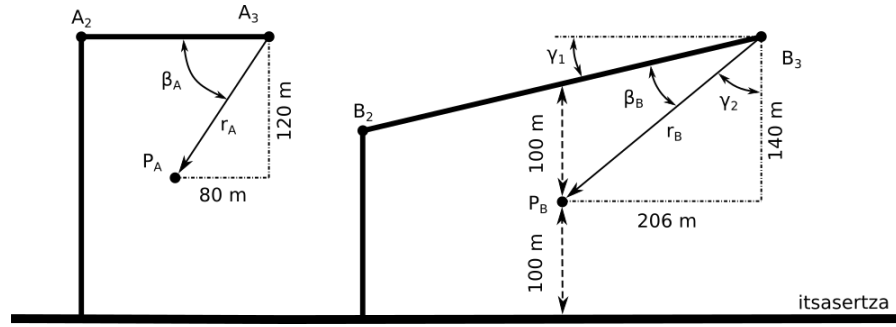
$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (4.18)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 6}{L}\right)$$

$$L = 156,1 \cdot \tanh\left(\frac{37,7}{L}\right) \Rightarrow L = 73,6 \text{ m} \equiv \lambda_{A3} \equiv \lambda_{B93} \quad (4.19)$$

Oraindik, difrakzioaren eragina zehazteko, portuaren babesean aztertu nahi dugun puntua nola dagoen kokatua finkatu behar dugu. Horretarako, dike-muturretik zer distantziatara dagoen eta harkiko zein angelu osatzen duen zehaztuko ditugu, hots, r eta β hurrenez hurren. Aldagai horien eskema 4.7. irudian jaso da, eta horien kalkulua (4.20) eta (4.21) adierazpenetan zehaztu da, A aukerarako lehenengoan eta B aukerarako bigarrenengan. Kalkulurako, eranskineko E.8 taula erabili da.

Kontuan hartu P_1 eta P_2 puntuen kokapena aldatu egiten dela portuaren diseinuaren arabera, eta, ondorioz, aldagai horiek ere aldatu egiten direla.



4.7. irudia. Portu barruko difrakzio-aldagaiak, β eta r , A eta B aukeretan.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_A &= 107^\circ \\ \beta_A &= \arctan\left(\frac{120}{80}\right) = 56,3^\circ \\ \frac{r_{P1}}{L} &= \frac{\sqrt{80^2 + 120^2}}{73,6} = 1,96 \approx 2 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{E.8} \\ \text{taula} \end{array} \quad K_{d,A} = 0,19 \quad (4.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_B &= 96^\circ \\ \beta_B &= 90^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 = 90^\circ - 11^\circ - 55,8^\circ = 19,2^\circ \\ \frac{r_B}{L} &= \frac{\sqrt{140^2 + 206^2}}{73,6} = 3,4 \end{aligned} \right\} K_{d,B} = 0,13 \quad (4.21)$$

Horrenbestez, aukera bakoitzean olatu-altuera nola aldatzen den zehaztu daiteke, (4.22) eta (4.23) adierazpenetan jaso bezala. Noski, difrakzioa da eragina duen aldagai bakarra, dike-muturrean ezaugarriak berdinak baitziren. Beraz, B aukera egokiagoa litzateke, olatu-altuera txikiagoa eragiten baitu aztertutako puntuan. Ikus daitekeen moduan, aukeratzen den portuaren konfigurazioak eragina du portu barruko ontziengan eragiten duen uhinen ezaugarrietan.

$$H_{P1} = K_{rs} \cdot H_0 \cdot K_d^A = 0,96 \cdot 6 \cdot 0,19 = 1,09 \text{ m} \quad (4.22)$$

$$H_{P2} = K_{rs} \cdot H_0 \cdot K_d^B = 0,96 \cdot 6 \cdot 0,13 = 0,75 \text{ m} \quad (4.23)$$

5. Itsas klima

Kapitulu honetan, aurrekoetan erabili ditugun oinarriak erabiltzen jarraituko dugun arren, itsas lanen diseinuan oinarrizkoak diren olatuen ezaugarriak zehazten ipiniko dugu arreta. Batetik, haizearen eta olatuen arteko erlazioan oinarrituriko metodo parametrikokoak erabiliko ditugu, metodo horiek erabilgarriak izan daitezke-eta datu-urritasuna dagoen kasuetan edo proiektuaren izaerak ez duenean justifikatzen analisi konplexuagorik. Uhin-espektroaren deskonposatzea aztertzen duten metodoak ere aplikatuko ditugu; jada definituak dauden espektro zehatzekin lan egingo dugu. Itsas klima aztertzean, epe motzeko analisiaren eta epe luzekoaren artean dagoen aldea ere azpimarratuko dugu; besteak beste, informazio estatistikoa laburbiltzen duten banaketa-funtzioak landuko ditugu, batez besteko zein muturreko egoerei lotuak daudenak.

5.1. La Palma parametro-eredua hausturarekin¹

La Palma uhartetik iparraldera kokatuta dagoen 4008024 SIMAR puntuaren araber, itsasoaren egoera sakonera mugagabeen honako hau da: $H_s=1,8$ m, $T=6$ s eta $\theta=10^\circ$.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu fetcharen luzera SPM metodoa erabiliz, baldin eta haizearen abiadura 10 m/s bada eta 24 orduz jotzen badu sortze-eremuan.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Neurturiko olatuak guztiz garatuak balira haizeak olatu horiek sortzeko behar adina denboran jo duela eta nahikoa distantzian eragin diela esan nahi du. Hori hala izan dadin, gutxieneko distantzia eta

¹Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2016/17 ikasturtea (2016-11-07), partzialaren 1. ariketa.

denbora horiek (5.1) eta (5.3) adierazpenek emandakoak liriateke.

$$\frac{g \cdot X^{full}}{U_{10}^2} = 23123 \quad \Rightarrow \quad X^{full} = \frac{23123 \cdot U_{10}^2}{g} \quad (5.1)$$

$$= \frac{23123 \cdot 10^2}{9,81} = 235\,708 \text{ m} = 235,7 \text{ km} \quad (5.2)$$

$$\frac{g \cdot t^{full}}{U_{10}} = 55841 \quad \Rightarrow \quad t^{full} = \frac{55841 \cdot U_{10}}{g} \quad (5.3)$$

$$= \frac{55841 \cdot 10}{9,81} = 56\,923 \text{ s} = 15,8 \text{ h} \quad (5.4)$$

Hala ere, baliteke haizearen iraupena eta fetcha olatuak guztiz garatzeko behar diren horiek baino txikiagoak izatea; hau da, (5.2) eta (5.4) adierazpenetan lortuak baina txikiagoak. Iraupenari dagokionez, baiezta dezakegu benetako iraupena, enuntziatuak emana, gutxieneko iraupena baino handiagoa dela; ondorioz, sorturiko olatuak ez ditu haizearen iraupenak mugatzen. Distantzia edo fetchari dagokionez, fetchak mugatuak direla suposatuko dugu, eta olatu-altuera hori sortuko lukeen fetcha zehaztuko dugu (5.5) adierazpena baliatuz. Gogoan izan sakonera mugagabeen $H_{mo} \approx H_s$ dela.

$$\frac{g \cdot H_{mo}}{U_{10}^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{g \cdot X}{U_{10}^2} \right)^{0,5} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow X &= \left(\frac{g^{0,5} \cdot H_{mo}}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot U_{10}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{9,81^{0,5} \cdot 1,8}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10} \right)^2 = 124\,157 \text{ m} = 124,2 \text{ km} \end{aligned} \quad (5.6)$$

(5.2) eta (5.6) adierazpenekin lorturiko balioak alderatuz ondoriozta dezakegu neurturiko olatuak fetchak mugatuak direla, guztiz garatzeko fetcharen balioa handiagoa baita olatu horiek sortzen dituen fetcha baino. Ondorioz, (5.6) ekuazioak emandakoa izango da olatu horiek sortu dituen fetcha.

5.2. Villán-Sisargas buiako ekaitza²

Komunikabide ugari aipatu zuten inoizko olaturik handienak erregistratu zituela Estatuko Portuak kudeatzen dituen ur sakoneko buien sareak 2014ko udazkenean. Olaturik handiena Galiziako kostan neurtu zen, Villán lurmuturrean dagoen Villán-Sisargas deituriko buian. Komunikabideetan jasotako datuen arabera, buia horretan neurturiko banakako olatu handienak 27,81 m zituen, eta 2014ko urtarriaren 6an neurtu zen. Buia berari dagokion olatu-altuera adierazgarriaren altuera 12,4 m izan zen.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu ekaitzaren iraupena, kontuan izanik $T_p = 20$ s dela eta puntako periodoaren balioa batezbestekoa baino 1,25 handiagoa dela.
- (b) Zer-nolako olatu-altuera behatuko luke itsasora ohituta ez dagoen behatzaile batek?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Ekaitz baten analisia egiten ari garenez, epe laburreko analisia aplikatu diezaiokegu ekaitzari. Ekaitzaren iraupena zehazteko (5.11) adierazpena erabil dezakegu. Horretarako, lehenik, ekaitzaren olatukopurua zehaztu beharko genuke.

Hori egiteko, olatu-altuera maximoa eta altuera adierazgarria erlazionatzen dituzten balioak erabil ditzakegu, eranskinetako E.10 taula baliatuz eta egunkariko datuek altuera maximoa eta adierazgarriak ematen dituztela kontuan hartuz. Azken hori (5.7) adierazpenekoa da Villán-Sisargas buiaren kasuan. Balio hori eranskinetako taulatik kanpo dago, 2,211 baita handiena, (5.8) adierazpenekoa. Beraz, balioen arteko erlazioa lineala dela joko dugu, eta estrapolatu egingo dugu taulako aurreko balioa erabiliz, (5.9) ekuazioan jasota bezala. Hala (5.10) adierazpeneko erlazioa lortuko genuke, eta han jasotako balioa; hori litzateke ekaitzari dagokion olatukopurua.

²Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2014/15 ikasturtea (2014-11-10), partzialaren 2. ariketa.

$$\frac{\overline{H}_{max,N}}{H_s} = \frac{27,81}{12,40} = 2,243 \quad (\text{datua}) \quad (5.7)$$

$$\frac{\overline{H}_{max,10\,000}}{H_s} = 2,211 \quad (\text{E.10 taula}) \quad (5.8)$$

$$\frac{\overline{H}_{max,5000}}{H_s} = 2,131 \quad (\text{E.10 taula}) \quad (5.9)$$

$$\Rightarrow N = 10\,000 + \frac{10\,000 - 5000}{2,211 - 2,131} \cdot (2,243 - 2,211) = 12\,000 \text{ olatu} \quad (5.10)$$

Olatu kopurua jakinik, zehaztu dezakegu ekaitzaren iraupena. Horretarako, kontuan hartuko dugu puntako eta batez besteko periodoen arteko erlazioa. Hala, (5.12) adierazpenarekin, ekaitzaren iraupena zehaztuko genuke.

$$Iraupena = N \cdot T_m \quad (5.11)$$

$$Iraupena = N \cdot \frac{T_p}{1,25} = 12\,000 \cdot \frac{20}{1,25} = 192\,000 \text{ s} = 53,3 \text{ h} \quad (5.12)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Behatzaile ez-aditu batek neurtuko lukeen olatu-altuera $H_{1/10}$ dela esan ohi da; bada, hori kalkulatu dugu. Lehen aipatu bezala, ekaitz bati dagozkion Rayleigh banaketa-funtziotik eratorritako erlazioak aplika ditzakegu $H_{1/10}$ kalkulatzeko, eranskineko E.9 taulan jasoak. Hala, (5.13) eta (5.14) adierazpenak baliatuz lor daiteke (5.15) ekuazioa, bilatzen ari garen olatu-altuera emango diguna.

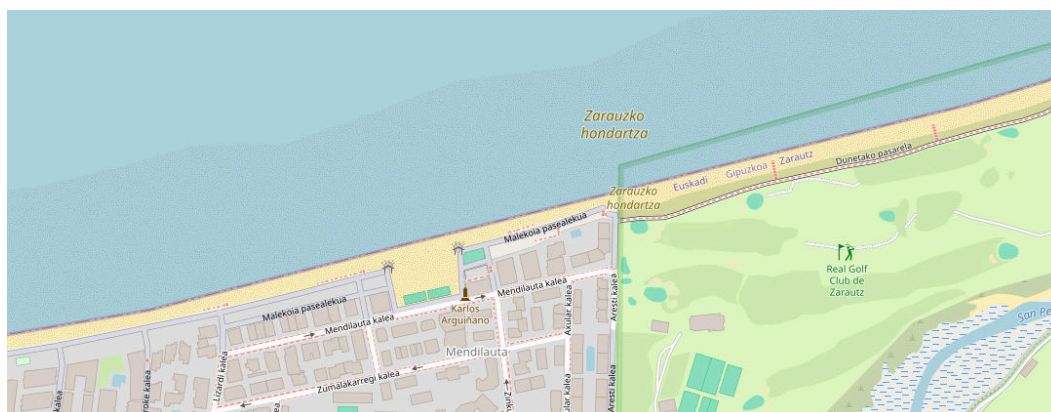
$$H_{1/3} = H_s = 1,416 \cdot H_{rms} \quad (5.13)$$

$$H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} \quad (5.14)$$

$$\Rightarrow H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} = 1,8 \cdot \frac{H_s}{1,416} = 1,8 \cdot \frac{12,4}{1,416} = 15,76 \text{ m} \quad (5.15)$$

5.3. Zarautzen parametro-eredua eta haustura ³

Zarauzko hondartza euskal kostaldeko luzeenetakoa da. Hondartza pareko batimetriak kosta-lerroarekiko paraleloa da eta haren inklinazioa 15° da NW noranzkoan (ikus 5.1. irudia). Hondartzaren malda $\%3$ da.



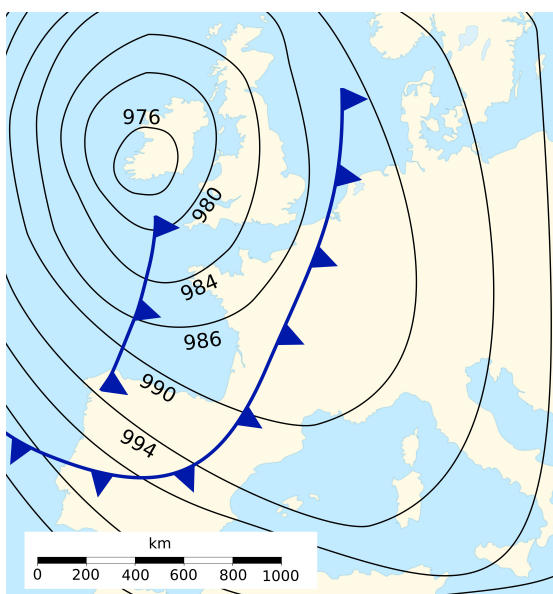
5.1. irudia. Zarauzko hondartza (OSM, 2024).

Demagun hondartza pareko olatuen haustura Weggel irizpidearen arabera aztertzen dela, eta honako ezaugarri hauek dituztela hauste-puntuan: $T_b=7$ s, $H_b=3,35$ m, eta $\theta_b = 5^\circ$.

Honako hau eskatzen da:

- Zehaztu olatu horren ezaugarriak sakonera mugagabeen: H_o , T_o , θ_o , L_o , C_o , Cg_o .
- Demagun hautsi diren olatuak sortu dituen sortze-eremuaren fetch-luzera 450 km dela, eta 20 orduz jo zuela haizeak bertan. Zein litzateke olatuak sortu duen haizearen batez besteko abiadura SPM irizpidearen arabera?
- Demagun olatuak sortu dituen depresioa 5.2. irudikoa dela; 50° da haren latitudea. Sortze-erradioa 500 km baldin bazen eta fetcharen zabalera 200 km, zer-nolakoa zen isobaren arteko presio-diferentzia? Egiaztatu irudikoarekin bat ote datorren. Honako baldintza hauetan egingo dugu analisia: $U_{10} = 0,6796 \cdot U_g$ dela joko dugu, airearen tenperatura itsasoarena baino $12^\circ C$ altuagoa dela, eta airearen dentsitatea $\rho_{airea} = 1,225$ kg/m³.

³Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2018-11-05), partzialaren 1. ariketa.



5.2. irudia. Olatuak sortu zituen egoeraren isobara-mapa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Teoria linealari dagozkion (5.16) eta (5.19) arteko ekuazioak aplika ditzakegu olatuaren ezaugarri batzuk sakonera mugagabean zehazteko.

$$T_o = T_b = T = 7 \text{ s} \quad (5.16)$$

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 7^2}{2 \cdot \pi} = 76,50 \text{ m} \quad (5.17)$$

$$C_o = \frac{L_o}{T} = \frac{76,50}{7} = 10,93 \text{ m/s} \quad (5.18)$$

$$Cg_o = \frac{C_o}{2} = \frac{10,93}{2} = 5,46 \text{ m/s} \quad (5.19)$$

Aldiz, errefrakzioa kontuan hartu beharko da sakonera mugagabean zehazteko olatuaren altuera eta eraso-angelua. Horretarako, olatua zein sakoneratan hausten den zehaztu beharko genuke lehenik, sakonera horretan eraso-angelua eta olatu-altuera ezagunak direla baliatuz. Weggel irizpidea erabiliko dugu, (5.20) adierazpenean jaso. Ekuazio horretan a eta b aldagaiak zehaztu daitezke, malda %3 dela jakinik. Balio horiek (5.21) eta (5.22) adierazpenetan zehaztu dira. Beraz, olatu hori hausten den sakonera (5.23) ekuazioan jasotakoa litzateke.

$$\frac{H_b}{d_b} = b - a \cdot \frac{H_b}{g \cdot T^2} \quad (5.20)$$

$$a = 43,8 \cdot (1 - e^{-19 \cdot m}) = 43,8 \cdot (1 - e^{-19 \cdot 0,03}) = 19,03 \quad (5.21)$$

$$b = \frac{1,56}{1 + e^{-19,5 \cdot m}} = \frac{1,56}{1 + e^{-19,5 \cdot 0,03}} = 1,00 \quad (5.22)$$

$$\Rightarrow d_b = \frac{H_b}{b - a \cdot \frac{H_b}{g \cdot T^2}} = \frac{3,35}{1,00 - 19,03 \cdot \frac{3,35}{9,81 \cdot 7^2}} = 3,86 \text{ m} \quad (5.23)$$

Sakonera mugagabeko olatu-altuera zehazteko, Snell legea balia daiteke, (5.25), baina horretarako uhin-luzera behar da haustura-puntuan, (5.24) ekuazioarekin kalkula daitekeena, hurbilketak eginez edo horretarako sortuak diren taulak erabiliz.

$$L = L_o \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot d \cdot \pi}{L}\right) \quad (5.24)$$

$$L = 76,50 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot 3,86 \cdot \pi}{L}\right) \quad \Rightarrow \quad L = L_b = 40,79 \text{ m}$$

Hala, Snell legea baliatuz (5.25) adierazpenaren arabera, olatuaren eraso-angelua zehaztu daiteke sakonera mugagabeen; (5.27) adierazpenean dago jaso.

$$\frac{C_o}{\sin \theta_o} = \frac{C_b}{\sin \theta_b} \quad (5.25)$$

$$\Rightarrow \sin \theta_o = \frac{C_o}{C_b} \cdot \sin \theta_b = \frac{L_o}{L_b} \cdot \sin \theta_b \quad (5.26)$$

$$\sin \theta_o = \frac{76,50}{40,79} \cdot \sin 5 = 0,1636 \quad \Rightarrow \quad \theta_o = 9,41^\circ \quad (5.27)$$

Orain bai, kalkula daitezke sakonera mugagabeko altuera emango diguten errefrakzio-eta *shoaling*-koefizienteak. Zehaztu dezagun, lehenik, errefrakzioaren eragina (5.28) adierazpenarekin.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta}} = \sqrt{\frac{\cos 9,41}{\cos 5}} = 1,00 \quad (5.28)$$

Zehaztu dezagun, orain, *shoaling*aren eragina (5.29) adierazpenarekin, kontuan hartuta $k = 2\pi/L = 2\pi/40,79 = 0,1540$ dela:

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(k \cdot d) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)}\right)}} \quad (5.29)$$

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(0,1540 \cdot 3,86) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,1540 \cdot 3,86}{\sinh(2 \cdot 0,1540 \cdot 3,86)}\right)}} = 1,02$$

Ondorioz, olatuak sakonera mugagabeen izango duen altuera (5.30) adierazpenak emandakoa izango da.

$$H = H_o \cdot K_r \cdot K_s \quad \Rightarrow \quad H_o = \frac{H}{K_r \cdot K_s} = \frac{3,35 \text{ m}}{1,00 \cdot 1,02} = 3,28 \text{ m} \quad (5.30)$$

ARIKETAREN EBAZPEN A (b). Egiaztatu beharko dugun lehen gauza da ea olatuak guztiz garatuak diren ala ez. Guztiz garatuak direla joko bagenu, aurreko atalean kalkulatoriko olatu-altuera eragiten duen batez besteko haize-abiadura (5.31) ekuazioak emandakoa litzateke.

$$\frac{g \cdot H_{mo}^{full}}{U_{10}^2} = 0,2433 \quad \Rightarrow \quad U_{10} = \sqrt{\frac{g \cdot H_{mo}^{full}}{0,2433}} \quad (5.31)$$

$$= \sqrt{\frac{9,81 \cdot 3,28}{0,2433}} = 11,50 \text{ m/s} \quad (5.32)$$

Hipotesi hori egiaztatu egin beharko dugu. Olatuak guztiz garatuak izateko, gutxieneko baldintzak (5.33) eta (5.34) ekuazioekin zehaztuko ditugu. Olatuak sorrarazi dituzten baldintzak azken horiek baino zorrotzagoak direnez, hau da, $X^{full} \leq 450 \text{ km}$ eta $t^{full} \leq 20 \text{ h}$, olatuak guztiz garatuak izango dira, eta (5.32) ekuazioak emandako abiadura izango litzateke olatu horiek sortu dituen.

$$\frac{g \cdot X^{full}}{U_{10}^2} = 23123 \quad \Rightarrow \quad X^{full} = \frac{23123 \cdot U_{10}^2}{g} \quad (5.33)$$

$$= \frac{23123 \cdot 11,50^2}{9,81} = 311\,724 \text{ m} = 311,72 \text{ km}$$

$$\frac{g \cdot t^{full}}{U_{10}} = 55841 \quad \Rightarrow \quad t^{full} = \frac{55841 \cdot U_{10}}{g} \quad (5.34)$$

$$= \frac{55841 \cdot 11,50}{9,81} = 65\,461 \text{ s} = 18,18 \text{ h}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Aipaturiko eremuan presio-diferentzia zentratekoa zen jakiteko, (5.40) adierazpenean oinarrituko gara. Adierazpen horrek esaten digu depresio edo zikloi batean nolakoa den presio-gradientea. Presio-gradientea zehazteko behar ditugun aldagaiak hauek dira: airearen dentsitatea (5.35), haize geostrofikoaren abiadura (5.36), sortze-eremuaren erradioa (5.37), lurrraren abiadura angeluarra (5.38) eta sortze-eremuaren latitudea (5.39). Haize geostrofikoaren abiadura zehazteko, airea-itsasoa tenperatura-diferentziari dagokion zuzenketa aplikatuko dugu, $R_T = 0,8$ kasu honetan.

$$\rho_a = 1,225 \text{ kg/m}^3 \quad (5.35)$$

$$U_g = \frac{U_A}{0,6796} = \frac{\frac{U_{10}}{R_T}}{0,6796} = \frac{\frac{11,50}{0,8}}{0,6796} = \frac{14,38}{0,6796} = 21,16 \text{ m/s} \quad (5.36)$$

$$R = 500 \text{ km} = 500\,000 \text{ m} \quad (5.37)$$

$$\omega = \frac{360^\circ}{24 \text{ h}} = \frac{2\pi \text{ rad}}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s} \quad (5.38)$$

$$\phi = 50^\circ \quad (5.39)$$

Horrela, aldagai horiek zehaztuta kalkula dezakegu zikloia eragin duen presio-gradientearen balioa, (5.40) adierazpenekoa.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial n} &= \rho_a \cdot \frac{U_g^2}{R} + 2 \cdot \omega \cdot \sin \phi \cdot \rho_a \cdot U_g & (5.40) \\ &= 1,225 \cdot \frac{21,16^2}{500000} + 2 \cdot 7,27 \cdot 10^{-5} \cdot \sin 50^\circ \cdot 1,225 \cdot 21,16 = 0,00398 \text{ Pa/m} \end{aligned}$$

Kontuan hartuz gero presio-gradiente hori fetchak eragindako eremuan ari garela aztertzen, (5.41) adierazpenean erakusten den bezala ere zehaztu dezakegu gradientea. Ondorioz, ekaitza sortu zuen isobaren arteko presio-diferentzia (5.42) adierazpenean jasotakoa litzateke.

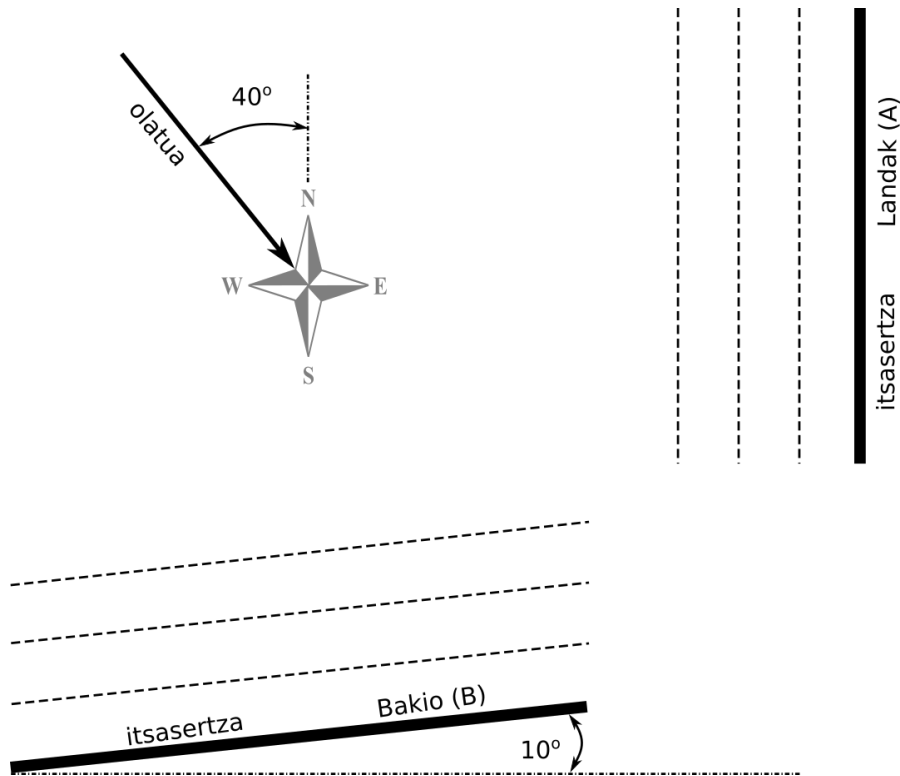
$$\frac{\delta p}{\delta n} = \frac{\Delta p}{X} \quad (5.41)$$

$$\implies \Delta p = \frac{\partial p}{\partial n} \cdot X = 0,00398 \text{ Pa/m} \cdot 200\,000 \text{ m} = 796 \text{ Pa} = 7,96 \text{ mb} \quad (5.42)$$

5.2. irudian ematen denarekin alderatzeko, zikloiaren erdigunea eta Zarautz elkartzen dituen lerroa marraztu dezakegu; lerro horretan, 976 eta 986 arteko isobaren distantzia 550 km dela zehaztu daiteke. Beraz, presio-diferentzia hori (5.42) adierazpenekoarekin bat datorrela esan dezakegu, balioak berdin-berdinak ez diren arren.

5.4. Bakio-Landak parametro-eredua⁴

Donostian bizi den surflari bat 5.3. irudiko bi aukera aztertzen ari da surfa egiteko: Landak (A) edo Bakio (B). Demagun surflariak sakonera mugagabeko olatuen ezaugarriak ezagunak dituela, SIMAR sarea baliatuz horretarako. Lortu dituen datuak honako hauek dira: $H_s=3,0$ m, $T= 7,6$ s, eta irudiko noranzkoa (θ_o).



5.3. irudia. Azterturiko puntuei dagokien kosta-lerroen eskema.

Honako hau eskatzen da:

- Surflaria 10 metroko sakoneran ibiliko bada, zehaztu non izango dituen olatu handiagoak, Landetan edo Bakion. Gogoan izan kasu bietan batimetria kostaldearekiko paraleloa dela.
- Landetako hondartzaren malda %10 bada eta Bakiokoa %15, kalkulatu nolako haustura mota gauzatuko den kasu bakoitzean.
- Zehaztu zein izan den olatu horiek sortu dituen haizearen abiadura, baldin eta inongo murrizketarik izan ez dela suposatzen baldin badugu.

⁴Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2014/15 ikasturtea (2014-11-10), partzialaren 1. ariketa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Kostaldean olatuaren altuera zehaztu nahi badugu, sakonera mugagabeko olatua itsasertzera nola barreiatzen den zehaztu beharko dugu. Horretarako, *shoaling*- eta errefrakzio-koefizienteak beharko ditugu, (5.49) eta (5.53) adierazpenek emanak. Bata zein bestea zehazteko uhin-bizkortasuna beharko dugu, eta, aurretik, uhin-luzera bi kokapen horietan. Bada, dispersio-erlazioa erabiliz, (5.43) adierazpenekoa, ikus daiteke uhin-luzera berbera dela bi kasuetan, hots, (5.44) adierazpenean jasotakoa. Horrek esan nahi du, gainera, uhin horiek bitarteko uretan daudela sakonera horretan (5.45).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (5.43)$$

$$L = \frac{9,81 \cdot 7,6^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{L}\right)$$

$$L = 90,18 \cdot \tanh\left(\frac{62,83}{L}\right) \quad \Longrightarrow \quad L = L_A = L_B = 66,50 \text{ m} \quad (5.44)$$

$$\frac{d}{L} = \frac{10}{66,50} = 0,15 \quad \Longrightarrow \quad \text{bitarteko urak} \quad (5.45)$$

Hori jakinik, zehaztu ditzagun uhin-bizkortasunak sakonera ertain eta mugagabean, (5.46) eta (5.47) adierazpenekin, eta multzo-bizkortasuna sakonera ertainean (5.48) adierazpenarekin. Adierazpen horiek erakusten duten bezala, uhin-eta multzo-bizkortasunak balio bera dute bi kasuetan.

$$C = C_A = C_B = \frac{L}{T} = \frac{66,50}{7,6} = 8,75 \text{ m/s} \quad (5.46)$$

$$C_o = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 7,6}{2 \cdot \pi} = 11,87 \text{ m/s} \quad (5.47)$$

$$\begin{aligned} C_g = C_{g,A} = C_{g,B} &= \frac{C}{2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d/L)}\right) \quad (5.48) \\ &= \frac{8,75}{2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 10/66,50}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot 10/66,50)}\right) \\ &= 4,375 \cdot \left(1 + \frac{1,890}{3,233}\right) = 6,93 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Multzo-bizkortasunak zehaztuta kalkula daiteke *shoaling*-koefizientea, (5.49) adierazpenean emana, balio bera duena bi kasuetan.

$$K_s = K_{s,A} = K_{s,B} = \sqrt{\frac{C_{g,o}}{C_g}} = \sqrt{\frac{C_o/2}{C_g}} = \sqrt{\frac{11,87/2}{6,93}} = 0,925 \quad (5.49)$$

Errefrakzio-koefizienteak kalkulatzeko, (5.53) adierazpena baliatuko dugu eta uhinaren noranzko-aldaketak izango ditugu kontuan. Bestalde, noranzko-aldaketa zehatzeko Snell legea baliatuko dugu; ikus (5.50) adierazpena. Uhinaren noranzkoa, uhin-luzera ez bezala, desberdina da uhinak kostarekiko duen eraso-angeluaren arabera. Kontuan izan 5.3. irudiaren arabera olatuak A kostarekiko osatzen duen angelua $\theta_A = 50^\circ$ dela, eta B kostarekiko osatzen duena $\theta_B = 30^\circ$. Beraz, (5.51) eta (5.52) angeluek karakterizatuko dute uhin bakoitzak 10 metroko sakoneran kostarekin izango duen noranzkoa.

$$\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \theta_o}{C_o} \quad (5.50)$$

$$\sin \theta = \frac{C}{C_o} \cdot \sin \theta_o$$

$$\Rightarrow \sin \theta_A = \frac{8,75}{11,87} \cdot \sin 50^\circ \quad \Rightarrow \quad \theta_A = 34,4^\circ \quad (5.51)$$

$$\Rightarrow \sin \theta_B = \frac{8,75}{11,87} \cdot \sin 30^\circ \quad \Rightarrow \quad \theta_B = 21,6^\circ \quad (5.52)$$

Hala, kasu bakoitzari dagokion errefrakzio-koefizienteak (5.54) eta (5.55) adierazpenetan jasotakoak dira.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta}} \quad (5.53)$$

$$\Rightarrow K_{r,A} = \sqrt{\frac{\cos 50^\circ}{\cos 34,4^\circ}} = 0,883 \quad (5.54)$$

$$\Rightarrow K_{r,B} = \sqrt{\frac{\cos 30^\circ}{\cos 21,6^\circ}} = 0,965 \quad (5.55)$$

Hori dela eta, olatu-altuerak kostara bakoitzean izango duen altuera *shoaling*- eta errefrakzio-koefizienteen eragin bateratuak emango digu, (5.56) eta (5.57) adierazpenetan jasoak. Beraz, *shoaling*aren eragina antzekoa bada ere bi kasuetan, kostaren noranzkoak errefrakzio handiagoa eragiten du Landetan eta, ondorioz, uhin-altuera handiagoa da Bakion.

$$H_A = K_{s,A} \cdot K_{r,A} \cdot H_0 = 0,925 \cdot 0,883 \cdot 3 = 2,45 \text{ m} \quad (5.56)$$

$$H_B = K_{s,B} \cdot K_{r,B} \cdot H_0 = 0,925 \cdot 0,965 \cdot 3 = 2,68 \text{ m} \quad (5.57)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Surfaren antzekotasun parametroaren adierazpena kontuan hartuta sakonera mugagabeko olatu-altuerarekin, (5.58) eta (5.59) adierazpenetakoak, bi kasuetan olatu-haustura *plunging* motakoa dela ondoriozta daiteke, parametro horren balioa 0,5 eta 3,3 artean baitago. Argibide gehiago 3.1. taulan topa daitezke.

$$\xi_{o,A} = \frac{m}{\sqrt{H_o/L_o}} = \frac{0,10}{\sqrt{2,35/90,18}} = 0,87 \quad (5.58)$$

$$\xi_{o,B} = \frac{m}{\sqrt{H_o/L_o}} = \frac{0,10}{\sqrt{2,68/90,18}} = 0,62 \quad (5.59)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Sakonera mugagabeko olatuak guztiz garatuak direla kontuan hartuz gero, enuntziatuak inongo murrizketarik ez dagoela dio; SPM metodoan zehazturiko (5.60) adierazpenak emango digu olatu horiek sortu dituen haizearen abiadura. Ondorioz, (5.61) adierazpenean jasotakoa da haize-abiadura.

$$\frac{g \cdot H_{mo}^{full}}{U_{10}^2} = 0,2433 \quad (5.60)$$

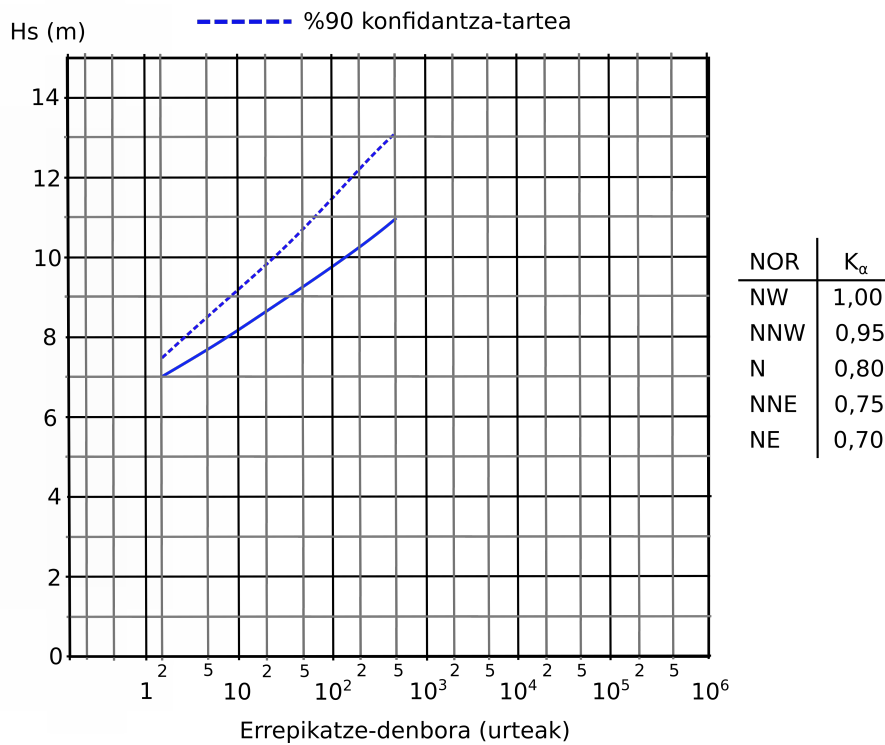
$$U_{10} = \sqrt{\frac{g \cdot H_{mo}^{full}}{0,2433}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 3}{0,2433}} = 11,00 \text{ m/s} \quad (5.61)$$

5.5. Bermeon portua eta plataforma⁵

Bermeon dagoen enpresa batek bi itsas lan eraiki nahi ditu atrakatze-lanak gauzatzeko. Batetik, portu txiki bat, eta, bestetik, kostaldetik isolatua egongo den plataforma txiki bat.

Lehenaren kasuan, portua, NNW norabideari dagokion $H_{1/10}$ olatua baliatuko da babes-dikea kalkulatzeko. Dikearen balio-bizitza 25 urtekoa dela joko da, eta haren hutsegite-probabilitatea %8. Muturreko erregimenaren datuak 5.4. irudian jasotakoak dira.

BILBOKO BUIA MUTURREKO EGOERAREN BANAKETA ESKALARRA



5.4. irudia. Muturreko erregimena Bilboko buian (ROM-03.91).

Bigarren kasuan, plataforma, urtean batez beste 7000 orduz erabilgarria izatea eskatzen da. Kasu horretan, batez besteko itsas egoeren banaketa-funtzioa (5.62) ekuazioak emandakoa da.

⁵Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2017/18 ikasturtea (2017-11-03), partzialaren 2. ariketa.

$$F_W(H < H_s) = 1 - \exp\left(- (1,5 \cdot H_s)^{0,8}\right) \quad (5.62)$$

Honako hau eskatzen da:

- (a) Kalkulatu portuko babes-dikeari dagozkion honako hauek: olatu adierazgarriaren altuera, gainditua izateko probabilitatea %6 duen olatua-altuera eta $H_{1/10}$.
- (b) Plataforman, kalkulatu honako hauek itsas egoerak 1700 uhin baditu: olatu adierazgarriaren altuera eta H_{50} .
- (c) Dikearen kalkuluan itsas egoera Jonswap espektroari dagokiona baldin bada, kalkulatu fetch-luzera haizearen abiadura 60 km/h denean.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Portuko datuak aztertzeke 5.4. irudiko datuak baliatuko ditugu. Datu horietan, errepikatze-aldi bati dagokion olatu-altuera adierazgarria zehaztu daiteke. Horretarako, baina, portuaren diseinuari dagokion errepikatze-aldia zehaztu behar da. Hori egin daiteke obrarako zehaztu diren arrisku-maila eta balio-bizitza jakinik, (5.63) adierazpena baliatuta. Horrenbestez, errepikatze-aldi hori (5.64) ekuazioan jasotakoa da.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{L_f} \quad (5.63)$$

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - E)^{1/L_f}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,08)^{1/25}} = 300 \text{ urte} \quad (5.64)$$

Errepikatze-aldia ezagututa, zehaztu dezakegu itsas lan horren diseinuan erabiliko genukeen olatu adierazgarria edo H_s . Kasu honetan, olatu-altuera konfiantzartatea kontuan hartu gabe zehaztuko dugu, obra txikia baita. Gainera, grafikoak ematen digun balioa noranzkoaren faktoreaz biderkatu behar da, (5.65) adierazpenean erakusten den modura.

$$H_s^{NNW} = K_\alpha \cdot H_s = 0,95 \cdot 10,5 \text{ m} = 10,0 \text{ m} \quad (5.65)$$

Bestalde, gainditua izateko probabilitate jakina duen olatu-altuera zehazteko, itsas egoera bati dagokien Rayleigh banaketa-funtzioa baliatuko dugu, (5.66) adierazpenaren arabera. Hor, gainditua izateko probabilitatea %6 duen olatu-altuera (H_x) honako baldintza hau betetzen duena izango da: $F(H > H_x) = 0,06$ edo

$F(H < H_x) = 1 - 0,06 = 0,94$. Beraz, olatu-altuera hori (5.67) ekuazioak emandakoa izango da.

$$F(H < H_x) = 1 - \exp\left(-2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2}\right) \quad (5.66)$$

$$H_x = \left[\frac{\ln(1 - F) \cdot H_s^2}{-2,005}\right]^{1/2}$$

$$H_x = \left[\frac{\ln(1 - 0,94) \cdot 10,0^2}{-2,005}\right]^{1/2} = 11,85 \text{ m} \quad (5.67)$$

Azkenik, $H_{1/10}$ lortzeko itsas egoera jakin bati dagozkion erlazioak balia ditzakegu, (5.68) eta (5.69), Rayleigh banaketa-funtziotik eratorriak eta eranskineko E.9 taulan jasoa. Hala, (5.70) ekuazioak emandakoa izango da $H_{1/10}$.

$$H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} \quad (5.68)$$

$$H_{1/3} = H_s = 1,416 \cdot H_{rms} \quad (5.69)$$

$$\implies H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} = 1,8 \cdot \frac{H_s}{1,416} = 1,8 \cdot \frac{10,0}{1,416} = 12,7 \text{ m} \quad (5.70)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Oraingoan (5.71) ekuazioko banaketa-funtzioa baliatuko dugu, enuntziatuak emana. Banaketa-funtzio horren arabera, urtean 7000 orduz gainditzen ez den olatu-altuera adierazgarria zein den zehaztu beharko dugu. Ordu kopuru hori probabilitate jakin bati lotua dago. Urteak 8760 h dituela joz gero, olatu-altuera adierazgarria ez gainditzearen probabilitate hori honako hau izango da: $F_W(H < H_s) = 7000/8760 = 0,799 = \%79,9$. Ondorioz, probabilitate horri dagokion olatu-altuera (5.72) ekuazioan jasotakoa izango da.

$$F_W(H < H_s) = 1 - \exp\left(- (1,5 \cdot H_s)^{0,8}\right) \quad (5.71)$$

$$\begin{aligned} \implies H_s &= \frac{[-\ln(1 - F)]^{1/0,8}}{1,5} \\ &= \frac{\left[-\ln\left(1 - \left(\frac{7000}{8760}\right)\right)\right]^{1/0,8}}{1,5} = 1,20 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.72)$$

Ekaitzeko 50 olatu altuenen batez besteko altuera edo H_{50} zehaztu nahi badugu, zehaztu dezagun olatu horiei dagokien $H_{1/n}$, itsas egoera bati dagokion Rayleigh banaketa-funtzioko erlazioak erabiltzeko aukera emango digu eta. 50 olatuak olatu guztien 34rena dira, $1700/50 = 34$ baita. Beraz, $H_{50} = H_{1/34}$. Ondorioz, Rayleigh motako banaketa baten (5.73) eta (5.74) erlazioak, eranskineko E.9 taulan emanak, balia ditzakegu $H_{1/34}$ kalkulatzeko (5.75) adierazpenarekin. Gogoan izan banaketa horretan aurreko lerroetan lortu dugun H_s beharko dugula, itsas egoera horri dagokion olatu-altuera adierazgarria hain zuzen ere. Lorturiko balioa (5.76) ekuazioan jasotakoa da.

$$H_{1/50} = 2,206 \cdot H_{rms} \quad (5.73)$$

$$H_{1/30} = 2,085 \cdot H_{rms} \quad (5.74)$$

$$\begin{aligned} \implies H_{1/34} &= \left(2,085 + \frac{2,206 - 2,085}{50 - 30} \cdot (34 - 30)\right) \cdot H_{rms} \quad (5.75) \\ &= 2,109 \cdot H_{rms} \\ &= 2,109 \cdot \frac{H_s}{1,416} \\ &= 2,109 \cdot \frac{1,2}{1,416} = 1,79 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.76)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Energia-espektroa Jonswap motakoa bada, olatu horiek sortu dituen fetcha (5.81) adierazpenarekin kalkula dezakegu. Horretarako, fetch adimentsionala edo ξ kalkulatu beharko genuke lehenik, (5.79) adierazpenaren arabera. Kalkula dezagun aurretik zero ordenako momentua (5.77) erlazioa baliatuz.

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_o} \quad (5.77)$$

$$m_o = \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 = \left(\frac{10,0}{4}\right)^2 = 6,25 \text{ m}^2 \quad (5.78)$$

Zero ordenako momentu horren balioarekin, (5.78) ekuazioan jaso, fetch adimensional (ξ) kalkula dezakegu, kontuan hartuta $U = 60 \text{ km/h} = 16,7 \text{ m/s}$ dela. Haren balioa (5.80) adierazpenean jasotakoa da.

$$\epsilon = 1,63 \cdot 10^{-7} \cdot \xi = \frac{m_o \cdot g^2}{U^4} \quad (5.79)$$

$$\Rightarrow \xi = \frac{m_o \cdot g^2}{U^4} \cdot \frac{1}{1,63 \cdot 10^{-7}} = \frac{6,25 \cdot 9,8^2}{16,7^4 \cdot 1,63 \cdot 10^{-7}} = 47\,346 \quad (5.80)$$

Orain, fetcha kalkula dezakegu (5.81) adierazpenarekin: itsas egoera hori eragin duen fetcharen luzera (5.82) ekuazioan jasotakoa izango da.

$$\xi = \frac{g \cdot X}{U^2} \quad (5.81)$$

$$\Rightarrow X = \frac{\xi \cdot U^2}{g} = \frac{47\,346 \cdot 16,7^2}{9,81} = 1\,347\,892 \text{ m} = 1347,9 \text{ km} \quad (5.82)$$

5.6. Zurriolako hondartzan ekaitzaren eragina⁶

Ereduek izugarrizko olatuak aurreikusten dituzte gure kostaldean. Hauek dira ekaitz horretako olatuen ezaugarriak sakonera mugagabeen: $H_s = 18$ m eta $T = 20$ s. Olatuak sortzen dituen itsasoak 13 h irautea espero da egoera horretan. Batez besteko gainazalaren erregimenak (5.83) adierazpeneko Weibull banaketa-funtzioa jarraitzen du. Muturreko erregimen lokala (5.84) adierazpeneko Gumbel banaketa-funtzioak definitua dago.

$$F_W(H_s) = 1 - \exp\left(- (1,47 \cdot H_s)^{1,26}\right) \quad (5.83)$$

$$F_G(H_s) = \exp\left(- \exp\left(\frac{H_s - 6,15}{-2,10}\right)\right) \quad (5.84)$$

Honako hau eskatzen da:

- Kalkulatu ekaitzeko $H_{1/10}$. Zer probabilitate egongo da ekaitzeko olatuek altuera hori gainditzeko?
- Kalkulatu ekaitzeko olatu-altuera maximoa.
- Zehaztu 18 m dituzten olatuen haustura mota Donostiako Zurriola hondartzan, haren malda %6 bada.
- Ekaitz horren ondorioz iristen diren olatuetatik zenbatek, ehunekotan, ez dute izango aurreko atalean zehazturiko haustura mota?
- Zurriolako dikearen aurreikusitako bizitza-balioa 25 urte bazen, zer-nolako hutsegite-probabilitatea espero daiteke ekaitzaren ondorioz?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). $H_{1/10}$ aldagaiaren balioa zehazteko, Rayleigh banaketa-funtziotik eratorritako aldagaien arteko erlazioak baliatuko ditugu, eranskineko E.9 taulan jasoak. Hala, H_s ezaguna denez, (5.85) adierazpena erabil dezakegu. $H_{1/10}$ zehaztu nahi dugunez, (5.86) adierazpena baliatuko dugu, eta, horrela, (5.87) sortu biak konbinatuz. Azken horrek emango digu, beraz, bilatzen ari garen $H_{1/10}$.

⁶Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2020-11-02), partzialaren 2. ariketa.

$$H_{1/3} = H_s = 1,416 \cdot H_{rms} \quad (5.85)$$

$$H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} \quad (5.86)$$

$$\implies H_{1/10} = 1,8 \cdot H_{rms} = 1,8 \cdot \frac{H_s}{1,416} = 1,8 \cdot \frac{18,0}{1,416} = 22,88 \text{ m} \quad (5.87)$$

Olatu-altuera hori gainditzeko probabilitatea zehazteko Rayleigh banaketa-funtzioa baliatuko dugu, (5.88) adierazpenekoa. Adierazpen horrek, baina, olatuak H_x altuera jakina ez gainditzeko probabilitatea adierazten digu. Beraz, adierazpena berriatziko dugu gainditua izateko probabilitatea adieraz dezan, (5.89) adierazpenean jaso bezala. Horrela, (5.90) ekuazioak emandakoa da $H_{1/10}$ olatu-altuera gainditzearen probabilitatea.

$$F(H < H_x) = 1 - \exp\left(-2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2}\right) \quad (5.88)$$

$$F(H > H_x) = \exp\left(-2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2}\right) \quad (5.89)$$

$$F(H > H_x) = \exp\left(-2,005 \cdot \frac{22,88^2}{18,0^2}\right) = 0,0392 = \%3,92 \quad (5.90)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Ekaitzeko olatu-altuera maximoa zehazteko, ekaitzaren altuera maximoa ekaitzaren olatu kopuruarekin erlazionatzen duten balioak erabiliko ditugu, eranskineko E.10 taulan jasoak. Kasu honetan, ekaitzak 13h irauten baditu eta haren batez besteko periodoa 20 s bada, ekaitzak $N = 13 \cdot 3600/20 = 2340$ olatu izango lituzke. Taulan ditugun balioak $N = 2000$ eta $N = 3000$ balioei dagozkie, (5.91) eta (5.92) adierazpenetakoak. Bi balio horien arteko aldaketa lineala dela joz gero, balio horien artean interpola dezakegu eta (5.93) ekuazioko balioa lortuko genuke, ekaitz horrek emango ligukeen olatu-altuera handiena adieraziz.

$$\bar{H}_{max,2000} = 2,022 \cdot H_s \quad (5.91)$$

$$\bar{H}_{max,3000} = 2,071 \cdot H_s \quad (5.92)$$

$$\begin{aligned} \implies \bar{H}_{max,2340} &= \left(2,022 + \frac{2,071 - 2,022}{1000} \cdot (2340 - 2000) \right) \cdot H_s \\ &= 2,039 \cdot 18,0 \text{ m} = 36,70 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.93)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Olatuen haustura mota aztertzeko, surfaren antzekotasun-parametroa baliatuko dugu, sakonera mugagabeko olatuaren balioarekin, (5.94) adierazpenean jasoa dena. Gogoan izan erabiltzen ari garen olatuen datuak sakonera mugagabeari dagozkiola. Hala, uhin-luzera ordezkatzuz, (5.95) adierazpena erabiliko dugu kalkulua egiteko. Balio hori 0,5 baino txikiagoa denez, ikus 3.1. taula; *spilling* motakoa izango litzateke olatu horren haustura.

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \quad (5.94)$$

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{H_o \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g \cdot T^2}}} = \frac{0,06}{\sqrt{18,0 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{9,81 \cdot 20^2}}} = 0,35 \quad (5.95)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Haustura mota hori ez duten olatu kopurua zehazteko, (5.95) adierazpena behatu beharko genuke. Haustura mota hori izango ez duten olatuek $\xi_o > 0,5$ baldintza betetzen dute. Aldagai horretan eragina duen bakarra olatu-altuera dela ikus daiteke, beste aldagai guztien balioa ez baita aldatzen ekaitzeko olatu denentzat.

Ondorioz, (5.96) adierazpeneko baldintza izango da olatuek bete beharrekoa haustura ez dadin *spilling* motakoa izan. Beraz, (5.97) adierazpenak emandakoa da olatuek izan beharreko altuera maximoa; altuera hori gaingiduz gero, haustura mota *spilling* motakoa izango da.

$$\xi_o < \frac{m}{\sqrt{H_o \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g \cdot T^2}}} \quad (5.96)$$

$$H_o < \left(\frac{m}{\xi_o}\right)^2 \cdot \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \left(\frac{0,06}{0,5}\right)^2 \cdot \frac{9,81 \cdot 20^2}{2 \cdot \pi} = 9,00 \text{ m} \quad (5.97)$$

Olatu-altuera jakinik, zehaztu dezakegu olatu-altuera hori ez gainditua izateko probabilitate zer-nolakoa den ekaitzean Rayleigh banaketa-funtzioa betetzen dela suposatuz. Olatu-altuera gainditzeko ez duten olatuen banaketa-funtzio hori (5.98) adierazpenekoa izango da, eta altuera hori gainditzeko probabilitatea edo haustura *spilling* motakoa ez den beste mota batekoa izateko probabilitatea (5.99) adierazpenekoa.

$$F(H < H_x) = 1 - \exp\left(-2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2}\right) \quad (5.98)$$

$$F(H < H_x) = 1 - \exp\left(-2,005 \cdot \frac{9,00^2}{18^2}\right) = 0,6058 = \%60,58 \quad (5.99)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Itsas lan baten hutsegite-probabilitatea zehazteko, kontuan hartuko dugu itsas lanaren balio-bizitzari (L_f) dagokion epea. Epe horretan hutsegite-probabilitatea (HP) eta ez-hutsegitearen probabilitatea (EHP) osagarriak dira, (5.100) adierazpenean jaso bezala. Ez-hutsegitearen urteroko probabilitateak independenteak direla joz gero, adierazpen hori (5.101) ekuazioan bezala idatz dezakegu. Bestalde, itsas lana olatu adierazgarriarekin diseinatu dela eta ez-hutsegitearen probabilitatea olatu-altuera hori ez gainditzearena dela joz gero, (5.102) adierazpena balia daiteke. Enuntziatuak aipaturiko kasuari dagokion probabilitate hori (5.103) ekuazioak emandakoa da.

$$HP_{L_f} = 1 - EHP_{L_f} \quad (5.100)$$

$$HP_{L_f} = 1 - (EHP_1 \cdot EHP_2 \cdot \dots \cdot EHP_{L_f}) = 1 - EHP^{L_f} \quad (5.101)$$

$$HP_{L_f} = 1 - (F_G(H_s))^{L_f} = 1 - \left(\exp\left(-\exp\left(\frac{H_s - 6,15}{-2,10}\right)\right)\right)^{L_f} \quad (5.102)$$

$$= 1 - \left(\exp\left(-\exp\left(\frac{18,00 - 6,15}{-2,10}\right)\right)\right)^{25} = 0,0848 = \%8,48 \quad (5.103)$$

5.7. Portuko ezponda-dikea⁷

Portu bateko ezponda-dikea honako aldagai hauekin diseinatzen da: balio-bizitza 50 urte eta hutsegite-probabilitatea %15. Batez besteko eta muturreko erregimen lokalak (5.104) eta (5.105) ekuazioek emandakoak dira.

$$F_W(H_s) = 1 - \exp\left(- (1,47 \cdot H_s)^{1,26}\right) \quad (5.104)$$

$$F_G(H_s) = \exp\left(- \exp\left(\frac{H_s - 3,15}{-0,87}\right)\right) \quad (5.105)$$

Demagun kalkulurako ekaitza 3000 olatuz osaturikoa dela.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu kalkuluko ekaitzaren olatu-altuera adierazgarria, H_s , baita haren errepikatze-denbora ere.
- (b) Kalkulatu ekaitzaren H_{50} . Zein da altuera hori gainditzeko probabilitatea ekaitzean?
- (c) Kalkulatu ekaitzeko olatu-altuera maximoa.
- (d) Dikearen alternatiba moduan sakonera mugagabeen kokatzen den atrakatzebuia bat aztertu nahi da. Zehaztu haren erabilgarritasuna, atrakatzebuiari lotuak dauden itsasontziek 2,0 m bitarte dituzten olatu adierazgarriei aurre egin diezaieketela jakinik.
- (e) Ekaitzaren energia-espektroa Pierson–Moskowitz motakoa dela suposatuz, lortu espektroaren maiztasun-adierazpena, $S(\omega)$ edo $S(f)$. Lortu haizearen $U_{19,5}$ abiadura. $\Gamma(1) = 1$ dela joko dugu.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Itsas lana diseinatzeko finkaturiko arriskuak eta hutsegite-probabilitateak emango digute olatuaren errepikatze-denbora, (5.106) adierazpenaren arabera. Errepikatze-denbora hori (5.107) ekuazioak emandakoa litzateke.

⁷Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2019-11-04), partzialaren 2. ariketa.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{L_f} \quad (5.106)$$

$$T_r = (1 - (1 - E)^{1/L_f})^{-1}$$

$$T_r = (1 - (1 - 0,15)^{1/50})^{-1} = 308,2 \text{ urte} \quad (5.107)$$

Kalkuluko ekaitzaren olatu-altuera adierazgarria muturreko banaketa-funtzioak emango digu, enuntziatuko (5.105) adierazpenak. Gogoan izan enuntziatuko adierazpen horrek olatu adierazgarria gainditua izateko probabilitatea ematen digula, $F_G(H_s) \equiv F_G(H > H_s)$, eta osagarriak direla gainditua izateko eta ez gainditzeko probabilitatea: $F_G(H > H_s) = 1 - F_G(H < H_s)$. Bestalde, banaketa-funtzio hori errepikatze-denborarekin erlaziona dezakegu: $F_G(H < H_s) = 1/T_r$ edo $F_G(H > H_s) = 1 - 1/T_r$. Ondorioz, (5.109) adierazpena erabil dezakegu probabilitate hori duen olatu-altuera adierazgarria kalkulatzeko. Haren balioa (5.110) ekuazioan jasotakoa da.

$$F_G(H_s) = \exp\left(-\exp\left(\frac{H_s - 3,15}{-0,87}\right)\right) \quad (5.108)$$

$$1 - \frac{1}{T_r} = \exp\left(-\exp\left(\frac{H_s - 3,15}{-0,87}\right)\right) \quad (5.109)$$

$$\frac{H_s - 3,15}{-0,87} = \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)\right)$$

$$H_s = 3,15 - 0,87 \cdot \left(\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)\right)\right)$$

$$H_s = 3,15 - 0,87 \cdot \left(\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{308,2}\right)\right)\right) = 8,13 \text{ m} \quad (5.110)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Ekaitzeko 50 olatu altuenen batez besteko altuera edo H_{50} zehaztu nahi badugu, zehaztu dezagun olatu horiei dagokien $H_{1/n}$, itsas egoera bati dagokion Rayleigh banaketa-funtzioan jasotako parametroekin erlaziona baitezakegu, eranskineko E.9 taulan emandako balioekin. Hala, 50 olatu horiek olatu guztien 60-rena dira, $3000/50 = 60$ baita. Beraz, $H_{50} = H_{1/60}$. Hala, (5.111) eta (5.112) erlazioak baliatuko ditugu (5.113) adierazpena lortu eta $H_{1/60}$ kalkulatzeko. Balio hori (5.114) ekuazioan jasotakoa da.

$$H_{1/100} = 2,359 \cdot H_{rms} \quad (5.111)$$

$$H_{1/50} = 2,206 \cdot H_{rms} \quad (5.112)$$

$$\Rightarrow H_{1/60} = \left(2,206 + \frac{2,359 - 2,206}{50} \cdot 10 \right) \cdot H_{rms} \quad (5.113)$$

$$= 2,237 \cdot H_{rms}$$

$$= 2,237 \cdot \frac{H_s}{1,416}$$

$$= 2,237 \cdot \frac{8,13}{1,416} = 12,84 \text{ m} \quad (5.114)$$

Itsas egoera horretan olatu-altuera hori gainditzeko probabilitatea aztertzeko Rayleigh banaketa-funtzioa baliatuko dugu, (5.115) adierazpenaren bidez. Probabilitate hori (5.116) ekuazioan emandakoa da.

$$F_R(H > H_x) = \exp \left(- 2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2} \right) \quad (5.115)$$

$$F_R(H > 12,84) = \exp \left(- 2,005 \cdot \frac{12,84^2}{8,13^2} \right) = 0,0067 = \%0,67 \quad (5.116)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Ekaitzean 3000 olatu daudela jakinik, (5.117) adierazpena balia dezakegu itsas egoera horretako olatu-altuera maximoa zehazteko. Altuera adierazgarria biderkatzen duen faktorea $N = 3000$ jakinik lortuko genuke, eranskineko E.10 taulako balioekin. Olatu-altuera maximo hori (5.118) ekuazioak emandakoa da.

$$\bar{H}_{max,N} = 2,071 \cdot H_s \quad (5.117)$$

$$\bar{H}_{max,N} = 2,071 \cdot 8,13 = 16,74 \text{ m} \quad (5.118)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Olatu-altuera adierazgarri hori ez gainditzearen probabilitatea enuntziatuko (5.104) banaketa-funtzioak emango digu; horren arabera egingo dugu epe luzeko analisia. Horrela, gainditu nahi ez den

olatu-altuera adierazgarria 2,0 metrokoa dela kontuan hartuz, (5.119) adierazpenak zuzenean emango digu olatu-altuera hori ez gainditzearen probabilitatea.

$$F_W(H_s) = 1 - \exp(-(1,47 \cdot 2,0)^{1,26}) = 0,9796 = \%97,96 \quad (5.119)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Energia-espektroak badakigu (5.120) adierazpeneko forma orokorra duela.

$$S(\omega) = A \cdot \omega^{-p} \cdot \exp(-B \cdot \omega^{-q}) \quad (5.120)$$

Bestalde, Pierson–Moskowitz motakoa bada, badakigu (5.121) eta (5.124) arteko baldintzak beteko dituztela aldagaiek.

$$p = 5 \quad (5.121)$$

$$q = 4 \quad (5.122)$$

$$A = 0,0081 \cdot g^2 = 0,0081 \cdot 9,8^2 = 0,768 \quad (5.123)$$

$$B = 0,74 \cdot \left(\frac{U_{19,5}}{g}\right)^{-q} \quad (5.124)$$

Beraz, Pierson–Moskowitz motakoa baldin bada (5.125) adierazpeneko forma izango du, $\omega = f \cdot (2 \cdot \pi)$ izanik.

$$S(f) = \frac{0,0081 \cdot g^2}{(2 \cdot \pi)^5 \cdot f^5} \cdot \exp\left(-0,74 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot U_{19,5} \cdot f}{g}\right)^{-4}\right) \quad (5.125)$$

Espektroaren adierazpena emateko falta dugun aldagaia B da. Aurretik, kalkula dezagun lehen momentuko ordena, olatu-altuera adierazgarria ezaguna da eta. Momentu hori (5.126) adierazpenak emandakoa da.

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad \Rightarrow \quad m_0 = \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 = \left(\frac{8,13}{4}\right)^2 = 4,13 \text{ m}^2 \quad (5.126)$$

Momentu horrekin eta $\Gamma(1) = 1$ dela jakinik, B aldagaiaren balioa zehaztu dezakegu (5.127) adierazpenarekin, $r = 0$ dela jakinik.

$$m_r = A \cdot B^{(r-p+1)/q} \cdot \frac{1}{q} \cdot \Gamma((p-r-1)/q) \quad (5.127)$$

$$m_0 = A \cdot B^{(0-5+1)/4} \cdot \frac{1}{4} \cdot \Gamma((5-0-1)/4)$$

$$m_0 = A \cdot B^{-1} \cdot \frac{1}{4} \cdot \Gamma(1)$$

$$m_0 = \frac{A}{4 \cdot B}$$

$$B = \frac{A}{4 \cdot m_0}$$

$$B = \frac{0,768}{4 \cdot 4,13} = 0,0465 \quad (5.128)$$

Beraz, energia-espektroaren adierazpena (5.129) ekuazioan jasotakoa litzateke.

$$S(\omega) = 0,768 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp(-0,0465 \cdot \omega^{-4}) \quad (5.129)$$

Azkenik, (5.124) adierazpena baliatuz, $U_{19,5}$ zehaztu dezakegu, (5.131) ekuazioan lehen lorturiko B balioa ordezkatzuz, (5.128) ekuaziokoa alegia.

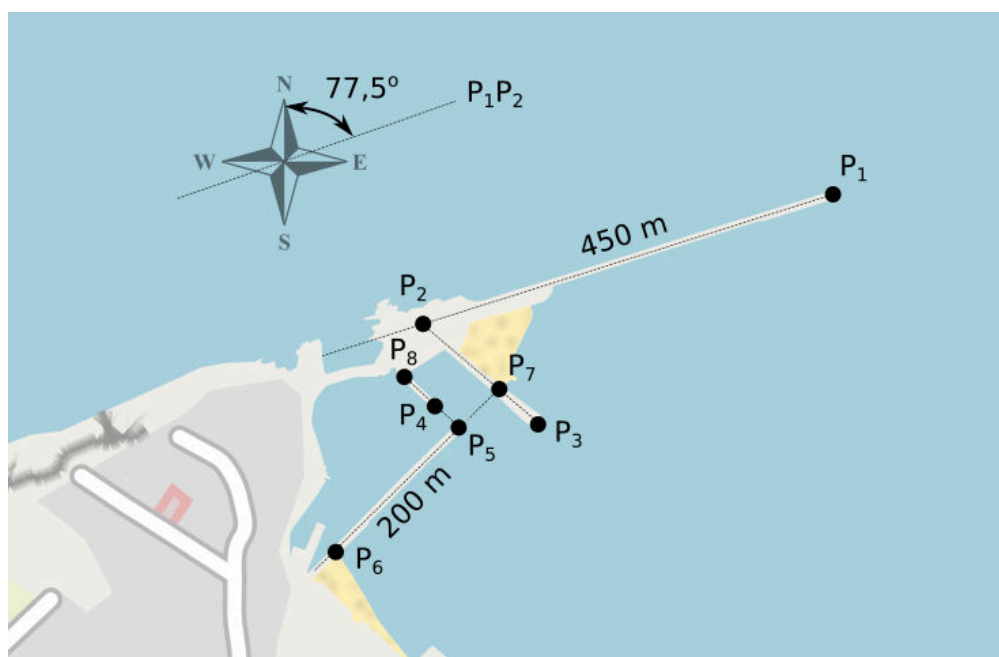
$$B = 0,74 \cdot \left(\frac{U_{19,5}}{g}\right)^{-q} \quad (5.130)$$

$$U_{19,5} = \left(\frac{B}{0,74}\right)^{-1/q} \cdot g \quad (5.131)$$

$$U_{19,5} = \left(\frac{0,0465}{0,74}\right)^{-1/4} \cdot 9,8 = 19,57 \text{ m/s} \quad (5.132)$$

5.8. Zokoan barreiatzea eta difrakzioa⁸

Ziburuko Zokoa portuan ontzi txikiek atrakatzen dute; 5.5. irudian jaso da portuaren eskema bat. Portuak babes-dike bat du kanpoaldean ($\overline{P_1P_2}$), kostarekiko paraleloa dena, 450 m luze, eta $77,5^\circ$ inklinatua dagoena iparraldearekiko. Portuak, barnealdean, kontradike batzuk ditu, $\overline{P_2P_3}$ eta $\overline{P_5P_6}$ besteak beste. Atrakatzere-muko sarbidea $\overline{P_3P_5}$ eta $\overline{P_4P_5}$ tartetatik egiten da. Irudiko $\overline{P_1P_2}$ eta $\overline{P_2P_3}$ lerrokatzeek osatzen duten angeluak 73° ditu, eta $\overline{P_5P_7}$ puntuen arteko distantzia 50 metrokoa da. Portuaren eremu osoan sakonera 10 metrokoa dela joko dugu.



5.5. irudia. Portuaren oin-planta ($\overline{P_2P_7} = 100\text{ m}$, $\overline{P_7P_3} = 50\text{ m}$, $\overline{P_4P_8} = 50\text{ m}$).

Bilboko buiari dagokion urte osorako batez besteko erregimenaren Weibull banaketa-funtzioen datuak 5.1. taulan jaso dira. Taulak noranzko nagusiak hartzen ditu kontuan; gainontzeko noranzkoei barealdiak dagozkiela joko da. Bilboko buia 50 metroko sakoneran dago kokatua.

Honako hau eskatzen da:

- Kalkulatu 10 segundoko periodoa duten olatuen K_{rs} koefizientea buiatik P_1 puntura eta horien eraso-angelua P_1 puntuan, 5.1. taulan adieraziriko noranzkoentzat.

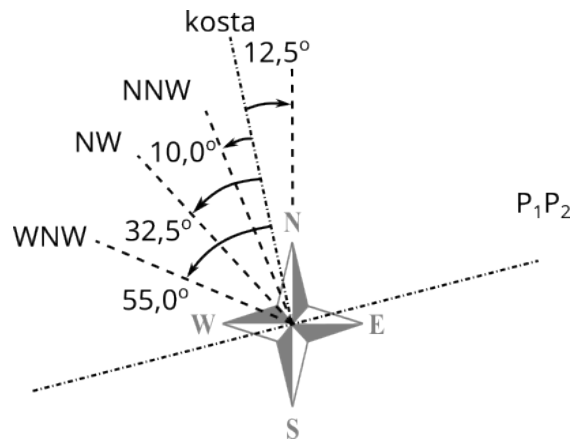
⁸Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2019-06-28), ezohikoaren 2. ariketa.

5.1. taula. Urte osoko Weibull banaketa-funtzioaren parametroak Bilboko buian.

Noranzkoa	%	A	B	C
WNW	30,29	2,40	0,16	1,66
NW	34,90	1,89	0,17	1,53
NNW	11,82	0,87	0,43	0,96
N	6,06	0,81	0,40	0,95

- (b) Kalkulatu difrakzio-koefizientea dikearen muturretik P_5 punturaino, aurreko atalean kalkulatu diren olatuentzat, norabide guztiak kontuan hartuta.
- (c) Zehaztu urtean zenbat orduz ezingo den erabili portua. Analisisirako, eta sinplifikatzeko asmoz, soilik frekuentzia gehien duten lau noranzkoak hartuko dira kontuan, zeinek frekuentzia guztien %83 baino gehiago biltzen baitute. Beste noranzkoetan olaturik ez dagoela joko da. Portua erabilgarri dagoela joko da, baldin eta olatuek ez badute gainditzen 0,40 metroko altuera P_5 puntuan.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuak eskatzen diguna da eraso-angelua dike-muturrean, θ_{P_1} , eta buiatik harainoko $K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$. Horretarako, olatuen noranzkoak Bilboko buian neurtuak direla joko dugu, 5.6. irudiko eskemaren arabera. Gainera, enuntziatuak kontrakorik ez dioenez, batimetria kostarekiko paraleloa dela joko dugu.



5.6. irudia. Dikea edo kostara, horren elkarzuta eta N norantza erreferentziazkoaren eskema.

Komenigarria da, lehenik, buiaren sakonera erlatiboa egiaztatzea, ez baita gauza

bera sakonera mugagabean edo besteren batean kokatua egotea aztertzen ari garen olatuentzat. Horretarako, uhin-luzera kalkulatu dugu sakonera mugagabean (5.133) adierazpenarekin eta, ondoren, sakonera erlatiboa zehaztuko dugu eranskineko E.7 taularen arabera. Buia, beraz, ez dago sakonera mugagabean, (5.134) adierazpeneko balioa 0,5 baina txikiagoa baita.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi} = 156,1 \text{ m} \quad (5.133)$$

$$\frac{d_b}{L_o} = \frac{50}{156,1} = 0,320 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \quad \frac{d_b}{L_b} = 0,33 \quad \Rightarrow \quad \text{sakonera ertaina} \quad (5.134)$$

Sakonera murriztuetan egoteak esan nahi du uhin-barreiatzea aztertzeko lehenik buiako balioak mugagabera aldatuko ditugula eta, ondoren, mugagabeko balio horiekin dike-muturreko barreiatzea aztertuko dugula. Beraz, eskaturiko datuak kalkulatzeko, kontuan hartu beharko dugu barrea daitezkeela uhinak mugagabetik buiara eta mugagabetik dike-muturrera. Hala, koefiziente bien arteko erlazioa (5.135) adierazpenean emandakoa izango da.

$$H_b = K_{rs}^{o \rightarrow b} \cdot H_o = K_{rs}^{o \rightarrow b} \cdot \frac{H_{P_1}}{K_{rs}^{o \rightarrow P_1}} \quad \Rightarrow \quad K_{rs}^{b \rightarrow P_1} = \frac{K_{rs}^{o \rightarrow P_1}}{K_{rs}^{o \rightarrow b}} \quad (5.135)$$

Aurreko bi koefizienteak bi pausotan kalkulatu ditugu, eta 5.2. zein 5.3. tauletan jasoko. Bata zein bestea kalkulatzeko, eranskinen emandako E.2 irudiko abakoa erabiliko dugu. Hala, lehen taulan mugagabetik buiarako barreiatzea hartzen da kontuan, baina kontuan izanik buiako datuak ditugula. Beraz, $T = 10$ s denez, eta buiaren sakonera 50 m, $d/gT^2 = 50/(9,81 \cdot 10^2) = 0,0500$ datuarekin sartuko gara nomogramara, eta dagokion eraso-angeluarekin (θ_b) lortuko ditugu taulako azken bi zutabeak.

5.2. taula. Mugagabetik (*o*) buiara (*b*) barreiatzea.

Noranzkoa	d/gT^2	θ_b graduak	$K_{rs}^{o \rightarrow b}$	θ_o graduak
WNW	0,0500	55	0,92	58
NW	0,0500	32,5	0,94	34
NNW	0,0500	12,5	0,95	11
N	0,0500	10	0,95	13

Bestalde, 5.3. taulan lorturiko datuak erabiliko ditugu, horiekin mugagabetik dike-muturrerako barreiatzea aztertzeko. Oraingoan, baina, $T = 10$ s denez, eta dikearen sakonera 10 m, $d/gT^2 = 10/(9,81 \cdot 10^2) = 0,0102$ balioarekin sartuko gara abakora.

5.3. taula. Mugagabetik (o) dike-muturreraino (P_1) barreiatzea.

Noranzkoa	d/gT^2	θ_o graduak	$K_{rs}^{o \rightarrow P_1}$	θ_{P_1} graduak
<i>WNW</i>	0,0102	58	0,80	28
<i>NW</i>	0,0102	34	0,92	19
<i>NNW</i>	0,0102	11	0,98	7
<i>N</i>	0,0102	13	0,97	8

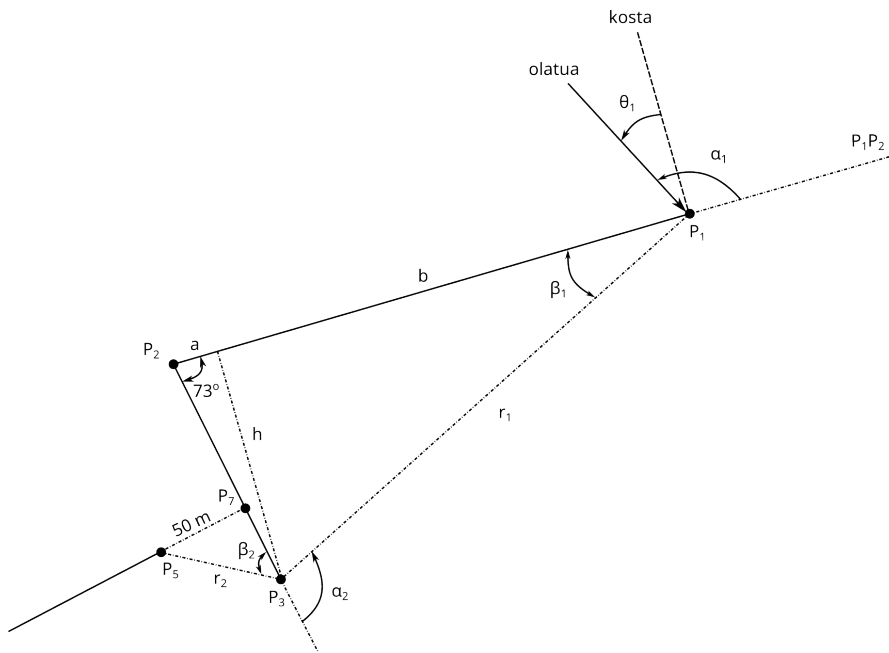
Emaitzak (5.4.) taulan jaso dira; lehen zutabean θ_{P_1} eta azken zutabean $K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$, (5.135) adierazpenaren arabera. Aldiz, $K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$ kalkulatzeko (5.135) ekuazioa aplikatuko dugu. Azken emaitzak azken zutabekoak dira.

5.4. taula. Dike-muturreko eraso-angelua, θ_{P_1} , eta *shoaling*- eta errefrakzio-koefiziente bateratua, $K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$.

Noranzkoa	θ_{P_1}	$K_{rs}^{o \rightarrow b}$ graduak	$K_{rs}^{o \rightarrow P_1}$	$K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$ graduak
<i>WNW</i>	28	0,92	0,80	0,87
<i>NW</i>	19	0,94	0,92	0,98
<i>NNW</i>	7	0,95	0,98	1,03
<i>N</i>	8	0,95	0,97	1,02

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Difrakzio-koefizientea kalkulatzeko dike-muturretik portuko P_5 puntura, bitan banatuko dugu difrakzio-prozesua. Lehen difrakzioa prozesua P_1 eta P_3 puntuen artekoa izango da, eta, bigarrena, P_3 eta P_5 puntuen artekoa. Horretarako, babesean dagoen eremuaren sakonera konstantea dela joko dugu. Esan bezala, lehen difrakzio-prozesua kalkulatzeko P_3 puntuaren kokapena karakterizatu behar dugu dike-muturrarekiko; hau da, 5.7. irudiko r_1 eta β_1 behar ditugu.

r_1 eta β_1 kalkulatzeko, 5.7. irudiko triangelua erabiliko dugu. Horrela, (5.136), (5.137), (5.138), (5.139) eta (5.140) ekuazioetako erlazioen bidez kalkula ditzakegu



5.7. irudia. P_1P_2 eta P_2P_3 eremuko portuaren eskema.

bi balio horiek, aipaturiko azken bi ekuazioetan emanak, hain zuzen ere.

$$h = 150 \cdot \sin 73^\circ = 143,4 \text{ m} \quad (5.136)$$

$$a = \frac{h}{\tan 73^\circ} = \frac{143,4}{\tan 73^\circ} = 43,8 \text{ m} \quad (5.137)$$

$$b = 450 - a = 450 - 43,8 = 406,2 \text{ m} \quad (5.138)$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{h}{b}\right) = \arctan\left(\frac{143,4}{406,2}\right) = 19,4^\circ \quad (5.139)$$

$$r_1 = \frac{h}{\sin \beta_1} = \frac{143,4}{\sin 19,4^\circ} = 431,7 \text{ m} \quad (5.140)$$

Aurreko balio horiek ez ezik, uhin-luzera ere beharko dugu, (5.141) adierazpenean jaso. Hori kalkulatzeko, sakonera mugagabeko uhin-luzera (5.133) eta sakonera erlatiboan taula erabiliko ditugu, eranskineko E.7 taula baliatuz. Ikus portuaren eremua bitarteko uretan dagoela, d/L balioa baitago sakonera murriztuaren eta mugagabearen artean. Horrela, distantziaren eta uhin-luzeraren erlazioa kalkula

dezakegu, 5.142 adierazpena, difrakzio-koefizientea kalkulatzeko beharko duguna.

$$\frac{d_1}{L_o} = \frac{10}{156,1} = 0,0641 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \quad \frac{d_1}{L_1} = 0,1082 \quad \Rightarrow \quad L_1 \approx 92 \text{ m} \quad (5.141)$$

$$\frac{r_1}{L_1} = \frac{431}{92} = 4,7 \approx 5 \quad (5.142)$$

Bestalde, uhinak dikearekiko osatzen duen eraso-angelua ere behar dugu difrakzioa zehazteko. Hala ere, aurreko atalean kalkulatu ditugun angeluak, 5.4. taulako bigarren zutabekoak, ez dira difrakzioaren kalkulurako behar ditugunak, lehengoak kostaren noranzkoarekiko kalkulatuak baitziren. Beraz, 5.7. irudiko eskema erabiliz kalkulatuko ditugu noranzko berriak.

Horrela, kosta $\overline{P_1P_2}$ lerrokaduraren paraleloa dela kontuan hartuz, honako erlazio hau beteko da α dikearekiko eta θ kostarekiko eraso-angeluak direla kontuan hartuz: $\alpha = \theta + 90^\circ$. Kontuan izan N noranzkoarentzako θ angelua negatiboa dela. Horrela, bada, 5.5. taulan jaso dira lehen difrakzio-koefizientearen kalkulak.

5.5. taula. K_{D_1} koefizienteen kalkularen laburpena.

	θ_{P_1} graduak	α_{P_1} graduak	β_1 graduak	r_1/λ	K_{D_1}
WNW	28	118	20	5	0,08
NW	19	109	20	5	0,09
NNW	7	97	20	5	0,10
N	-8	82	20	5	0,11

Bigarren difrakzio-koefizienteak badu berezitasun bat, eraso-angeluak berdinak direla guztientzat, P_3 puntura iristen diren olatuak P_1 puntutik baitatoz zuzenean. Eraso-angelua (5.143) ekuaziokoa da, eta P_3 punturainoko distantzia eta angelua (5.144) eta (5.145) adierazpenetan jasotakoak. Hala, kontuan harturik uhin-luzera ez dela aldatzen portu barruan, r/L koefizientea (5.146) adierazpenekoa izango da. Beraz, datuk horiekin, bigarren difrakzio-koefizientea, noranzko guztientzat $K_D = 0,30$ izango da, eranskineko E.8 taulatik lortua.

$$\alpha_2 = 180^\circ - (73^\circ + \beta_1) = 88^\circ \quad (5.143)$$

$$r_2 = \sqrt{50^2 + 50^2} = 70,7 \text{ m} \quad (5.144)$$

$$\beta_2 = 45^\circ \quad (5.145)$$

$$\frac{r_2}{L_2} = \frac{70,7}{92} = 0,77 \quad (5.146)$$

Horrela, noranzko bakoitzari dagokion difrakzio-koefizientea lortzeko bi difrakzio-koefizienteak biderkatu beharko ditugu, (5.147) eta (5.150) arteko adierazpenetan eman moduan.

$$K_D^{W'NW} = K_{D_1}^{W'NW} \cdot K_{D_2} = 0,08 \cdot 0,30 = 0,024 \quad (5.147)$$

$$K_D^{NW} = K_{D_1}^{NW} \cdot K_{D_2} = 0,09 \cdot 0,30 = 0,027 \quad (5.148)$$

$$K_D^{N'NW} = K_{D_1}^{N'NW} \cdot K_{D_2} = 0,10 \cdot 0,30 = 0,030 \quad (5.149)$$

$$K_D^N = K_{D_1}^N \cdot K_{D_2} = 0,11 \cdot 0,30 = 0,033 \quad (5.150)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Portuaren erabilgarritasun-azterketa egiteko, lehenik, buian gainditu ezin daitezkeen olatu-altuerak finkatu beharko ditugu. Horrela, aplikatu daitezke 5.1. taulan ditugun banaketa-funtzioen datuak, eta olatu-altuera horiek gainditzearen probabilitatea zehaztu.

Beraz, lehen pausuan, P_5 puntuan 0,4 m dituen olatuari buian zer altuera dagokion finkatu beharko dugu. Horretarako, $H_{P_3} = K_D \cdot H_{P_1}$ eta $H_{P_1} = K_{rs}^{b \rightarrow P_1} \cdot H_b$ adierazpenak izango ditugu kontuan. Emaizak 5.6. taulan laburbildu dira. Beraz, azken zutabeko H_b altuerak dira buian gainditu ezin daitezkeenak; altuera horiek gaindituz gero, portuan 0,4 m gaindituko lirateke.

Buiako altuerak izanda eta enuntziatuan emandako banaketa-funtzioen datuekin kalkula daiteke geldirik egoteko probabilitatea zein den, (5.151) adierazpenarekin. Horretarako, noranzko bakoitzaren ondorioz geldirik egoteko probabilitatea kalkulatu behar dugu, (5.152) adierazpenaren arabera. Gogoan izan aipatzen ez diren noranzkoei dagozkien ekaitzak ez ditugula kontuan hartu, eta, beraz, horiek ez dutela portuaren gelditzerik eragingo.

5.6. taula. K_{D_1} koefizienteen kalkuluaren laburpena.

	H_{P_5} m	K_D	H_{P_1} m	$K_{rs}^{b \rightarrow P_1}$	H_b m
WNW	0,4	0,024	16,7	0,87	19,2
NW	0,4	0,027	14,8	0,98	15,1
NNW	0,4	0,030	13,3	1,03	12,9
N	0,4	0,033	12,1	1,02	11,9

$$P_{geldirik} = \sum P_{geldirik}^i \cdot P_i \quad (5.151)$$

$$P_{geldirik}^i = \exp \left(- \left(\frac{H_s - A}{B} \right)^C \right) \quad (5.152)$$

Horrela, (5.153) eta (5.156) arteko ekuazioekin, olatuek buian altuera hori gainditzeko probabilitatea oso txikia dela ikus daiteke. Ondorioz, ez da beharrezkoa frekuentziak aplikatzea, portua urte osoan egongo baita erabilgarri baldintza horietan.

$$P^{WNW}(H_s > 19,2) = \exp \left(- \left(\frac{19,2 - 2,40}{0,16} \right)^{1,66} \right) = 0 \quad (5.153)$$

$$P^{NW}(H_s > 15,1) = \exp \left(- \left(\frac{15,1 - 1,89}{0,17} \right)^{1,53} \right) = 0 \quad (5.154)$$

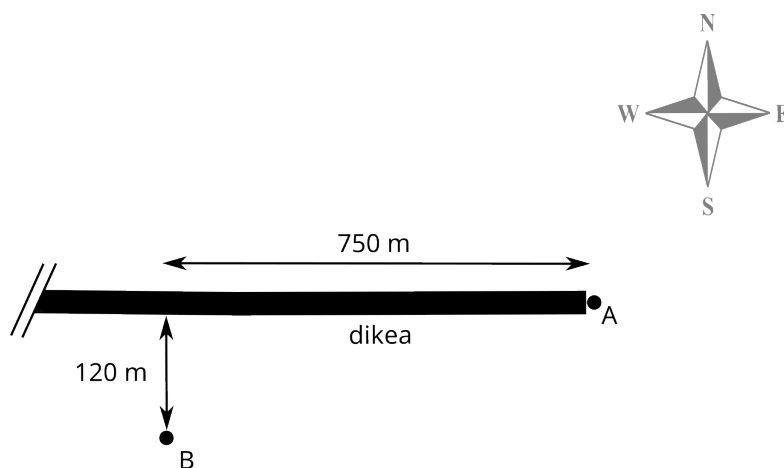
$$P^{NNW}(H_s > 12,9) = \exp \left(- \left(\frac{12,9 - 0,87}{0,43} \right)^{0,96} \right) = 2,3 \times 10^{-11} \approx 0 \quad (5.155)$$

$$P^N(H_s > 11,9) = \exp \left(- \left(\frac{11,9 - 0,81}{0,40} \right)^{0,95} \right) = 1,2 \times 10^{-10} \approx 0 \quad (5.156)$$

5.9. Gijóngo portuan olatuen azterketa⁹

Gijónen kokaturik dagoen ezponda-dike batentzako hutsegiterako arrisku maximoa 0,3 dela finkatu du obraren jabeak. Bestalde, obraren bizitza-balioa 15 urtekoa dela zehaztu da.

Dikearen bi puntutan olatuen kalkulu-altuera zehaztu nahi da, A eta B puntuetan, hain zuzen ere. A puntua dike-muturrean dago, eta B puntua atrakatze-buia batean, aurrekoaren babesean, 5.8. irudian ikus daitekeen bezala.



5.8. irudia. Ezponda-dikea eta A zein B puntuen eskema.

Batimetriak EW noranzkoa du, eta kostarekiko paraleloa da buiaren eta kostaren arteko tartean; aldiz, ezezaguna da plano buiatik itsaso mugagabera. A zein B puntuen sakonera 10 m da eta buiarena 23 m, bata zein bestea portuaren zero puntuarekiko. Sakonera biak itsasbehera bizi ekinokzialetako datuei dagozkie, eta marea-bitartea edo anplitudea 5,6 metrokoa dela joko da.

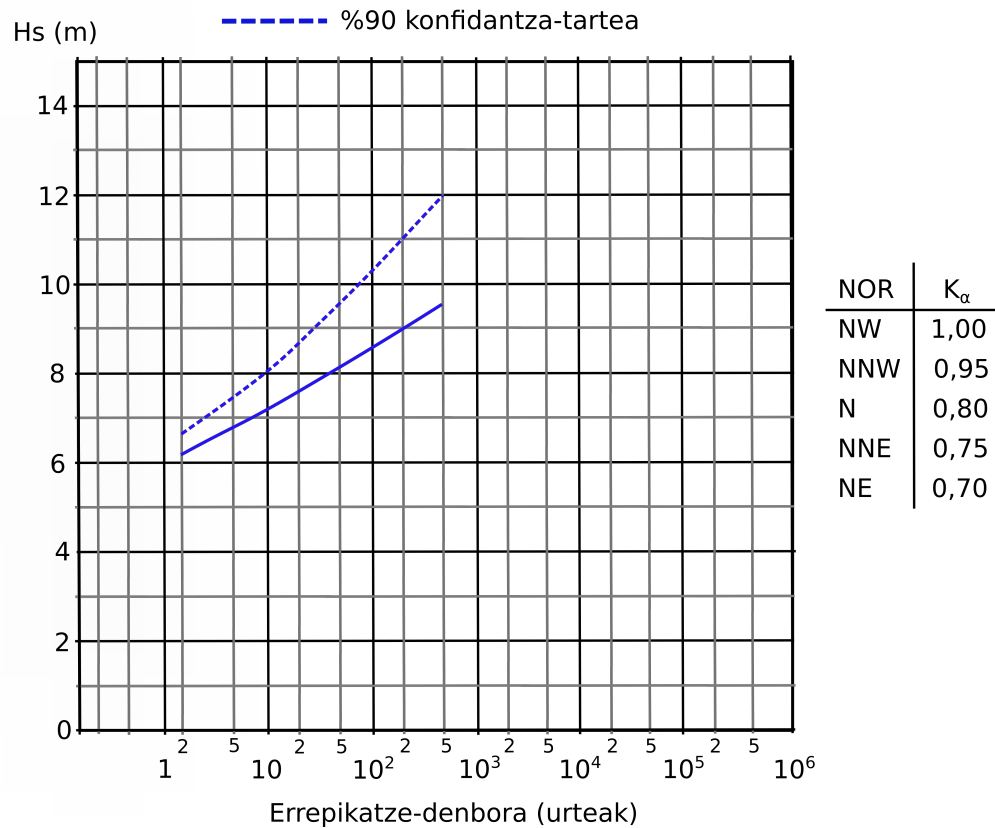
Lehendik egina dagoen olatuen azterketa bati esker, badakigu olaturik okerrenak ipar-mendebaldetik (NW) edo iparraldetik (N) etor daitezkeela eta beste noranzkoak baztergarriak direla. Kasu bietan, olatuaren periodoa 18 segundokoa da. Kalkulurako erabiliko den ekaitzaren olatu-altuera esanguratsua aukeratzeko 7.3. irudiko doikuntzarik hoberenaren kurba baliatuko da. Difrakzioa aztertzeko 5.10. irudiko nomograma erabiliko da, hala badagokio.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu olatu-altuera esanguratsua buian, bi noranzko posibleentzat.

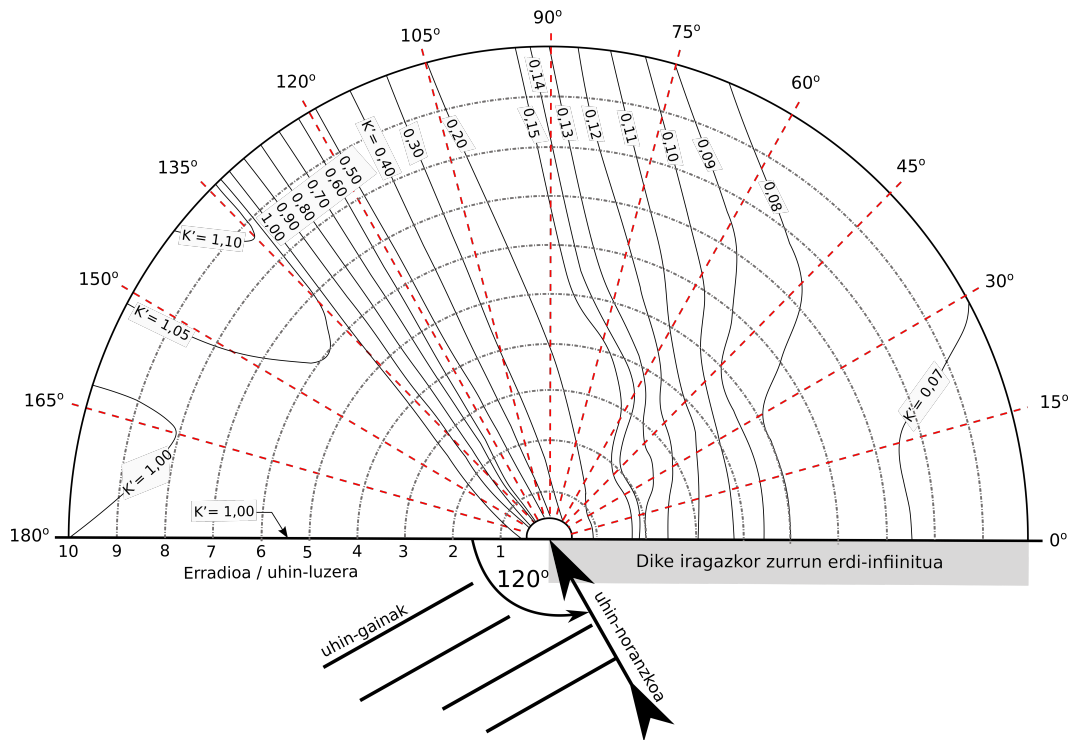
⁹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2020-01-13), ohikoaren 2. ariketa.

GIJÓNGO BUIA MUTURREKO EGOERAREN BANAKETA ESKALARRA



5.9. irudia. Muturreko erregimena Gijóngo buian (ROM-03.91).

- (b) Zehaztu buiaren eta A puntuaren arteko barreiatze-koefizientea (K_{rs}), bi noranzkoentzat.
- (c) Kalkulatu olatuaren altuera eta noranzkoa A puntuan, bi noranzkoentzat.
- (d) Zehaztu ea noranzkoren batek galarazten duen atrakatzea, baldin eta B puntuan atrakatzen duten ontzien mugako lan-baldintza bada 0,9 metroko olatua-altuera.
- (e) Kalkulatu B puntuan olatuen angelua dikearen noranzkoarekiko.
- (f) Kalkulatu, ekaitzaren noranzko bakoitzarentzat, zenbat denbora behar duen olatuak A puntutik B puntura iristen itsasbeheran.



5.10. irudia. Dike erdi-infinitu iragazkor eta zurrunean difrakzio-koefizienteen balioak, eraso-angelua 120° denean (CERC, 1984).

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Lehenik, arrisku-maila eta balio-bizitza horiei dagokien errepikatze-denbora zehaztu beharko dugu. Horretarako (5.157) adierazpena erabiliko dugu. Horrela, obrari dagokion errepikatze-denbora (5.158) ekuazioak emandakoa litzateke.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{L_f} \tag{5.157}$$

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - E)^{L_f}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,3)^{1/15}} = 42,6 \text{ urte} \tag{5.158}$$

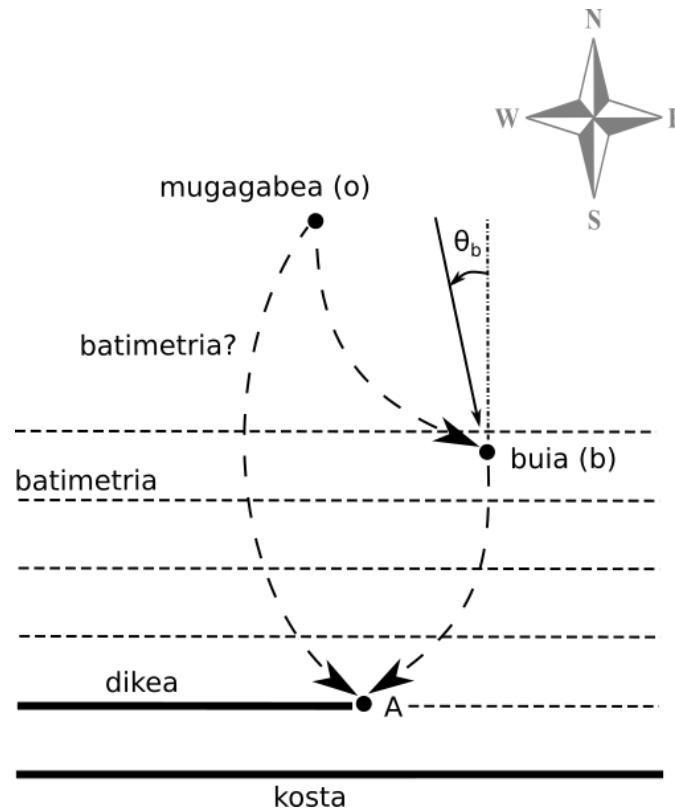
Errepikatze-denbora horrekin, eta Gijóngo buian eskuragarri dauden datuekin (7.3. irudikoak), errepikatze-denbora horri dagokion olatu-altuera zehaztu daiteke. Altuera hori $H_b \approx 8,0\text{m}$ da doikuntzarik hobenarentzat (irudiko lerro jarraitua). Olatu-altuera horri *noranzkotasun-koefizientea* biderkatu behar zaio, 7.3. irudiko K_α . Gure kasuan, koefiziente horiek 0,80 eta 1,00 balioko dute, N eta NW

noranzkoetarako, hurrenez hurren. Beraz, bilatzen ari garen altuerak (5.159) eta (5.160) ekuazioetan emandakoak dira.

$$H_b^N = K_\alpha^N \cdot H_b^N = 0,80 \cdot 8,0 \text{ m} = 6,4 \text{ m} \quad (5.159)$$

$$H_b^{NW} = K_\alpha^{NW} \cdot H_b^N = 1,00 \cdot 8,0 \text{ m} = 8,0 \text{ m} \quad (5.160)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Lehenik, pentsa daiteke buiako datuak ezagutuz barreia daitezkeela olatuaren ezaugarriak sakonera mugagabera eta, handik, A puntura (ikus 5.11. irudiko eskema). Hori egin eta dagozkion K_{rs} koefizienteak kalkulatzeko, baina, batimetria kostarekiko paraleloa dela jo beharko genuke sakonera mugagabetik A puntura, eta hori soilik gertatzen da buiaren eta A puntuaren artean.



5.11. irudia. Kosta, dikea, buia, A puntua eta batimetriaren eskema.

Hori dela eta, barreiatze-koefizienteak buiatik A puntura kalkulatu behar dira; hau da, ezin dira buiatik sakonera mugagabera barreiatu eta handik A puntura. Hor-

taz, buiatik (b) dikera (A) barreiatze-koefizienteak kalkulatzeko erabiliko ditugun adierazpenak (5.161) eta (5.162) dira.

$$K_s^{b \rightarrow A} = \sqrt{\frac{C_{g,b}}{C_{g,A}}} \quad (5.161)$$

$$K_r^{b \rightarrow A} = \sqrt{\frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_A}} \quad (5.162)$$

Orain, aipaturiko formuletak aldagaiak kalkulatu aurretik, kalkuluak zer egoeratan egingo diren zehaztu beharko da; hots, itsas maila zein den zehaztu beharko da, kasu bakoitzari dagokion sakonera finkatu ahal izateko. Sakonerak portuaren zero puntuarekiko emanik daude, eta itsasbehera-egoerari dagozkio; beraz, itsasbeherako sakonerei marea-anplitudea gehituko diegu itsasgorako egoeran sakonera zehazteko. Horrela, A puntuko sakonera 15,6 m izango da itsasgoran, eta buiakoa 28,6 m.

Gure kasuan, olatu-altuera handiagoak kaltegarriagoak izango direnez dikearen diseinuan, $K_{rs}^{b \rightarrow A}$ handiena ematen duen itsas maila aukeratu beharko da. Aurreikus daiteke *shoaling*ak eragin handiagoa izango duela sakonera zenbat eta txikiagoa izan; beraz, itsasbeherari dagokion egoera okerragoa izango da. Errefrakzioa, al-diz, noranzkoaren arabera izango da; iparraldeko olatuei gutxiago eragingo dien arren. Edonola ere, sakonera biak aztertuko ditugu atal honetan, alde ikusteko. Aipaturiko $K_{rs}^{b \rightarrow A}$ koefizienteak kalkulatzeko *shoaling*aren eta errefrakzioaren eraginak kalkulatu ditugu, bakoitza bere aldetik.

Lehenik, *shoaling*-koefizienteak kalkulatu ditugu, (5.166) eta (5.167) adierazpenen arabera. Horretarako, buian eta A puntuan multzo-bizkortasunak behar ditugu, eta aurretik uhin-luzerak zehaztu. Uhin-luzerak kalkulatzeko, eranskineko E.7 taulak baliatu ditugu, (5.163) adierazpenean. Ondoren, uhin-bizkortasuna (5.164) adierazpenarekin kalkulatu dugu, eta multzo-bizkortasuna (5.165) adierazpenetan erakusten den moduan.

$$\frac{h_A^{10m}}{L_o} = \frac{10}{505,9} = 0,01977 \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \frac{h_A^{10m}}{L_A^{10m}} = 0,05728 \Rightarrow L_A^{10m} = 174,6 \text{ m} \quad (5.163)$$

$$C_A^{10m} = \frac{L_A^{10m}}{T} = \frac{174,6}{18} = 9,70 \text{ m/s} \quad (5.164)$$

5.7. taula. Uhinaren ezaugarriak dikean (A) zein buian (b), itsasbeherari zein itsasgorari dagozkien itsas sakonera ezberdinetan (h).

<i>aldagaia</i>	<i>unitateak</i>	<i>A</i> (dikea)		<i>b</i> (buia)	
h	m	10	15,6	23	28,6
d/L	-	0,057 28	0,072 40	0,089 33	0,100 84
L	m	174,6	215,5	257,5	283,6
C	ms ⁻¹	9,70	11,97	14,30	15,76
C _g	ms ⁻¹	9,30	11,22	13,00	13,99

$$\begin{aligned}
 C_{g,A}^{10\text{m}} &= \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{4\pi \cdot d_A^{10\text{m}} / L_A^{10\text{m}}}{\sinh(4\pi \cdot d_A^{10\text{m}} / L_A^{10\text{m}})} \right] \cdot C_A^{10\text{m}} & (5.165) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{4\pi \cdot 10 / 174,6}{\sinh(4\pi \cdot 10 / 174,6)} \right] \cdot 9,70 = 9,30 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Emandako kalkuluek *A* puntuko multzo-bizkortasuna soilik kalkulatzeko balio dute, sakonera 10 metrokoa denean. Itsasgoran eta buiako datuak ez ditugu hemen errepikatuko; emaitzak 5.7. taulan jaso dira.

Hala, taulako datuekin, kalkula daiteke *shoaling*-koefizientea itsas mailaren bi egoeretan. Beraz, (5.166) eta (5.167) ekuazioetan ikus daitekeen bezala, koefiziente hori handiagoa da itsasbehera-egoeran.

$$[K_s^{b \rightarrow A}]_{itsasbehera} = \sqrt{\frac{C_{g,b}^{23\text{m}}}{C_{g,A}^{10\text{m}}}} = \sqrt{\frac{13,00}{9,30}} = 1,18 \quad (5.166)$$

$$[K_s^{b \rightarrow A}]_{itsasgora} = \sqrt{\frac{C_{g,b}^{28,6\text{m}}}{C_{g,A}^{15,6\text{m}}}} = \sqrt{\frac{13,99}{11,22}} = 1,12 \quad (5.167)$$

Bestalde, errefrakzioaren eragina kontuan hartzeko eta *A* puntuan olatuek izango duten noranzkoa zehazteko, Snell legea aplikatuko dugu *A* eta *b* puntuen artean, (5.168) adierazpenarekin, ezaguna baita *b* puntuan olatuek duten noranzkoa (buian neurtua, hain zuzen ere). Hala, 5.11. irudian erakusten den moduan, olatuen angeluak kostaren noranzkoarekiko $\theta_b^N = 0^\circ$ eta $\theta_b^{NW} = 45^\circ$ izango dira.

$$\frac{C_b}{\sin \theta_b} = \frac{C_A}{\sin \theta_A} \Rightarrow \theta_A = \arcsin \left(\frac{C_A}{C_b} \cdot \sin \theta_b \right) \quad (5.168)$$

Oraingoan ere, *shoaling*-koefizientearekin gertatzen zen bezala, ur-mailak eragina du koefizienteen balioan, uhinaren bizkortasunak eragina baitu. Uhin-bizkortasun hori, hain zuzen ere, uhin-luzeraren menpe dago zeina sakonerarekin aldatzen baita. Angeluen kalkulua (5.169), (5.170), (5.171) eta (5.172) ekuazioetan jasotakoa da.

$$[\theta_A^N]_{itsasb.} = \arcsin \left(\frac{C_A^{10\text{m}}}{C_b^{23\text{m}}} \sin \theta_b^N \right) = \arcsin \left(\frac{9,70}{14,30} \sin 0^\circ \right) = 0^\circ \quad (5.169)$$

$$\begin{aligned} [\theta_A^{NW}]_{itsasb.} &= \arcsin \left(\frac{C_A^{10\text{m}}}{C_b^{23\text{m}}} \sin \theta_b^{NW} \right) \\ &= \arcsin \left(\frac{9,70}{14,30} \sin 45^\circ \right) = 28,7^\circ \end{aligned} \quad (5.170)$$

$$[\theta_A^N]_{itsasg.} = \arcsin \left(\frac{C_A^{15,6\text{m}}}{C_b^{28,6\text{m}}} \sin \theta_b^N \right) = \arcsin \left(\frac{11,97}{15,76} \sin 0^\circ \right) = 0^\circ \quad (5.171)$$

$$\begin{aligned} [\theta_A^{NW}]_{itsasg.} &= \arcsin \left(\frac{C_A^{15,6\text{m}}}{C_b^m} \sin \theta_b^{NW} \right) \\ &= \arcsin \left(\frac{11,97}{15,76} \sin 45^\circ \right) = 32,5^\circ \end{aligned} \quad (5.172)$$

Horrela, angelu horiekin noranzko eta itsas maila bakoitzari dagokion $K_r^{b \rightarrow A}$ koefizienteak kalkula daitezke (5.162) adierazpenarekin. Emaitzak (5.173), (5.174), (5.175) eta (5.176) adierazpenetan jasoak daude. Bagenekien moduan, ez zen kalkulatzea beharrezkoa, N noranzkoa duten olatuen koefizientea 1,00 da; hau da, errefrakzioak ez dio olatu-altuerari eragiten kostarekiko elkarzutak diren uhinetan.

$$[K_r^{b \rightarrow A}]_{itsasbehera}^N = \sqrt{\frac{\cos \theta_b^N}{(\cos \theta_A^N)_{itsasbehera}}} = \sqrt{\frac{\cos 0^\circ}{\cos 0^\circ}} = 1,00 \quad (5.173)$$

$$[K_r^{b \rightarrow A}]_{itsasbehera}^{NW} = \sqrt{\frac{\cos \theta_b^{NW}}{(\cos \theta_A^{NW})_{itsasbehera}}} = \sqrt{\frac{\cos 45^\circ}{\cos 28,7^\circ}} = 0,90 \quad (5.174)$$

$$[K_r^{b \rightarrow A}]_{itsasgora}^N = \sqrt{\frac{\cos \theta_b^N}{(\cos \theta_A^N)_{itsasgora}}} = \sqrt{\frac{\cos 0^\circ}{\cos 0^\circ}} = 1,00 \quad (5.175)$$

$$[K_r^{b \rightarrow A}]_{itsasgora}^{NW} = \sqrt{\frac{\cos \theta_b^{NW}}{(\cos \theta_A^{NW})_{itsasgora}}} = \sqrt{\frac{\cos 45^\circ}{\cos 32,3^\circ}} = 0,91 \quad (5.176)$$

Beraz, erabiliko ditugun koefizienteak K_s eta K_r koefizienteen biderkadurarik handiena ematen diguten egoerari dagozkionak izango dira; hau da, itsasbeherako egoerari dagozkionak. Ikus, hala ere, itsasgorari dagokion errefrakzio-koefizientea zertxobait handiagoa dela itsasbeherakoa baino ipar-mendebaldeko olatuetan. Edonola ere, *shoalingaren* eragina handiagoa denez, itsasbeherari dagokio eragin orokorrik handiena. Horrela lortuko ditugu noranzko bakoitzari dagozkion K_{rs} koefizienteak, (5.177) eta (5.178) ekuazioetan jaso bezala.

$$[K_{rs}^{b \rightarrow A}]^N \equiv [K_{rs}^{b \rightarrow A}]_{itsasbehera}^N = 1,18 \cdot 1,00 = 1,18 \quad (5.177)$$

$$[K_{rs}^{b \rightarrow A}]^{NW} \equiv [K_{rs}^{b \rightarrow A}]_{itsasbehera}^{NW} = 1,18 \cdot 0,90 = 1,06 \quad (5.178)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Olatuen noranzkoak kalkulatuak ditugu jada aurreko atalean. Koefizienteak itsasbehera-egoerari dagozkionez, noranzkoak ere horiek izango dira: $\theta_A^N = 0^\circ$ eta $\theta_A^{NW} = 28,7^\circ$. Aldiz, olatu-altuerak (5.179) eta (5.180) ekuazioetan jasotakoak izango dira.

$$H_A^N = [K_{rs}^{b \rightarrow A}]^N \cdot H_b^N = 1,18 \cdot 6,4 = 7,55 \text{ m} \quad (5.179)$$

$$H_A^{NW} = [K_{rs}^{b \rightarrow A}]^{NW} \cdot H_b^{NW} = 1,06 \cdot 8,0 = 8,48 \text{ m} \quad (5.180)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Dikearen babeseko puntu batean olatuaren altuera kalkulatzeko, uhinen difrakzioa hartuko dugun kontuan; hau da, A eta

Datu horiekin guztiekin enuntziatuko 5.10. irudian jasotako nomograman sar gintezke, eta difrakzio-koefizientearen balioa kalkulatu ipar-mendebaldeko noranzkoan. Gogoan izan emandako nomograma soilik balia daitekeela eraso-angelua 120° denean; beraz, N noranzkoan eranskineko E.8 taula baliatuko dugu. Azken horretan, horretarako sortuak diren tauletan egin daiteke kontsulta.

$$\text{Eranskineko E.8 taula} \quad \Longrightarrow \quad K_D^N = 0,12 \quad (5.185)$$

$$\text{5.10. irudiko nomograma} \quad \Longrightarrow \quad K_D^{NW} = 0,09 \quad (5.186)$$

Azkenik, koefizientearekin eta olatu-altuerarekin B puntuan olatuek duten altuera kalkula daiteke, (5.187) eta (5.188) ekuazioetan jaso den moduan. Emaitzek erakusten duten moduan, iparraldeko olatuekin ezingo litzateke atrakatzerik gauzatu, altuerak mugako baldintza gainditzen baitu. Aipatu ez den arren, itsasgora ere azter daiteke, baina olatuak txikiagoak liratekeenez ez litzateke mugako baldintzarik gaindituko.

$$H_B^N = K_D^N \cdot H_A^N = 0,12 \cdot 7,55 = 0,91 \text{ m} \quad (5.187)$$

$$H_B^{NW} = K_D^{NW} \cdot H_A^{NW} = 0,09 \cdot 8,48 = 0,76 \text{ m} \quad (5.188)$$

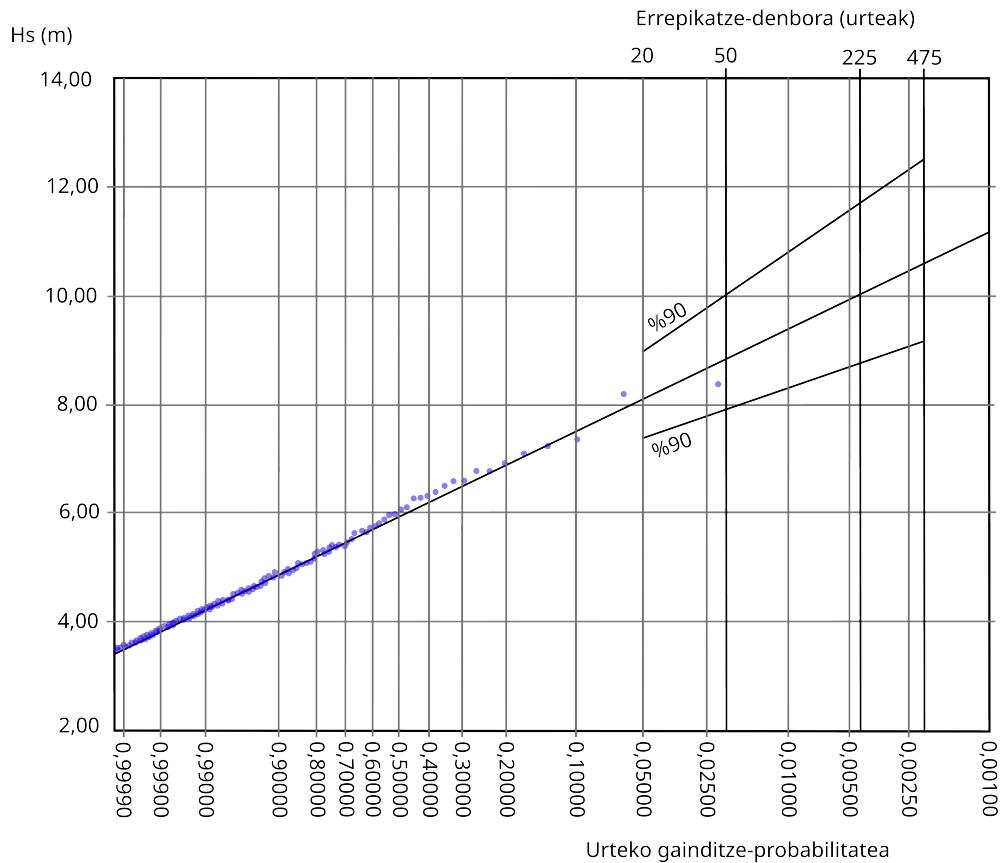
ARIKETAREN EBAZPENA (e). Olatuak B puntuan duen noranzkoa \vec{AB} bektoreak emandakoa da. Ondorioz, olatuak dikearekiko osatzen duen angelua aurreko atalean kalkulatu den β berbera litzateke.

ARIKETAREN EBAZPENA (f). Portu barruan edo dikearen babesean sakonera konstantea dela jotzen badugu, A puntuan olatuak duen bizkortasuna litzateke uhinak duen abiadura B punturaino, ez bailitzateke aldatuko. Gogoratu itsasbeherako egoera aukeratu dugula hemen ere. Beraz, (5.189) ekuazioan emandakoa da bi puntu horien arteko distantzia egiteko beharko duen denbora.

$$t = \frac{r}{C_A^{10\text{m}}} = \frac{759,5}{9,70} = 78,3 \text{ s} \quad (5.189)$$

da. Edonola ere, noranzkoen erregimena zehazteko, *ROM 0.3-91 – Itsas Klima: Olatuak* gomendioan jasotako informazioa erabili beharko da, han agertzen dira eta noranzkoen banaketa-koefizienteak, K_α , baita sakonera mugagabetik buiarainoko barreiatze-koefizienteak ere; koefiziente horiek 5.4. iruditik har daitezke.

BILBOKO BUIA (1985-2012)
MUTURREKO UHINEN BANAKETA ESKALARRA



5.14. irudia. 53 metroko sakoneran dagoen Bilboko buiaren muturreko erregimen eskalarra, 1985-2012 epean.

Honako hau eskatzen da:

- Definitu zer uhin-periodo tarterako jo daitekeen buia ur-sakonetan dagoela.
- Lortu olatu-altuera adierazgarria sakonera mugagabeen, kontuan hartuta olatuen noranzko guztiak.
- Aurreko ataleko emaitzak kontuan hartuta eta teoria lineala erabiliz, kalkulatu olatu-altuera adierazgarria Luzeroko dike-muturrean noranzko guztie-

tarako, jakinik mutur pareko sakonera 35 metro dela. Batimetria zuzena eta paraleloa dela joko dugu, eta kostaren noranzkoa *NNE* dela. Sinplifikatzeko, sakonera mugagabeko noranzkoak buiakoak direla joko dugu.

- (d) Zehaztu, noranzko bakoitzerako baita ere, olatu-altuera adierazgarria Sollanako dike berriaren muturrean. Luzeroko muturra eta Sollanako lotzen dituen bektorea, 5.14. irudian adierazia, 1620 metro luze da, eta 60° osatzen ditu Luzeroko dike-lerroarekin. Sakonera konstantea dela joko da Luzero puntak babesturiko eremuan. Difrakzioa aztertzeke taulan ez da beharrezkoa balioak interpolatzerik, hurbilen dauden balioak erabiliz.
- (e) Zer noranzko izango du Sollanako dikearen kalkuluan erabiliko den olatu-rikerenak? Zergatik? Zer olatu-altuera erabili beharko genuke dikea diseinatzeko?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Buia sakonera mugagabeen egoteko bete beharreko bi baldintzak (5.190) adierazpenean emandakoak dira. Beraz, (5.191) adierazpenekoa izango da periodoak bete beharreko baldintza.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d}{L} > \frac{1}{2} \\ L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \end{array} \right\} \Rightarrow 2 \cdot d > \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \quad (5.190)$$

$$\Rightarrow T < \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{g}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 53}{9,81}} = 8,24 \text{ s} \quad (5.191)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Sakonera mugagabeen olatu-altuera lortzeko, (5.192) adierazpena erabiliko dugu. Noranzko bakoitzari dagozkion altuerak zehazteko prozesua 5.8. taulan laburbildu da.

$$H_b \cdot K_\alpha = K_{rs}^{o \rightarrow b} \cdot H_o \quad \Rightarrow \quad H_o = \frac{K_{rs}^{o \rightarrow b}}{H_b \cdot K_\alpha} \quad (5.192)$$

Lehenik, buiako datuek emaniko olatu-altuera finkatu beharko dugu. Horretarako, enuntziatuak emandako muturreko erregimena baliatuko dugu (ikus 5.14. irudia), eta errepikatze-denborari dagokion altuera zehaztuko, (5.193) adierazpenean erakusten den moduan. Konfiantza-tarteari dagokionez, haren baliorik kaltegarriena hartuko dugu diseinuaren ikuspuntutik.

$$T_r = 225 \text{ urte} \xrightarrow[\text{konfidantza-tartea}]{\%90} H_b \approx 11,5 \text{ m} \quad (5.193)$$

Bestalde, olatu-altuera horri dagokion periodoa zehazteko, *ROM 0.3-91* gidak Bioboko buian emandako erlazioa erabiliko dugu (5.194). Edonola ere, erlazio horretatik lorturiko goi-muga, 28,8 s, murriztu egingo dugu, ROM gomendioak goi-muga 22 s dela esaten digu eta. Beraz, olatuen periodoa 17 eta 22 segundo artekoa izango da.

$$T_p = (5 \sim 8,5) \cdot \sqrt{H_s} = (5 \sim 8,5) \cdot 11,5 \text{ m} = (16,95 \text{ s} \sim 28,8 \text{ s}) \quad (5.194)$$

$$\implies T_p = (17 \text{ s} \sim 22 \text{ s})$$

Ondoren, noranzko bakoitzari dagokion barreiatze-koefizientea zehaztu beharko dugu, sakonera mugagabearen eta buiaren artean ($K_{rs}^{o \rightarrow b}$). Horretarako ere *ROM 0.3-91* gomendioan emandako 2.7.1 taula erabili da. Edonola ere, (5.194) ekuazioan emandako periodoen tartetik olatu-altuera handiena eragiten duen periodoa aukeratu beharko da, taulako azken aurreko zutabean emana. Horrenbestez, 5.8. taulako azken zutabean jaso dira sakonera mugagabeko olatu-altuera horiek.

5.8. taula. Olatuaren periodoa eta altuera sakonera mugagabearen, noranzko bakoitzarentzat.

Noranzkoa	H_b	K_α	$K_{rs}^{o \rightarrow b}$	T	H_o
—	m	—	—	s	m
NW	11,5	1,00	0,80	17	14,37
NNW	11,5	0,95	0,90	19	12,14
N	11,5	0,80	0,80	19	11,50
NNE	11,5	0,75	0,90	19	9,58
NE	11,5	0,70	0,83	19	9,70

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Luzeron (L) olatu-altuera zehazteko mugagabeko altuera puntaraino nola barreiatzen den aztertu beharko dugu, (5.195) erlazioaren arabera. Prozesua 5.9. taulan laburbildu da.

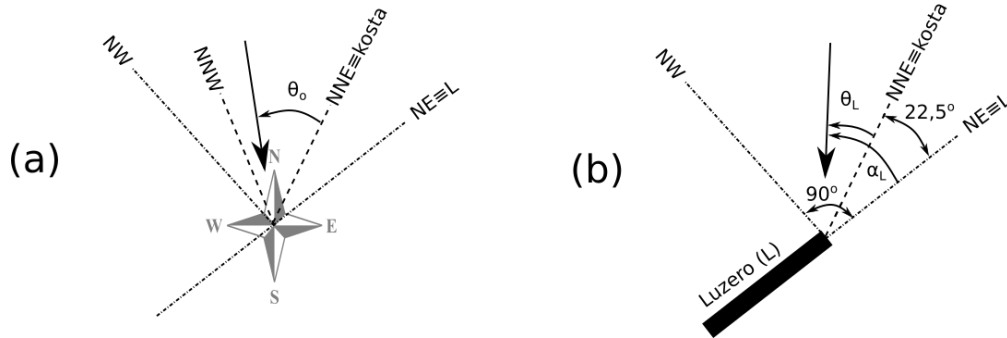
$$H_L = K_{rs}^{o \rightarrow L} \cdot H_o \quad (5.195)$$

Zehaztu behar dugun aldagaia $K_{rs}^{o \rightarrow L}$ da, sakonera mugagabeko altuera ezaguna baita. Horretarako, eranskineko E.2 irudian jasotako nomograma baliatuko dugu, mugagabeko eraso-angelua (θ_o) eta $d/(gT^2)$ koefiziente adimentsionala jakinik $K_{rs}^{o \rightarrow L}$ eta θ_L zehazteko aukera ematen baitu. Bi periodoko olatuak ditugunez, lehenik $d/(gT^2)$ koefizientea kalkulatu dugu periodo bakoitzarentzat, (5.196) eta (5.197) adierazpenetan jasoak.

$$T = 17 \text{ s} \implies \frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{35}{9,81 \cdot 17^2} = 0,0123 \quad (5.196)$$

$$T = 19 \text{ s} \implies \frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{35}{9,81 \cdot 19^2} = 0,00988 \approx 0,01 \quad (5.197)$$

Ondoren, θ_o zehaztu beharko dugu, noranzkoek kostarekiko osatzen duten angelua. Hala, kostaren noranzkoa *NNE* denez, θ_o finkatzeko iparrorratzeko noranzkoek kostarekiko osatzen duten angelua zehaztu behar da, 5.15. irudiko (a) eskemaren arabera. Enuntziatuan esan bezala, mugagabeko noranzkoan buiarenak direla joko dugu, baina gogoan izan noranzko horiek buian neurturikoak direla eta, ondorioz, mugagabeko noranzkoak kalkulatu egin beharko liratekeela errefrakzioa kontuan hartuta.



5.15. irudia. Noranzkoen eskema sakonera mugagabea (a) eta Luzeroko dike-muturrean (b).

Beraz, aipaturiko nomograman d/gT^2 eta θ_o balioekin sartuta $K_{rs}^{o \rightarrow L}$ eta θ_L lortuko ditugu, 5.9. taulako azken bi zutabeetan emanak. Hala, $K_{rs}^{o \rightarrow L}$ eta H_o biderkatuz, bilatzen ari garen olatu-altuera izango dugu, H_L hain zuzen ere.

5.9. taula. Olatuaren altuera Luzeron (L), noranzko bakoitzarentzat.

Noranzkoa	θ_o	H_o	T	d/gT^2	$K_{rs}^{o \rightarrow L}$	θ_L	H_L
—	m	m	s	—	—	°	m
NW	67,5	14,37	17	0,012	0,66	35	9,48
NNW	45	12,14	19	0,01	0,87	25	10,56
N	22,5	11,50	19	0,01	0,95	13	10,92
NNE	0	9,58	19	0,01	0,99	0	9,48
NE	22,5	9,70	19	0,01	0,95	13	9,21

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Sollanako muturrean (S) olatu-altuera kalkulatzeko, Luzerora (L) iristen diren olatuei difrakzioak portu barruan soilik eragiten diela hartuko dugu kontuan. Kalkulu-prozesua 5.10. taulan laburbildu da. Horretarako, aurreko atalean finkatu ditugun olatu-altuera eta haren noranzkoa izango dira oinarria, taularen bigarren eta hirugarren zutabeen emanak.

Dike baten difrakzioa zehazteko, olatuek haren luzapenarekiko osatzen duten angelua zehaztu behar da, α_L deitu duguna. Jada ezaguna den θ_L baliatuz kalkulatu daiteke α_L , 5.15. irudiko (b) eskema baliatuz. θ_L emana dagoenez kostaelkarzutarekiko (*NNE* norabidea), eta α_L Luzero puntarekiko (*NE* norabidea), (5.198) eta (5.199) ekuazioek emandakoa izango da α_L . Ekuazio horietan θ_L positiboa da ordulariaren kontrako noranzkoan.

$$\alpha_L = 22,5^\circ + \theta_L \quad \text{baldin eta} \quad \theta_L \subset (\text{NW, NNW, N, NNE}) \quad (5.198)$$

$$\alpha_L = 22,5^\circ - \theta_L \quad \text{baldin eta} \quad \theta_L \subset (\text{NE}) \quad (5.199)$$

Difrakzioa aztertzeke beharko den beste datua, Luzeroko muturretik Sollanako muturrera dagoen distantzia da, r deitua. Datu hori enuntziatuko irudian emana dator. Gainera, olatuek difrakzio-hasieran duten uhin-luzera ere beharko dugu. Horretarako, uhin-periodo bakoitzarentzako teoria lineala baliatuko dugu, (5.200) eta (5.201) adierazpenetan jaso bezala. Horrela, difrakzioa kalkulatzeko beste parametroa zehaztuko dugu, r/L .

$$\frac{d}{L_o} = \frac{d \cdot 2 \cdot \pi}{g \cdot T^2} = \frac{35 \cdot 2 \cdot \pi}{9,81 \cdot 17^2} = 0,0776 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.8} \quad \frac{d}{L} = 0,1205 \quad (5.200)$$

$$\implies L = \frac{d}{0,1205} = 290,5 \text{ m} \quad \implies \frac{r}{L} = 5,55$$

$$\frac{d}{L_o} = \frac{d \cdot 2 \cdot \pi}{g \cdot T^2} = \frac{35 \cdot 2 \cdot \pi}{9,81 \cdot 19^2} = 0,062 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.8} \quad \frac{d}{L} = 0,1063 \quad (5.201)$$

$$\implies L = \frac{d}{0,1063} = 329,6 \text{ m} \quad \implies \frac{r}{L} = 4,92$$

Luzero muturrarekiko difrakzio-puntuaren angelua ere enuntziatuko irudiak ematen du: 60° da. Hiru datu horiekin, α_L , r/L eta β , zehaztu daiteke difrakzio-koefizientea, K_D kasu bakoitzerako, balio horiek biltzen dituen taulak baliatuz. Difrakzio-koefizientea aplikatuz Luzero muturreko olatu-altuerei, $H_S = K_D \cdot H_L$, lortuko dugu bilatzen ari garen Sollana puntako olatu-altuera, 5.10. taulako azken zutabeen jasoa.

5.10. taula. Olatuaren altuera Sollanan (S), noranzko bakoitzarentzat.

Noranzkoa	H_L	θ_L	α_L	r	L	r/L	β	K_D	H_S
—	m	°	°	m	m	—	°	—	m
NW	9,48	35	57,5	1620	290,5	5,55	60	0,53	5,02
NNW	10,56	25	47,5	1620	329,6	4,92	60	1,01	10,66
N	10,92	13	35,5	1620	329,6	4,92	60	1,04	11,35
NNE	9,48	0	22,5	1620	329,6	4,92	60	1,04	9,85
NE	9,21	13	9,5	1620	329,6	4,92	60	1,03	9,48

ARIKETAREN EBAZPENA (e). 5.10. taulan ikus daitekeen moduan, *NW* noranzkorako izan ezik, Luzero puntak olatuen altueran ez du murrizpenik eragiten Sollanako muturrari dagokionez. Edonola ere, kalkulatu ditugun altueretan handiena aukeratuko genuke Sollanako dike berria diseinatzeko, hots, *N* noranzkoari dagokiona.

6. Olatu-indarrak

Kapitulu hau egituretan olatuen eragina aztertzen duen lehena izango da. Egitura bereziak aztertuko ditugu, piloteak edo hodiak. Olatuek egiturei eragindako indarrak aztertzeko modu bat teoria lineala baliatzea da, edo hartatik eratorritako adierazpenak. Adierazpen horiek diametro txikiko piloteei aplikatuta aztertuko dira atal honetan, dela pilote bertikal edo horizontaletan. Indar horren bi gai nagusiak landuko ditugu: herrestatze- eta inertzia-indarrak. Indar horiek uhin-fasearekin nola aldatzen diren aztertuko dugu, besteak beste.

6.1. Herrestatze-indarra zeharkako egituren¹

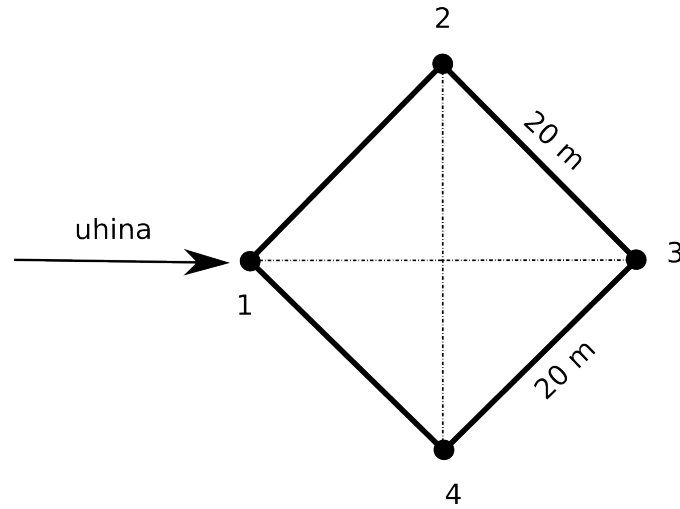
Itsas egitura bat 40 metroko sakoneran eraiki da. Egiturak sekzio errektangularra du, 6.1. irudiko 1-2-3-4 piloteei sortua, eta haren aldea 20 metrokoa da. Piloteen erradioa 1 m da. Egiturari 3 metroko altuera eta 80 metroko uhin-luzera duen olatu batek eragiten dio 1-3 ardatzaren noranzkoan.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu 2 piloteari olatuak eragiten dion inertzia-indar osoa. Horretarako, olatu-erasotzailearen gaina 1 puntuan dagoela joko da. Uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 dela joko da, eta inertzia-koefizientea 2,0.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Dagokion pilotean eragiten den inertzia-indar osoa zehazteko, (6.11) adierazpena baliatuko dugu. Edonola ere, egin behar duzun lehen gauza adierazpen hori erabil ote daitekeen egiaztatzea izango da; hau da, ea piloteak txikitat hartu daitezkeen ziurtatuko dugu. Horretarako, baldintza (6.1) adierazpenekoa da eta, (6.2) adierazpenak erakusten duen bezala, baldintza betetzen da.

¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2020-11-05), ohikoaren 2. ariketa.



6.1. irudia. Egituraren zeharkako sekzio horizontalaren eskema.

$$D < 0,15 \cdot L \quad (6.1)$$

$$2 \text{ m} < 0,15 \cdot 80 \text{ m} = 12 \text{ m} \quad \checkmark \quad (6.2)$$

Kalkula ditzagun, lehendabizi, uhin-zenbakia, uhin-maiztasuna eta periodoa, beharko ditugu eta. Uhin-zenbakia erraz finka daiteke uhin-luzera ezagututa; (6.3) adierazpenean jaso da. Maiztasun angeluarra kalkulatzeko, (6.4) adierazpeneko dispersio-erlazioa baliatuko dugu. Hala, (6.5) ekuazioko balioarekin, uhinaren periodoa ere zehaztu dezakegu, (6.6) adierazpenean emana.

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L} = \frac{2 \cdot \pi}{80} = 0,0785 \text{ m} \quad (6.3)$$

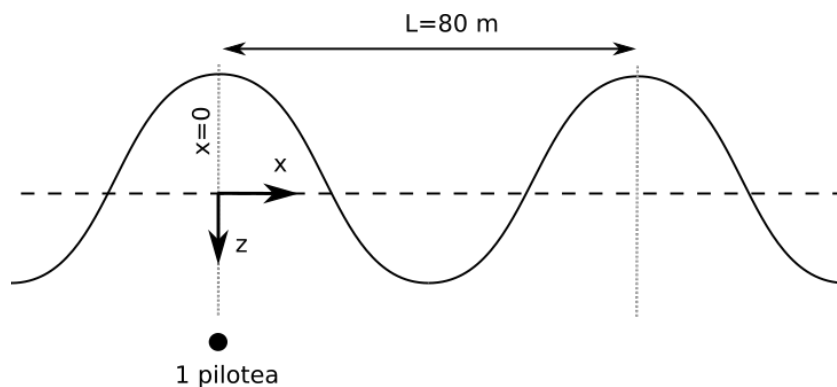
$$\omega = \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh k \cdot d} \quad (6.4)$$

$$= \sqrt{9,81 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{80} \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi}{80} \cdot 40 \right)} = 0,8761 \text{ rad/s} \quad (6.5)$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{0,8761} = 7,17 \text{ s} \quad (6.6)$$

Indarra bigarren pilotean eskatzen denez, kontuan hartu beharko dugu 2. piloteari eragiten dion uhin fasea, haren arabera izango baita piloteari eragiten zaion

indarra ere. Hori argitzeko, 6.2. irudian jaso da uhinaren eskema. Ikus daitekeen moduan, uhin-gaina 1 pilotearen parean dagoela dio enuntziatuak, eta horregatik dago x ardatzaren jatorrian.



6.2. irudia. Uhin-erasotzailearen ardatzen eskema.

Kontuan hartuta uhin-frontea 1-3 lerrokadurarekiko paraleloa dela, (6.7) adierazpenak emango liguke 1 eta 2 piloteen artean dagoen distantzia uhinaren noranzkoan. Hala, uhin-luzera osoari 2π radian dagozkiola jakinik, 2. pilotean dagoen uhin fasea zehaztu dezakegu, (6.8) adierazpenean jaso bezala.

$$d_{12} = \sqrt{\frac{20^2}{2}} = 14,14 \text{ m} \quad (6.7)$$

$$\theta_2 = \frac{14,14}{80} \cdot 2 \cdot \pi = 1,11 \text{ rad} \quad (6.8)$$

Indarra kalkulatzeko ur-gainazalaren posizioa ere zehaztu behar dugu, (6.9) adierazpenaren arabera. Posizio hori, 2. pilotean, uhin fasearen arabera izango da, zeina (6.10) ekuazioan emana baita.

$$\eta_2 = \frac{H}{2} \cdot \cos \theta_2 \quad (6.9)$$

$$\eta_2 = \frac{3}{2} \cdot \cos 1,11 = 0,67 \text{ m} \quad (6.10)$$

Azkenik, aipaturiko adierazpena baliatuko dugu indarra kalkulatzeko. Horretarako, lortu ditugun balioak ordezkatuko ditugu (6.12) ekuazioan erakusten den

moduan, eta indarraren balioa kalkulatuko dugu, (6.13) ekuazioan egin bezala. Indar negatiboak adierazten duena da indar horren noranzkoa, 6.2. irudian adierazitako x ardatzaren kontrako noranzkoa duela, alegia.

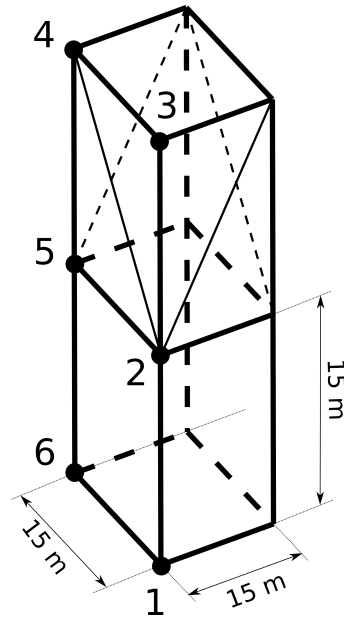
$$F_I = C_M \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (\omega^2 \cdot H) \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot k} \frac{\sinh(k \cdot (d + z))}{\sinh(k \cdot d)} \right]_{z=\eta} \cdot \sin \theta \quad (6.11)$$

$$= 2 \cdot 1025 \cdot \frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot (0,8761^2 \cdot 3) \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0,0785} \frac{\sinh(0,0785 \cdot (40 + 0,67))}{\sinh(0,0785 \cdot 40)} \right]_{z=\eta} \cdot \sin(1,11) \quad (6.12)$$

$$= 6440,3 \cdot 2,303 \cdot \left[\frac{1}{0,157} \cdot \frac{12,155}{11,530} \right] \cdot 0,896 = 89\,235 \text{ N} = 89,2 \text{ kN} \quad (6.13)$$

6.2. *Compliant Tower* elementu horizontala²

Petrolio-hobiak ustiatzeko hainbat motatako egiturak erabiltzen dira. Horieta-ko bat da *Compliant Tower* deiturikoa, egitura malgukoa. Hala, dorreak sareta malgua du, sakonera handiko zimenduekin. Alboko indar eta flexio handiak jasateko daude diseinatuak, eta elementu malguen erabilerak uhinen erresonantzia eta anplitudea murrizten dituzte.



6.3. irudia. Egituraren eskema.

6.3. irudiko dorreak 15 metroko karratua du oinarrian, eta 30 metroko altuera. Dorrearen zimendua 25 metroko sakoneran dago itsas gainazalaren azpitik (irudiko 1 eta 6 puntuak, besteak beste). Dorreari 6 metroko uhin-altuera eta 90 metroko uhin-luzera duen olatu batek eragiten dio. Eraso-olatu 1-3-4-6 planoarekiko elkarzuta da. Herrestatze- eta inertzia-koefizienteek, hurrenez hurren, 1,2 eta 1,5 balio dutela joko da. Aldiz, itsas uraren pisu espezifikoa $10,06 \text{ kN/m}^3$ dela joko da.

Honako hau eskatzen da:

- Kalkulatu egituraren 5-2 besoak jasango duen indar horizontala, baldin eta haren diametroa 0,6 metrokoa bada. Indarra $\omega t = 6$ den unean kalkulatu da (x ardatzaren jatorria 1-3 zutabearen dagoela joko da).

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2020-01-13), ohikoaren 1. ariketa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Diametro txikiko piloteetan eragindako indarra zehazteko (6.14) adierazpena erabiliko dugu, herrestatze (D) eta inertzia (I) indarren batura kontuan duena. Horretarako, baina, lehenik aztertzen ari gareen elementua diametro txikikoa ote den frogatu beharko da. Baldintza hori betetzen da: $D = 6 \text{ m} < 0,15 \cdot L = 0,15 \cdot 90 \text{ m} = 13,5 \text{ m}$.

$$f = f_D + f_I \quad (6.14)$$

$$f = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot A \cdot u \cdot |\vec{q}| + C_I \cdot \rho_W \cdot V \cdot \dot{u} \quad (6.15)$$

Horrela, indar biak kalkulatzeko behar diren aldagaiak (6.15) ekuazioan jasotakoak dira. Horietako batzuk zehazten errazak dira, edo datu bezala ematen zaizkigu, (6.16) eta (6.21) ekuazioen artekoak hain zuzen ere.

$$C_D = 1,2 \quad (6.16)$$

$$C_I = 1,5 \quad (6.17)$$

$$\rho_W = \frac{\gamma_W}{g} = \frac{10\,060 \text{ N/m}^3}{9,81 \text{ m/s}^2} = 1025 \text{ kg/m}^3 \quad (6.18)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} = 0,069\,813 \text{ rad/m} \quad (6.19)$$

$$A = 15 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 9 \text{ m}^2 \quad (6.20)$$

$$V = 15 \text{ m} \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{0,6 \text{ m}}{2} \right)^2 \right] = 4,24 \text{ m}^3 \quad (6.21)$$

Baina uhinaren periodoa ere behar dugu, uhinaren abiadurak eta azelerazio horizontala zehaztu ahal izateko (6.25), (6.26) eta (6.27) adierazpenen arabera. Horretarako uhinen dispertsio-erlazioa erabiliko dugu, (6.22) adierazpenekoa, uhinaren maiztasun angeluarra zehaztu eta periodoa finkatzeko (6.23) adierazpenaren arabera.

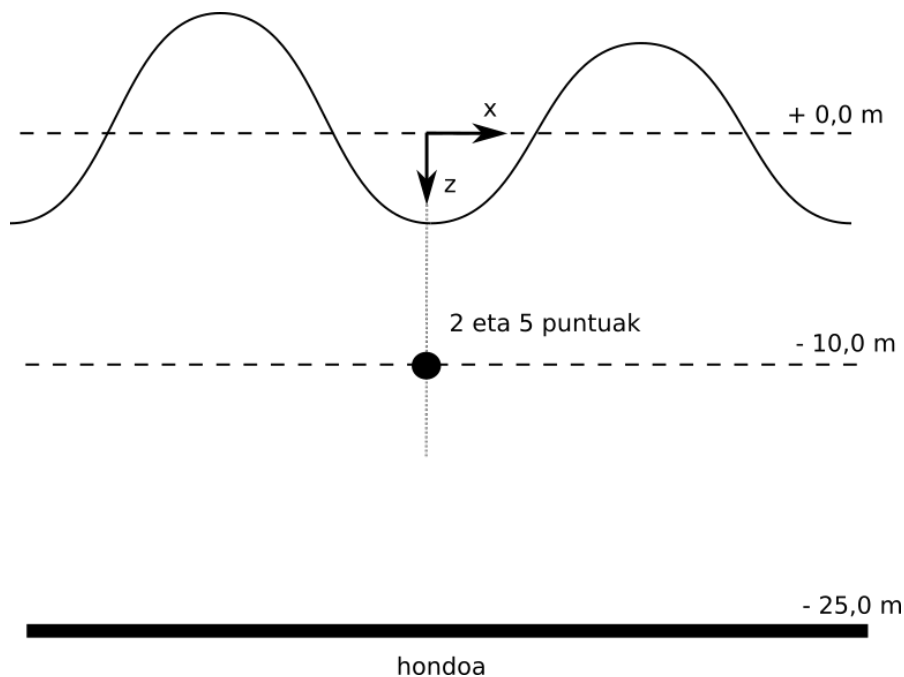
$$\omega = \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(kd)} \quad (6.22)$$

$$= \sqrt{9,81 \cdot 0,069813 \cdot \tanh(0,069813 \cdot 25)} = 0,8027 \text{ rad/s}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 7,83 \text{ s} \quad (6.23)$$

Gainera, aipaturiko (6.25), (6.26) eta (6.27) ekuazioetan uhinaren desfasea ere zehaztu behar da. Gure kasuan, enuntziatuak ωt zehazten du, eta x ardatzaren jatorria. Ardatzaren jatorria guk aztertu behar dugun elementuaren parean dagoenez, $x = 0$ izango da puntu horretan (ikus 6.4. irudiko eskema). Horrenbestez, (6.24) adierazpenak emandakoa izango da desfasea.

$$\theta = k \cdot x - \omega \cdot t = \xrightarrow{x=0} \theta = -\omega \cdot t = -(6) = -6 \quad (6.24)$$



6.4. irudia. Uhinaren profila eta 2 zein 5 puntuen kokapena adierazten duen eskema.

Bada, kalkula daitezke falta zaizkigun abiadurak eta azelerazio horizontala. Al-dagai horiek 10 metroko sakoneran kalkulatu ditugu, 6.4. irudiaren eskemako datuekin.

$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos \theta \quad (6.25)$$

$$= \frac{6}{2} \cdot \frac{9,81 \cdot 7,83}{90} \cdot \frac{\cosh[0,069813 \cdot (25 - 10)]}{\cosh(0,069813 \cdot 25)} \cdot \cos(-6) = 1,333 \text{ m/s}$$

$$w = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \sin \theta \quad (6.26)$$

$$= \frac{6}{2} \cdot \frac{9,81 \cdot 7,83}{90} \cdot \frac{\sinh[0,069813 \cdot (25 - 10)]}{\cosh(0,069813 \cdot 25)} \cdot \sin(-6) = 0,303 \text{ m/s}$$

$$\dot{u} \equiv a_x = \frac{g \cdot \pi \cdot H}{L} \cdot \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \sin \theta \quad (6.27)$$

$$= \frac{9,81 \cdot \pi \cdot 6}{90} \cdot \frac{\cosh[0,069813(25 - 10)]}{\cosh(0,069813 \cdot 25)} \cdot \sin(-6) = 0,311 \text{ m/s}^2$$

Horrenbestez, herrestatze- eta inertzia-indarrak (6.28) eta (6.29) ekuazioetan jasotakoak izango dira, eta (6.30) ekuazioan jasotakoa piloteari eragindako indar osoa sakonera horretan. Kontuan izan aztertzen ari garen elementua ez dela pilote bertikal bat. Ondorioz, $|\vec{q}|$ aldagaiak abiadura totalaren modulua adierazten du; hau da, abiadura horizontala (u) eta bertikala (w) hartu behar dira kontuan. Pilotea bertikala denean, aldagai hori soilik izango da abiadura horizontalaren modulua.

$$\begin{aligned} f_D &= C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot A \cdot u \cdot |\vec{q}| \\ &= 1,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 9 \text{ m}^2 \cdot 1,333 \text{ m/s} \cdot \sqrt{(1,333 \text{ m/s})^2 + (0,303 \text{ m/s})^2} \\ &= 10\,086 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.28)$$

$$\begin{aligned} f_I &= C_I \cdot \rho_W \cdot V \cdot \dot{u} \\ &= 1,5 \cdot 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,24 \text{ m}^3 \cdot 0,311 \text{ m/s}^2 = 2027 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.29)$$

$$f = 10\,086 \text{ N} + 2027 \text{ N} = 12\,113 \text{ N} = 12,1 \text{ kN} \quad (6.30)$$

6.3. Parke eolikoa: monopiloteko indarrak³

Demagun itsas parke batean, 6.5. irudian erakutsitakoaren modukoan, aerosorgailuaren oinarri diren monopiloteei olatuek eragindako indarrak aztertu nahi direla.



6.5. irudia. Skegness itsas parke eolikoa. Irudia: Rob Farrow, CC BY-SA 2.0.

Aerosorgailuak 2 metroko diametroa duten monopilote zilindrikoen gainean diseinatu dira. Parkea trantsizio-uretan dago eraikia, 30 metroko sakonera duen uretan. Aipatutako kokalekuan, piloteen zimenduek aurre egin behar diote olatu-fronte bati, zeinak honako ezaugarri hauek baititu sakonera mugagabeen: fronteak bati-metriarekin osatzen duen angelua 40° da, eta olatuaren altuera 6 m. Diseinu-olatu erasotzaileak karakterizatzen dituen *shoaling*-koefizienteak 0,95 balio du.

Monopilote bakoitzaren herrestatze-koefizientea unitatea dela joko da, eta itsas uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 dela.

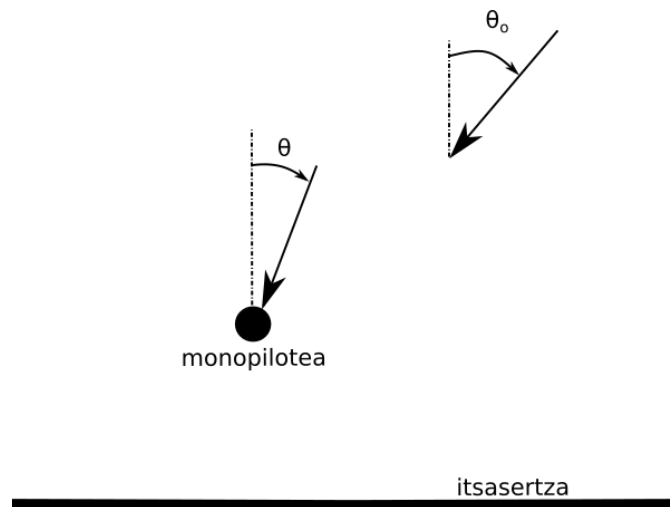
Honako hau eskatzen da:

- (a) Zehaztu, parkeko monopilote bakoitzarentzat, uhinen periodoa eta eraso-angelua. ζ Marraztu eskema bat, eta hauek irudikatu: kosta, monopilotea, olatuen eraso-angelua sakonera mugagabeen eta olatuen eraso-angelua monopiloteengan.
- (b) Monopilote bakoitzari eragingo dion diseinu-olatuaren altuera.

³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2017/18 ikasturtea (2017-11-09), partzialaren 1. ariketa.

- (c) Olatu horiek monopilote osoengan, hondotik gainazalera, eragiten duten herrestatze-indar maximoa.
- (d) Monopilote bakoitza hareia-ohantze baten gainean baldin badago, eta zimentuek ohantze horretan onartzen duten abiadura maximoa 1,5 m/s dela onartzen bada (abiadura handiagoek zimentua ahulduko lukete), egiaztatu egituraren egonkortasuna zimentu-ahultzearekiko.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Lehenik eta behin, eraso-angeluen eskema egingo dugu. Eskema hori 6.6. irudian jasotakoa da, eta bertan adierazten dira itsasertza, monopilotea, olatuen eraso-angelua sakonera mugagabea (θ_o) eta olatuen eraso-angelua monopiloteengan (θ).



6.6. irudia. Eraso-angeluen eskema.

Lehenik, uhin-periodoa zehaztu beharko litzateke, errefrakzioa finkatu ahal izateko ondoren. Horretarako, *shoaling*-koefizientearen adierazpena erabil daiteke (6.31). Baldin eta $d=30$ m bada eta $K_s=0,95$, ekuazioak bi soluzio izango ditu, hots, uhinzenbaki bik beteko dute aipaturiko baldintza. Hemendik aurrera bietako lehena erabiliko dugu soilik, baina bestearekin lorturiko emaitzak berdin-berdin balioko luke.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh(k \cdot d) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)}\right)}} \Rightarrow k = \begin{cases} 0,026 \text{ rad/m} \\ 0,066 \text{ rad/m} \end{cases} \quad (6.31)$$

Beraz, uhin-zenbakia ezaguturik uhin-luzera zehaztu daiteke (6.32) adierazpenarekin. Uhin-luzera horrek adierazten du pilotea dagoen eremuan uhina bitarteko uretan dagoela. Ondorioz, periodoa zehazteko erabil daiteke (6.34) ekuazioa, eta hori eragiten duen uhinaren T zehaztu.

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{2 \cdot \pi}{0,026} = 241,7 \text{ m} \Rightarrow \frac{d}{L} = \frac{30}{241,7} = 0,12 \quad (6.32)$$

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (6.33)$$

$$\Rightarrow T = \sqrt{\frac{L \cdot 2 \cdot \pi}{g \cdot \tanh(k \cdot d)}} = \sqrt{\frac{241,7 \cdot 2 \cdot \pi}{9,81 \cdot \tanh(0,026 \cdot 30)}} = 15,40 \text{ s} \quad (6.34)$$

Orain, periodoa jakinik, zehaztu daiteke errefrakzioaren eragina, hau da, eraso-angeluaren aldaketa pilotera iristean, 6.6. irudian adierazia. Angelua zehazteko, errefrakzioaren (6.36) adierazpena baliatuko dugu.

$$\frac{C_o}{\sin \theta_o} = \frac{C}{\sin \theta} \quad (6.35)$$

$$\sin \theta = \frac{C}{C_o} \cdot \sin \theta_o = \frac{L}{L_o} \cdot \sin \theta_o \quad (6.36)$$

$$\sin \theta = \frac{241,7}{(9,81 \cdot 15,40^2)/(2 \cdot \pi)} \cdot \sin 40^\circ = 0,4196 \Rightarrow \theta = 24,8^\circ$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Olatuen altuera zehazteko, beharrezkoa da *shoaling*aren zein errefrakzioaren eragina zehaztea. Lehena datua da, eta bigarrena erraz kalkula daiteke eraso-angeluak jakinik, (6.38) adierazpenarekin.

$$K_r = \sqrt{\frac{\sin \theta_o}{\sin \theta}} = \sqrt{\frac{\sin 45}{\sin 24,8}} = 0,92 \quad (6.37)$$

Ondorioz, olatu-altuera (6.38) adierazpenak emango digu eskaturiko puntuan.

$$H = K_s \cdot K_r \cdot H_o = 0,95 \cdot 0,92 \cdot 6 \text{ m} = 5,24 \text{ m} \quad (6.38)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Olatuek monopiloteengan eragiten duten indar totala kalkulatu behar dugu, hau da, itsas hondotik uhinaren gainazalera. Indar hori (6.47) adierazpenak emandakoa da.

Adierazpeneko aldagai batzuk enuntziatuak emandako datuak dira, hala nola (6.39), (6.40) eta (6.41) adierazpenetakoak. Beste batzuk aurreko ataletan kalkulatu ditugu, hala nola (6.42), (6.43) eta (6.44). Aldiz, (6.45) eta (6.46) adierazpenekoak indar maximoa zehaztu nahi dugula kontuan hartuz finkatuko ditugu. Hala, horien maximoak uhinaren gainean emango dira, $\cos \theta = \cos \omega t = 1$ denean hain zuzen ere. Ez nahastu θ hau, uhin fasea adierazteko darabilguna, kostarekiko eraso-angelua ematen duenarekin.

$$D = 2 \text{ m} \quad (6.39)$$

$$C_D = 1 \quad (6.40)$$

$$\rho_W = 1025 \text{ kg/m}^3 \quad (6.41)$$

$$H = 5,24 \text{ m} \quad (6.42)$$

$$k = 0,0260 \text{ rad/m} \quad (6.43)$$

$$\omega = 0,4080 \text{ rad/s} \quad (6.44)$$

$$\cos \theta = (\cos \theta)_{max} = 1 \quad (6.45)$$

$$\eta = \eta_{max} = \frac{H}{2} \cdot (\cos \theta)_{max} = \frac{5,24}{2} \cdot 1 = 2,62 \text{ m} \quad (6.46)$$

Aldagai horiek (6.47) adierazpenean ordezkatu besterik ez dugu egin behar. Ondorioz, (6.48) adierazpeneko indar totala lortuko dugu, uhin horrek pilote osoarengan eragiten duen herrestatze-indar maximoa hain zuzen ere.

$$F_D = \frac{C_D \cdot \rho_W \cdot D}{32 \cdot k} \cdot (\omega \cdot H)^2 \cdot \left[\frac{2 \cdot k \cdot (d + z) + \sinh(2 \cdot k \cdot (d + z))}{(\sinh(k \cdot d))^2} \right]_{z=\eta} \cdot |\cos \theta| \cdot \cos \theta \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1 \cdot 1025 \cdot 2}{32 \cdot 0,0260} \cdot (0,4080 \cdot 5,24)^2 \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,0260 \cdot (30 + 2,62) + \sinh(2 \cdot 0,0260 \cdot (30 + 2,62))}{(\sinh(0,0260 \cdot 30))^2} \right]_{z=\eta} \cdot (1)^2 \\
&= 2463,9 \cdot 2,138^2 \cdot \left[\frac{1,696 + 2,635}{0,742} \right] \cdot 1,0 = 65\,739 \text{ N} = 65,7 \text{ kN} \quad (6.48)
\end{aligned}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Zimendua kokaturik dagoen hondoaren egonkortasuna egiaztatzeko ur-partikulek sakonera horretan izango luketen abiadura maximoa zehaztu beharko dugu aipaturiko uhina pasatzen denean. Abiadura hori teoria linealeko (6.49) adierazpenarekin zehaztuko dugu. Uhinak sortzen duen abiadura maximoa edo u_{max} erabiliko dugunez egiaztatzeko, $\cos \theta = 1$ izango da; hots, uhinaren gaina pasatzean sortuko da abiadura horizontal maximoa; gogoratu hondoan ez dagoela abiadura bertikalik. Ondorioz, (6.50) adierazpenekoa izango da aipaturiko ezaugarriak dituen olatuaren abiadura maximoa hondoan. Ikus daitekeen moduan, abiadura hori zimenduaren egonkortasuna kolokan ipiniko lukeena baino txikiagoa da.

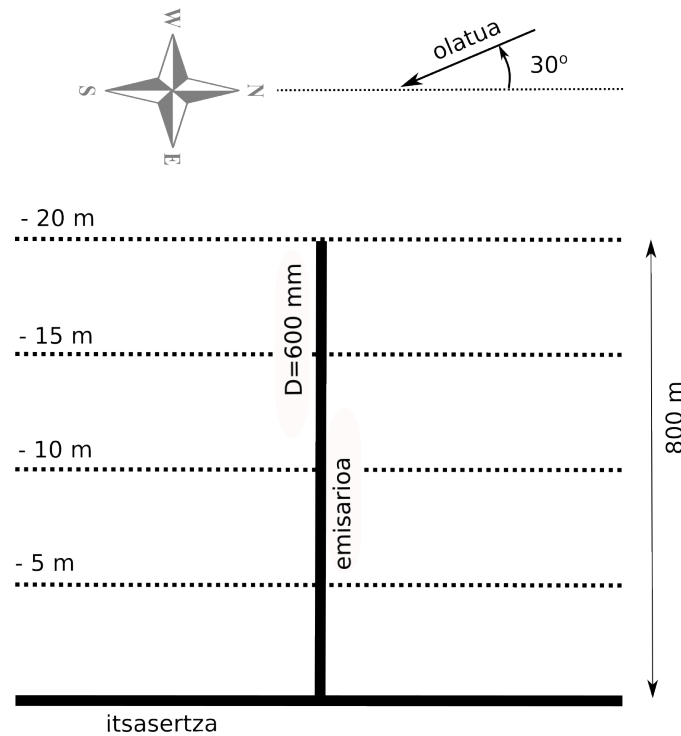
$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos \theta \quad (6.49)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{5,24}{2} \cdot \frac{9,81 \cdot 15,40}{241,7} \cdot \frac{\cosh[0,0260 \cdot (30 + (-30))]}{\cosh(0,0260 \cdot 30)} \cdot 1 \\
&= 1,638 \cdot \frac{1}{1,320} = 1,24 \text{ m/s} < 1,5 \text{ m/s} \quad (6.50)
\end{aligned}$$

6.4. Emisarioan eragindako indarrak⁴

Itsas emisarioak hondakin-urak itsasora isurtzeko helburua duten hodiak dira. Hodi horiek itsas hondoa gainean eraiki daitezke, eta han itsas korronteei zein olatuen eraginei aurre egiteko diseinatu beharko dira.

Demagun 6.7. irudiko emisarioa dugula, kostaldearekiko elkarzuta (kosta-lerroaren orientazioa ipar-hegoaldea da), eta 800 m barneratzen dena itsasoan. Itsas hondoa malda konstantea da, irudian emandako sakonerekin. Hodiaren diametroa 600 milimetrokoa da.



6.7. irudia. Kosta, batimetria eta emisarioaren eskema.

Emisarioa soilik uhinen eraginpean dagoela jotzen da (ez ditugu itsas korrontek kontuan hartuko), eta 100 urteko errepikatze-denbora dagokion olatua aukeratuko da analisirako. Olatu horrek 17 segundoko periodoa eta 11,5 metroko altuera ditu sakonera mugagabea; noranzkoa irudian adierazitakoa da (iparraldearekiko 30º desbideratua).

Emisarioan eragindako indarrak piloteentzako erabiltzen den adierazpen berdina-

⁴Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2018-10-31), partzialaren 3. ariketa.

rekin kalkula daitezke. Horretarako, hodiaren sekzioarekiko elkarzuta den abiaduraren aldagaia soilik izan beharko da kontuan.

- (a) Zehaztu emisarioko zer puntu izango den okerrena eraso-angeluaren ikuspuntutik (5, 10, 15 edo 20 metroko sakonera). Eman angeluaren balioa sakonera bakoitzean.
- (b) Zehaztu emisarioko zer puntu izango den okerrena olatu-altuerari dagokionez (5, 10, 15 edo 20 metroko sakonera). Eman altueraren balioa sakonera bakoitzean.
- (c) Zehaztu zer puntu izango den okerrena herrestatze-indarrari dagokionez (5, 10, 15 edo 20 metroko sakonera), eta eman sakonera horretan uhinek hodiari eragingo dioten herrestatze-indar maximoa hodi-luzeraren metro bakoitzeko; izanik $C_D = 1$, $C_M = 3,3$ eta uraren dentsitatea 1025 kg/m^3 .

ARIKETAREN EBAZPENA (a+b). Atal hau zein ondorengoa ebazteko, kontuan hartu behar da emisarioarekiko elkarzuta den olatuaren aldagaia dela hari eragingo diona; hots, ez dugu hodiaren noranzko bera duen aldagaia kontuan hartuko. Hala, sakonera mugagabetik barreiatzen diren olatuek noranzkoa eta altuera aldatzen dituzte sakonerarekin. Beraz, angeluari dagokionez, kostatik gertuen dauden olatuak izango dira eraginik txikiena dutenak hodian, horiek hodiarekiko paralelo jartzeko joera baitute errefrakzioaren eraginez. Bestalde, altuerari erreparatuz gero, kostaldetik gertuen daudenak izango dira altuenak *shoaling*aren eraginez eta, aldiz, kostaldetik gertuen daudenak lirake txikienak errefrakzioaren ondorioz. Horrenbestez, olatuak nola barreiatzen diren aztertuko dugu, errefrakzioaren eta *shoaling*aren eragina aztertuz.

Eskaturikoa zehazteko behar diren datuak 6.1. taulan jasoak daude; ilara bakoitza batimetria bati dagokio. Lehen lau zutabeek emandako datuak dira. Gogoan izan sakonera mugagabeko angelua ez dela irudian emandakoa, baizik eta olatuak kostaren elkarzutarekiko osatzen duena. Bosgarren zutabeen θ eta K_{rs} kalkulatzeko balioa agertzen da, eranskinean emandako E.2 irudiko nomograma erabiliz. Hala, azken zutabeen olatuak sakonera jakinean izango duen altuera ematen da. Taulan ikus daitekeen moduan, datuak aurreko paragrafoan esandakoarekin bat datoz: angeluari dagokionez 20 metroko sakonera da okerrena, eta, altuerari dagokionez, 5 metroko sakonerari dagokiona.

Beraz, taulako balioak aztertuz, zehaztu dezakegu angeluaren ikuspuntutik 20 m dela sakonerarik kaltegarriena, orduan baitago olatua hodiarekiko elkarzut egotera maximoan; hortik aurrera olatua hodiarekiko paralelo jartzen joango da, eta θ angelua murriztuz joango da kostaldera hurbildu ahala. Esan bezala, zenbat eta elkarzutagoa izan olatuaren noranzkoa, orduan eta handiagoa izango da hodiari

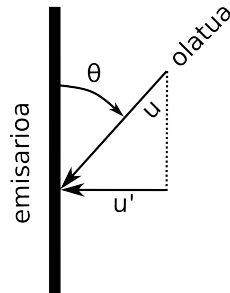
6.1. taula. Olatuaren ezaugarriak sakonera mugagabeen eta beste sakoneretan (d), errefrakzioaren eta *shoaling*aren ondorioz.

H_o m	θ_o $^\circ$	T s	d m	d/gT^2 —	θ $^\circ$	K_{rs} —	H m
11,5	60	17	5	0,001 76	13	1,00	11,5
			10	0,003 53	18	0,87	10,0
			15	0,005 29	22	0,82	9,4
			20	0,007 05	25	0,78	9,0

eragiten dion abiaduraren aldagaia. Bestalde, olatuaren altuerari erreparatuz gero, sakonera 5 m denean izango da egoerarik kaltegarriena, orduan izango baitu olatuak altuerarik handiena, eta, ondorioz, orduan izango da abiadura handiena.

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Herrestatze-indarra kalkulatzeko (6.55) adierazpena erabiliko dugu, kontuan hartuta u' dela hodiarekiko aldagai elkarzuta. Herrestatze-indar hori maximoa izan dadin abiadurak izan behar du maximoa, (6.56) adierazpenean erakusten den moduan.

Beraz, abiadura hori non den maximoa zehaztuko dugu lehenik. Aurreko bi ataletan, abiadura horri eragiten dion aldagai nagusia kalkulatu dugu: olatu-altuera batimetria-lerro bakoitzean. Kalkula dezagun bada u'_{max} batimetria-lerro bakoitzean, 6.8. irudiko eskema kontuan hartuta.



6.8. irudia. Hodiaren eta erasotze-angeluaren eskema.

Eskema horren arabera, u'_{max} emango digun adierazpena (6.51) izango da, abiaduraren proiektzio bertikala ematen diguna hain zuzen ere. Kontuan hartzen badugu batimetria-puntu bakoitzean abiadura maximoa gauzatzen dela olatu-gaineen edo

desfasea 0° denean, abiadura maximo hori (6.52) adierazpenak emandakoa izango da. Argi ibili, ez dira gauza bera uhinaren desfasea eta olatuaren noranzkoa, bientzako izendapen bera erabiltzen den arren (θ). (6.52) adierazpenean desfasearen $\cos \theta = 1$ balioarengatik ordezkatu dugu, eta adierazpen horretako θ eraso-angeluari dagokio.

Ikus (6.53) adierazpenean ere $\cosh[k \cdot (d + z)] = 1$ jarri dugula. 6.9. irudiaren arabera $d + z \neq 0$ den arren, aipaturiko kosinu hiperbolikoaren balioa oso gutxi aldatzen da; ez du, beraz, eraginik emaitzan. Beraz, (6.54) adierazpena litzateke abiadura maximo hori emango diguna.

$$u'_{max} = u_{max} \cdot \sin \theta \quad (6.51)$$

$$u'_{max} = \left(\frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot 1 \right) \cdot \sin \theta \quad (6.52)$$

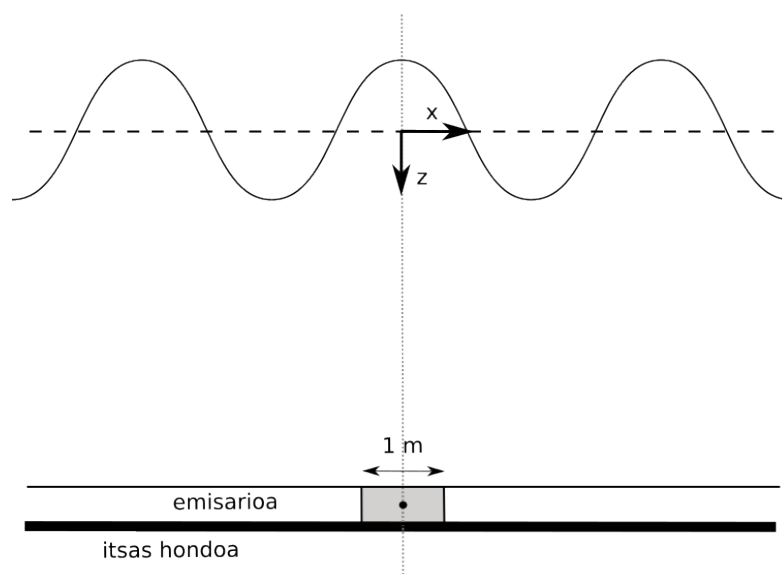
$$u'_{max} = \left(\frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(k \cdot d)} \right) \cdot \sin \theta \quad (6.53)$$

$$u'_{max} = \frac{\pi}{T} \cdot \frac{H \cdot \sin \theta}{\sinh(k \cdot d)} \quad (6.54)$$

Ikusi abiadura maximo horri eragiten dioten aldagaiak, sakoneraz gain, lehen bi ataletakoak direla, periodoa finkoa baita. Ondorioz, (6.54) adierazpenaren bigarren zatia aztertu beharko dugu zehaztu ahal izateko abiadura maximoa zein batimetria-punturi dagokion.

Kalkulu horiek 6.2. taulan laburbildu dira. Lehen zutabea batimetriari dagokio, ilara bakoitzean batimetria-lerro bat aztertuko da. Bi, hiru eta laugarren zutabeak batimetria bakoitzean uhin-luzera zehazteko baliatu dira, eranskinean jasotako E.7 taulako balioak erabiliz eta $L_o = (g \cdot T^2)/(2 \cdot \pi) = (9,81 \cdot 17^2)/(2 \cdot \pi) = 451,2$ m dela jakinik. Hurrengo zutabeen batimetria bakoitzeko k kalkulatu da, $k = 2\pi/L$ adierazpenarekin. Hurrengo θ aurreko taulatik hartu da, eta $\sin \theta$ kalkulatzeko erabili da. Azkenik, aurreko taulako H balioa erabiliz, azken zutabea kalkulatu da, (6.54) adierazpenaren arabera u' abiaduran eragina duen gai osoaren balioa zehaztuz.

Azken zutabe horretan ikus daiteke u' abiadura maximoa 5 metroko sakonerari dagokiola, orduan baita abiadurari eragiten dion gai aldakorren balioa handiena. Horren arabera zehaztu dezakegu sakonera horretan olatuak hodiari eragiten dion herrestatze-indar maximoa. Hodiaren metro baterako egingo dugunez, ikus 6.9.



6.9. irudia. Hodiaren eta uhinaren eskema.

6.2. taula. Olatuaren altuerari eragiten dioten ezaugarriak batimetriaren balio ezberdinetan.

d m	d/L_o —	d/L —	L m	k rad/m	$\sinh(kd)$ —	θ $^\circ$	$\sin \theta$ —	H m	$H \frac{\sin \theta}{\sinh(kd)}$ m
5	0,011 09	0,042 33	118,1	0,0532	0,2691	13	0,225	11,5	9,61
10	0,022 18	0,065 70	152,2	0,0413	0,4248	18	0,309	10,0	7,27
15	0,033 27	0,075 07	199,8	0,0314	0,4886	22	0,374	9,4	7,22
20	0,044 36	0,087 74	227,9	0,0276	0,5305	25	0,423	9,0	6,54

irudia, $A = 0,6 \cdot 1 = 0,6 m^2$ izango da. Beraz, aldagaiak ordezkaturaz, (6.57) ekuazioan bezala, indar horren balioa lortuko dugu, (6.58) ekuazioan jaso.

$$f_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot A \cdot u' \cdot |u'| \quad (6.55)$$

$$(f_D)_{max} = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot A \cdot u'_{max} \cdot |u'_{max}| \quad (6.56)$$

$$= C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot A \cdot \left(\frac{\pi}{T} \cdot \frac{H \cdot \sin \theta}{\sinh(k \cdot d)} \right) \cdot \left| \frac{\pi}{T} \cdot \frac{H \cdot \sin \theta}{\sinh(k \cdot d)} \right| \quad (6.57)$$

$$= 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{\pi}{17} \cdot 9,61 \right) \cdot \left| \frac{\pi}{17} \cdot 9,61 \right| = 969,8 \text{ N} \quad (6.58)$$

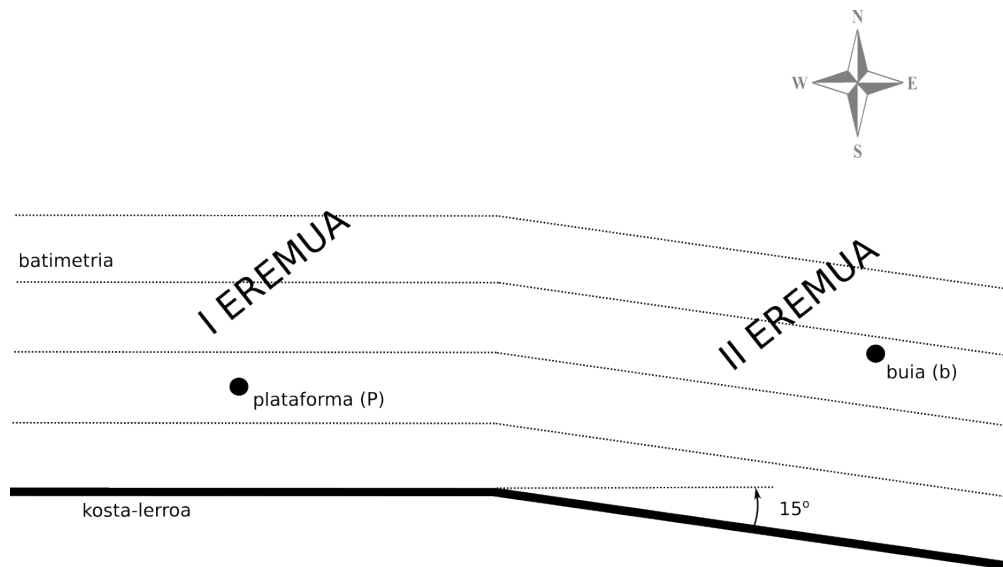
Orain uhin-luzerak ezagunak direnez, (6.55) adierazpena erabil zitekeela ziurtatuko dugu, (6.59) ekuazioko baldintza betetzen ote den egiaztatuz. Uhin-luzera ezberdinak ditugunez batimetria-lerroaren arabera, kontrakoenarekin egiaztatuko dugu. Hala, baldintza betetzen dela ikusten da, (6.60) adierazpenak erakusten duen moduan.

$$D < 0,15 \cdot L \quad (6.59)$$

$$1 \text{ m} < 0,15 \cdot 227,9 \text{ m} = 34 \text{ m} \quad \checkmark \quad (6.60)$$

6.5. Bi kosta-lerro⁵

Gasa erauzteko plataforma batek, Bermeo parean dagoen *Gaviota* bezalakoak esaterako, 4 zutabe bertikal ditu euren artean konektatuak, eta 15 metroko alde duen lauki-formako egitura zurruna osatzen dute zutabe horiek. Egitura kokatua dagoen eremuan 30 metrokoa da sakonera.



6.10. irudia. Kostaldearen eta plataformaren eskema.

Plataforma eraiki behar den eremuan (I eremua) ez dago olatuen daturik; aldiz, handik hurbil badago datuak dauzkan buia bat (II eremua). Buiako datuak aztertuz, honako hau ondorioztatu da: diseinurako erabiliko diren olatuen noranzkoa NNE da, 8 metroko altuera dute, eta 12 segundoko periodoa.

Datu gehigarriak: inertzia-koefizienteak 1,5 balio du, eta herrestatze-koefizienteak 1,2. Uraren pisu espezifikoak $10,06 \text{ kN/m}^3$ dela joko dugu.

Honako hau eskatzen da:

- Zehaztu buia zer sakoneratan dagoen, baldin eta 10 segundoko uhin baten-tzat sakonera handien mugan dagoela baldin badakigu.
- Kalkulatu diseinu-olatuaren ezaugarriak I eremuan, uraren sakonera 30 metrokoa denean ($H_{I,30}$, $L_{I,30}$, $T_{I,30}$, $C_{I,30}$ eta $\theta_{I,30}$).

⁵Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2019-11-04), partzialaren 1. ariketa.

- (c) Uhin-fronte batentzako presioa $76,7 \text{ kN/m}^2$ dela neurtu du plataformako sensore batek gainazaletik 6 metrora. Zer presio neurtuko genuke, pilote eta une berean, 10 metroko sakoneran?
- (d) Plataformaren piloteek metro bateko diametroa balute, kalkulatu egitura-ri eragiten zaion indar totala, plataformari honako ezaugarri hauek dituen olatuak eragiten dionean: 6 metroko altuera, 90 metroko uhin-luzera eta 12 segundoko periodoa. Olatuen noranzkoa plataformaren diagonalarekin bat datorrela joko da, eta uhin-gaina topatzen duen lehen pilotearen parean dagoela.
- (e) Frogatu aurreko atala ebazteko erabili diren adierazpenak egokiak ote diren eta, hala ez balira, besterik erabili beharko genukeen.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Buiaren sakonera zehazteko kontuan izango dugu buia mugako uretan dagoela; hau da, sakonera mugagabetik sakonera ertaineko mugan. Muga horretan (6.61) adierazpenak emandako baldintza bete beharko da, eta, gainera, $L = L_o$ izango da. Ondorioz, buiaren sakonera (6.62) ekuazioan emandakoa izango da.

$$\frac{d_b}{L} = \frac{d_b}{L_o} = 0,5 \quad (6.61)$$

$$d_b = 0,5 \cdot L_o = 0,5 \cdot \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = 0,5 \cdot \frac{9,81 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi} = 78,1 \text{ m} \quad (6.62)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Enuntziatuak uhinaren ezaugarriak plataforman kalkulatzeko eskatzen digu, hau da, I eremuan eta 30 metroko sakoneran. Gure datuak, baina, II eremuan eta buian lorturikoak dira. Ondorioz, buiako datu horiei plataforman zer datu dagokien zehaztu beharko dugu. Horretarako, II eremuko datuak bi bider barreiatuko ditugu; lehenik, II eremutik sakonera mugagabera eta, ondoren, sakonera mugagabetik II eremura. Barreiatze hori egiteko, uhin-luzera eta eraso-angelua beharko ditugu batez ere, bi datu horiekin erraza baita eskatzen diren besteak lortzea.

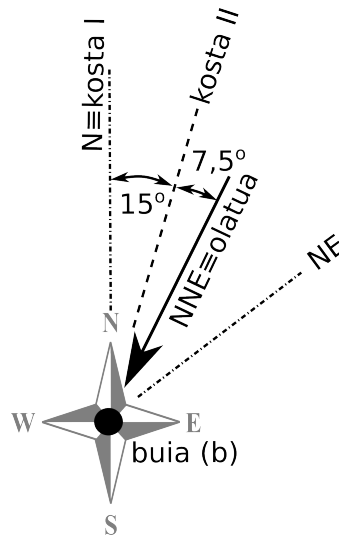
Beraz, lehenik, periodoari dagokion sakonera mugagabeko uhin-luzera zehaztuko dugu, (6.63) adierazpenarekin, eta, ondoren, uhin horrek buian izango lukeen uhin-luzera. Azken horretarako, sakonera erlatiboa zehaztuko dugu eranskineko E.7 taularekin, (6.64) adierazpenean ikus daitekeen bezala. Lorturiko balioarekin zehaztu dezakegu uhin-luzera buian, (6.65) ekuazioan jasotakoa hain zuzen ere.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 12^2}{2 \cdot \pi} = 224,8 \text{ m} \quad (6.63)$$

$$\frac{d_b}{L_o} = \frac{78,1}{224,8} = 0,347 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \quad \frac{d_b}{L_b} = 0,3551 \quad (\text{sakonera ertaina}) \quad (6.64)$$

$$\Rightarrow L_b = \frac{d_b}{0,3551} = \frac{78,1}{0,3551} = 219,9 \text{ m} \quad (6.65)$$

Aurrera jarraitu aurretik, kontuz behatu behar dugu kostak bakoitzarekiko uhinak osatzen duen angeluen arteko erlazioa. Erlazio horiek 6.11. irudian jaso dira. Irudian ikus daitezkeen moduan, I eremuko kostak iparraldera begira dago, eta II eremukoak 15° ekialdera. Olatuaren noranzkoa NNE denez, olatuaren eraso-angelua $7,5^\circ$ izango da buian, II kostarekiko. Angelu horri $\theta_{II,b}$ deituko diogu.



6.11. irudia. Kosta- eta olatu-noranzkoen eskema buian.

Hala, kalkulatu dezakegu olatuaren eraso-angelua nola aldatuko den sakonera mugagabetik buiara, (6.66) adierazpeneko Snell legea baliatuz II eremuan. Hala, eraso-angelua finkatu daiteke sakonera mugagabearen (6.67) adierazpenarekiko. Goian izan eraso-angelu hori II eremuarekiko dela.

$$\frac{C_b}{\sin \theta_{II,b}} = \frac{C_o}{\sin \theta_{II,o}} \quad (6.66)$$

$$\sin \theta_{II,o} = \frac{C_o}{C_b} \cdot \sin \theta_{II,b} = \frac{L_o}{L_b} \cdot \sin \theta_{II,b} = \frac{224,8}{219,9} \cdot \sin 7,5^\circ$$

$$\implies \theta_{II,o} = \arcsin \left(\frac{224,8}{219,9} \cdot \sin 7,5^\circ \right) = 7,7^\circ \quad (6.67)$$

Gainera, K_{rs} ere zehaztu daiteke. Hori egiteko eranskinen E.2 irudian jasotako nomograma baliatuko dugu, eta (6.73) adierazpenean jasotako K_{rs} lortuko.

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{II,b} = 7,7^\circ \text{ edo } \theta_{II,o} = 7,5^\circ \\ \frac{d_b}{g \cdot T^2} = \frac{78,1}{9,81 \cdot 12^2} = 0,0553 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{nomograma}]{E.2} K_{rs}^{o \rightarrow b} = 0,95 \quad (6.68)$$

Azken balio horrekin olatuak sakonera mugagabeen zuen altuera lor daiteke, buiraino barreiatu aurretik. Barreiatzea kontuan hartzen duen adierazpena (6.69) da, eta, beraz, (6.70) adierazpenak emango digu olatu-altuera sakonera mugagabeen.

$$H_b = K_{rs}^{o \rightarrow b} \cdot H_o \quad (6.69)$$

$$H_o = \frac{H_b}{K_{rs}^{o \rightarrow b}} = \frac{8}{0,95} = 8,42 \text{ m} \quad (6.70)$$

Orain, sakonera mugagabetik plataformarainoko barreiatzea hartu beharko dugu kontuan. Lehen egin bezala, zehaztu dezagun uhin-luzera sakonera horretan, lehenik sakonera erlatiboa zehaztuz (6.71) eta ondoren uhin-luzera kalkulatzuz (6.72).

$$\frac{d_{30}}{L_o} = \frac{30}{224,8} = 0,133 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \quad \frac{d_{30}}{L_{30}} = 0,1691 \quad (\text{sakonera ertaina}) \quad (6.71)$$

$$\implies L_{30} = \frac{d_{30}}{0,1691} = \frac{30}{0,1691} = 177,4 \text{ m} \quad (6.72)$$

Ondoren K_{rs} kalkulatu dugu sakonera mugagabetik plataformara. Horretarako, lehen aipaturiko nomograma erabiliko dugu, kontuan hartuz kostek osatzen duten angelua, besteak beste. Erabili diren balioak zein kalkulaturiko $\theta_{I,30}$ eta $K_{rs}^{o \rightarrow 30}$ (6.73) adierazpenean jaso dira.

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{I,o} = \theta_{II,o} + 15^\circ = 7,7^\circ + 15^\circ = 22,7^\circ \\ \frac{d_{30}}{g \cdot T^2} = \frac{30}{9,81 \cdot 12^2} = 0,0212 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{nomograma}]{\text{E.2}} \left\{ \begin{array}{l} \theta_{I,30} \approx 18^\circ \\ K_{rs}^{o \rightarrow 30} \approx 0,90 \end{array} \right. \quad (6.73)$$

Lehen bezala, (6.74) adierazpeneko Snell legea baliatuz plataformako eraso-angelua zehaztuko dugu, (6.76) adierazpenean jaso. Orain bai, eraso-angelu hori I eremuarekiko emana dago; plataforma dagoen eremuarekiko, hain zuzen ere.

$$\sin \theta_{I,30} = \frac{L_{30}}{L_o} \cdot \sin \theta_{I,o} \quad (6.74)$$

$$= \frac{177,4}{224,8} \cdot \sin 22,7^\circ \quad (6.75)$$

$$\Rightarrow \theta_{I,30} = \arcsin \left(\frac{177,4}{224,8} \cdot \sin 22,7^\circ \right) = 18,0^\circ \quad (6.76)$$

Azkenik, plataforman olatuak izango duen olatu-altuera, (6.77) adierazpenean jaso, eta uhin-bizkortasuna, (6.78) adierazpenekoa, kalkula ditzakegu.

$$H_{I,30} = K_{rs}^{o \rightarrow 30} \cdot H_o = 0,90 \cdot 8,42 = 7,58 \text{ m} \quad (6.77)$$

$$C_{30} = \frac{L_{30}}{T} = \frac{177,4}{12} = 14,8 \text{ m/s} \quad (6.78)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Presioa neurtzeko baliatuko dugun adierazpena (6.87) da. Horretarako ditugun datuak (6.79) eta (6.83) adierazpenen artean jasotakoak dira.

$$d = 30 \text{ m} \quad (6.79)$$

$$z = -6 \text{ m} \quad (6.80)$$

$$p = 76\,700 \text{ N/m}^2 \quad (6.81)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{10\,060 \text{ N/m}^3}{9,81 \text{ m/s}^2} = 1025,5 \text{ kg/m}^3 \quad (6.82)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L_{30}} = \frac{2 \cdot \pi}{177,4} = 0,0354 \text{ rad/m} \quad (6.83)$$

Edonola ere, uhin fasea jakin gabe ezin dugu zehaztu zer-nolako den presioa puntu horretan, ezin baitugu zehaztu ur-gainazalaren altuera edo η . Hala ere, presioa eskatzen zaigun puntu eta une berean beste neurketa bat dugunez, ur-gainazalaren altuera zehaztu dezakegu uhin fasea finkatu gabe. Horretarako, (6.84) adierazpenetik η askatu eta ur-gainazalaren posizioa emango digun (6.85) adierazpena lortuko dugu. Hala, 6 metroko sakoneran neurtu den presioa jakinik zehaztuko dugu ur-gainazalaren posizioa, (6.86) adierazpenekoa hain zuzen ere.

$$p = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (6.84)$$

$$\eta = \frac{(p + \rho \cdot g \cdot z)}{\rho \cdot g} \cdot \frac{\cosh(k \cdot d)}{\cosh(k \cdot (d + z))} \quad (6.85)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(76\,700 + 1025,5 \cdot 9,81 \cdot (-6))}{1025,5 \cdot 9,81} \cdot \frac{\cosh(0,0354 \cdot 30)}{\cosh(0,0354 \cdot (30 + (-6)))} \\ &= 1,624 \cdot 1,170 = 1,90 \text{ m} \end{aligned} \quad (6.86)$$

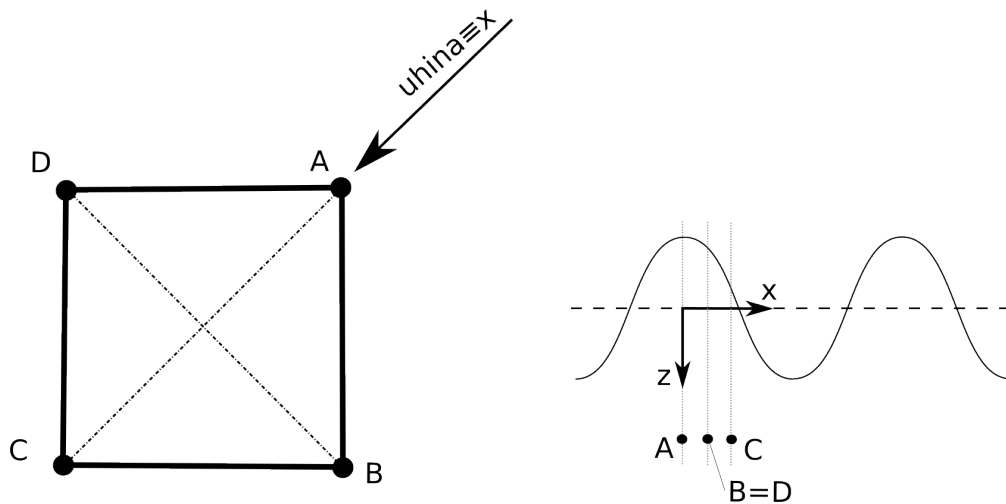
Orain bai, η jakinik, 10 metroko sakonera neurtuko genukeen presioa zehaztu daiteke, (6.88) adierazpenekoa. Ikus daitekeen moduan, presioa hori handiagoa da sakonera handiagoan.

$$p = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\cosh(k \cdot d)} - \rho \cdot g \cdot z \quad (6.87)$$

$$= 1025,5 \cdot 9,81 \cdot 1,90 \cdot \frac{\cosh(0,0354 \cdot (30 + (-10)))}{\cosh(0,0354 \cdot 30)} - 1025,5 \cdot 9,81 \cdot (-10)$$

$$= 19\,114,3 \cdot \frac{1,261}{1,619} + 100\,601,6 = 115\,489 \text{ N/m}^2 = 115,5 \text{ kPa} \quad (6.88)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Plataformari uhinak eragiten dion indarrak zehazteko 6.12. irudiko (a) eskema baliatuko dugu. Eskeman ikus daitekeen moduan, uhinak diagonalarekiko eragiten dio plataformari, eta uhinaren noranzkoan dagoen lehen piloteari *A* deitu diogu. Eskema horren arabera, *x* ardatza dagokio uhinaren noranzkoari. Ondorioz, uhin fase ezberdinak dagozkie piloteetako bakoitzari, 6.12. irudiko (b) eskeman ikus daitekeen moduan. *B* eta *D* piloteei uhin fase bera dagokie, puntu horiek elkartzen dituen lerroarekiko elkarzuta baita uhinaren noranzkoa. Uhin fase horrek baldintzatuko du, besteak beste, olatuak piloteari eragiten dion indarra.



6.12. irudia. Plataformaren oin-planoa eta olatuaren eskema.

Aurrera egin aurretik, azter ditzagun uhin faseak. Eraso-olatuaren ezaugarriak ezagunak dira, (6.89) eta (6.91) adierazpeneko aldagaiak datua dira, eta (6.92) zein (6.93) erraz kalkula daitezke.

$$H_{I,30} = 6 \text{ m} \quad (6.89)$$

$$L_{I,30} = 90 \text{ m} \quad (6.90)$$

$$T = 12 \text{ s} \quad (6.91)$$

$$w = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot \pi}{12} = 0,5236 \text{ rad/s} \quad (6.92)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L_{I,30}} = \frac{2 \cdot \pi}{90} = 0,0698 \text{ rad/m} \quad (6.93)$$

$$\overline{AC} = \sqrt{15^2 + 15^2} = 21,21 \text{ m} \quad (6.94)$$

Uhin en ezaugarri horiekin, zehaztu dezakegu pilote bakoitzean uhin fasea zer-nolakoa izango den. Horretarako, kontuan hartuko dugu uhin-luzera osoarekiko proportzioa. Fase horrekin gainazalaren posizioa edo η zehaztu dezakegu. Kalkulu horiek (6.95), (6.96) eta (6.97) adierazpenetan jasotakoak dira. Ikus 6.12. irudiko (b) eskeman proportzioa mantendu dela.

$$\theta_A = \frac{2 \cdot \pi}{90} \cdot 0 = 0 \text{ rad} \quad \Rightarrow \quad \eta_A = \frac{6}{2} \cdot \cos 0 = 3,00 \text{ m} \quad (6.95)$$

$$\theta_B = \frac{2 \cdot \pi}{90} \cdot \frac{21,21}{2} = 0,74 \text{ rad} \quad \Rightarrow \quad \eta_B = \frac{6}{2} \cdot \cos 0,74 = 2,22 \text{ m} \quad (6.96)$$

$$\theta_C = \frac{2 \cdot \pi}{90} \cdot 21,21 = 1,48 \text{ rad} \quad \Rightarrow \quad \eta_C = \frac{6}{2} \cdot \cos 1,48 = 0,27 \text{ m} \quad (6.97)$$

Bada, aurreko datuekin kalkula dezakegu pilote bakoitzari olatuak eragiten dion indar totala. Indar hori herrestatze- eta inertzia-indarren batura izango da. Bakoitza bere aldetik kalkulatu dugu, herrestatze-indarra (6.98) adierazpenaren arabera eta inertzia-indarra (6.102) adierazpenarekin. Pilote bakoitzean uhin berdina eragindako indarra ezberdina izango da. A piloteari dagokiona (6.99) adierazpenekoa izango da, B piloteari dagokiona (6.100) adierazpenekoa, eta C piloteari dagokiona (6.100) adierazpenekoa. Azken biak lehenaren kalkulua baliatuz zehaztu dira, aldatu beharreko aldagai bakarrak gainazalaren posizioa, η , eta desfasea, ωt , baitira.

$$F_{D,A} = \frac{C_D \cdot \rho_w \cdot D}{32 \cdot k} \cdot (\omega \cdot H)^2. \quad (6.98)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \left[\frac{2 \cdot k \cdot (d + z) + \sinh(2 \cdot k \cdot (d + z))}{(\sinh(k \cdot d))^2} \right]_{z=\eta} \cdot |\cos \theta| \cdot \cos \theta \\ &= \frac{1,2 \cdot 1025,5 \cdot 1}{32 \cdot 0,0698} \cdot (0,5236 \cdot 6)^2 \\ & \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,0698 \cdot (30 + 3) + \sinh(2 \cdot 0,0698 \cdot (30 + 3))}{(\sinh(0,0698 \cdot 30))^2} \right] \cdot |\cos 0| \cdot \cos 0 \\ &= 550,95 \cdot 3,142^2 \cdot \left[\frac{4,607 + 50,077}{15,977} \right] \cdot 1 = 18\,616 \text{ N} = 18,6 \text{ kN} \quad (6.99) \end{aligned}$$

$$F_{D,B} = 550,95 \cdot 3,142^2 \cdot \left[\frac{4,498 + 44,909}{15,977} \right] \cdot 0,738^2 = 9161 \text{ N} = 9,2 \text{ kN} \quad (6.100)$$

$$F_{D,C} = 550,95 \cdot 3,142^2 \cdot \left[\frac{4,226 + 34,204}{15,977} \right] \cdot 0,091^2 = 108 \text{ N} = 0,1 \text{ kN} \quad (6.101)$$

Inertzia-indarra kalkulatzeko prozedura bertsua baliatu da. *A* piloteari dagokiona kalkulatu da, (6.103) adierazpena baliatuz, eta *B* zein *C* piloteetakoak aurrekoaren balioak erabiliz kalkulatu dira, (6.104) eta (6.105) adierazpenetan jasoz balio horiek.

$$\begin{aligned} F_{I,A} &= C_M \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (\omega^2 \cdot H) \cdot \\ & \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot k} \frac{\sinh(k \cdot (d + z))}{\sinh(k \cdot d)} \right]_{z=\eta} \cdot \sin(\theta) \quad (6.102) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 1,5 \cdot 1025,5 \cdot \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \cdot (0,5236^2 \cdot 6) \cdot \\ & \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0,0698} \frac{\sinh(0,0698 \cdot (30 + 3))}{\sinh(0,0698 \cdot 30)} \right] \cdot \sin(0) \\ &= 1208,1 \cdot 1,645 \cdot \left[\frac{1}{0,140} \cdot \frac{4,954}{3,997} \right] \cdot 0 = 0 \text{ N} \quad (6.103) \end{aligned}$$

$$F_{I,B} = 1208,1 \cdot 1,645 \cdot \left[\frac{1}{0,140} \cdot \frac{4,686}{3,997} \right] \cdot 0,674 = 11\,217 \text{ N} \quad (6.104)$$

$$F_{I,C} = 1208,1 \cdot 1,645 \cdot \left[\frac{1}{0,140} \cdot \frac{4,075}{3,997} \right] \cdot 0,996 = 14\,414 \text{ N} \quad (6.105)$$

Pilote bakoitzeko indar totala kalkulatzeko bi indarren batura egin da, (6.106), (6.107) eta (6.108) adierazpenetako balioak lortuz. Ikus daitekeen moduan, olatu faseak eragin handia du piloteari eragindako indar horretan.

$$F_A = F_{D,C} + F_{I,C} = 18\,616 + 0 = 18\,616 \text{ N} \quad (6.106)$$

$$F_B = F_{D,B} + F_{I,B} = 9161 + 11\,217 = 20\,378 \text{ N} \quad (6.107)$$

$$F_C = F_{D,C} + F_{I,C} = 108 + 14\,414 = 14\,522 \text{ N} \quad (6.108)$$

Azkenik, egiturari eragiten dion indar totala zehazteko, kontuan hartu da B eta D piloteetako indarrek balio bera dutela. Ondorioz, indar totala guztien batura izango da, (6.109) ekuazioan jaso.

$$F_T = F_A + 2 \cdot F_B + F_C = 18\,616 + 2 \cdot 20\,378 + 14\,522 = 73\,894 \text{ N} \quad (6.109)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Orain uhin-luzerak ezagunak direnez, ziurta dezagun herrestatze- eta inertzia-indarrak kalkulatzeko erabili ditugun adierazpenak erabil zitezkeela, (6.110) ekuazioko baldintza betetzen ote den egiaztatuz. Baldintza betetzen dela ikusten da, (6.111) adierazpenak erakusten duen moduan.

$$D < 0,15 \cdot L \quad (6.110)$$

$$1 \text{ m} < 0,15 \cdot 90 \text{ m} = 13,5 \text{ m} \quad \checkmark \quad (6.111)$$

7. Dike etzanak

Kapitulu honetan dike etzanak edo ezponda-dikeak aztertuko ditugu, eta horien aurre-dimentsionatzea landuko dugu, mantu nagusiko piezen pisua kalkulatz irizpide ezberdinak baliatuz. Gainera, dikea osatzen duen geruza ezberdinetako elementuen pisuak ere zehaztuko ditugu, baita dikeko elementuen kota zehaztu ere itsas maila jakinarekiko. Ezponda-dikeak iragazkorak direnez, horien islapen- eta igorpen-koefizienteak ere zehaztuko ditugu.

7.1. Pisuen erlazioa¹

Portu batean olatu-horma edo dike etzan berri bat eraiki nahi da, sakonera 10 metrokoa den eremu batean. Demagun portu-agintaritzan lan egiten duzula eta eraikuntza-proiektuaren dokumentu amaitua jaso duzula. Edonola ere, proiektua aztertzean, konturatu zara proiektu-egileari emandako datuetan olatu adierazgarriaren altuera ez zela egokia. Proiektuan erabili beharko litzatekeen olatu-altuera da erabili dena, baino %10 handiagoa. Ondorioz, eta dikearen diseinua ahalik eta gutxien aldatzearen, honako hau egiteko eskatu dizute:

- (a) Proiektuan Hudson irizpidea erabili dela jakinik, mantu nagusiko elementuen pisu berria zehaztu eta alderatu proiektukoarekin (diferentzia %tan eman).
- (b) Egiaztatu, mantuko elementu berriak kontuan hartuta, filtroaren lehen geruzako elementuen pisua berrikusi behar ote den ala ez. Mantuko harrien pisua zehazteko $W_{behekoa} = W_{goikoa} / 15$ irizpidea erabili zen, baina orain ontzat joko dugu $W_{behekoa} = W_{goikoa} / 20$ baldin bada ere.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Enuntziatuak ematen digun baldintza (7.1) ekuazioan jasotakoa da. Bestalde, dikearen beste baldintza guztiak mantenduko balira (pisu espezifikoa, malda eta bloke motak), mantuko elementuen pisua kalkulatzeko erabiliko dugun adierazpenean aldatuko den aldagai bakarria diseinuko

¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2020-01-13), ohikoaren 3. ariketa.

olatuaren altuera da; ikus (7.13) adierazpena. Ondorioz, pisuaren adierazpeneko H_d ez beste gai guztiak konstante mantenduko dira, (7.2) eta (7.3) adierazpenek erakusten duten modura. Azken bi adierazpen horiek Iribarren zein Hudson formulak erabilia izango dira baliagarri.

$$H_{berria} = 1,1 \cdot H_{berria} \quad (7.1)$$

$$W_{berria} = K \cdot H_{berria}^3 \quad (7.2)$$

$$W_{zaharra} = K \cdot H_{zaharra}^3 \quad (7.3)$$

Ondorioz, (7.2) eta (7.3) zatituz gero, blokeko elementuen hasierako pisuaren eta pisu berriaren arteko erlazioa izango dugu, (7.4) ekuazioan ematen den modura. Hau da, bloke berrien pisua %33,1 handiagoa izango da, (7.5) adierazpenean ikus daitekeen modura.

$$\frac{W_{berria}}{W_{zaharra}} = \left(\frac{H_{berria}}{H_{zaharra}} \right)^3 \quad (7.4)$$

$$W_{berria} = W_{zaharra} \cdot 1,10^3$$

$$W_{berria} = 1,331 \cdot W_{zaharra} \quad (7.5)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Hori egiaztatzeko, lehenik kontuan hartu beharko da lehen filtroko elementuen pisua, $W_{1,zaharra}$ deitua, (7.6) ekuazioan emandako baldintzaren arabera diseinatu zela.

$$W_{1,zaharra} > \frac{W_{zaharra}}{15} \quad (7.6)$$

Aurreko hori kontuan hartuta, lehen filtroko elementuek bete behar duten baldintza berria (7.7) ekuazioak emandakoa izango da. Kontuan hartzen badugu lehengo mantuko eta filtroko elementuen pisua, (7.6) ekuaziokoa, egiazta dezakegu egokiak direla lehengo filtroko elementuak egungo mantuko elementuentzat, (7.8) adierazpenean ikus daitekeen bezala.

$$W_{1,zaharra} > \frac{W_{berria}}{20} \quad (7.7)$$

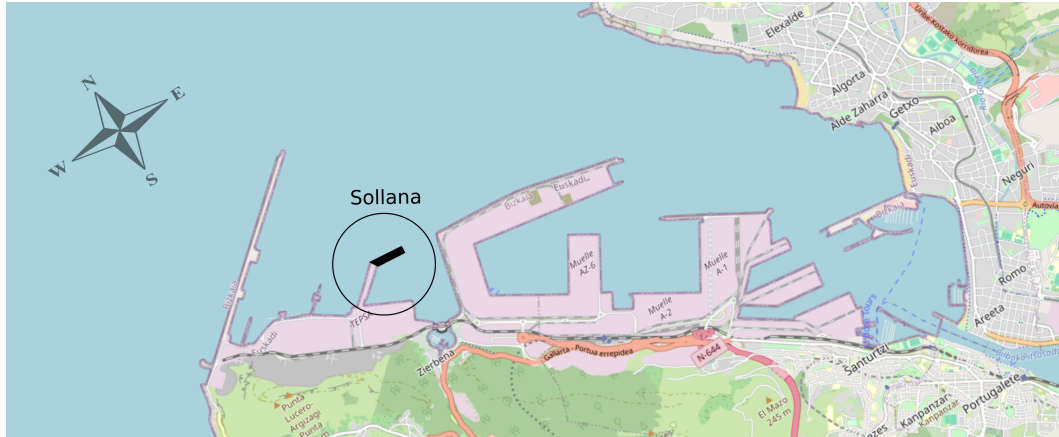
$$\frac{W_{zaharra}}{15} > \frac{W_{berria}}{20}$$

$$\implies \frac{20}{15} > \frac{W_{berria}}{W_{zaharra}}$$

$$1,333 > 1,331 \quad \checkmark \quad (7.8)$$

7.2. Sollana puntako ezponda-dikea²

Punta Sollana moila Zierbenan dago, Bilboko portu-eremuaren barruan (ikus 7.1. irudia). Bilboko portuak moilaren luzapen-lanak esleitu zituen 2012. urtean.



7.1. irudia. Bilboko portuaren oin-planoa, eta Sollanako dike-luzapenaren kokapena (OSM, 2024).

Proiektuak ezponda-dike bat aurreikusi zuen; haren sekzioa 7.2. irudian emandakoa da. Dikearen ezponda 3H:2B zen, eta haren mantu nagusirako hormigoizko bloke kubikoak aurreikusi ziren, 75 tonakoak eta $2,35 \text{ t/m}^3$ pisu espezifikoak zutenak.

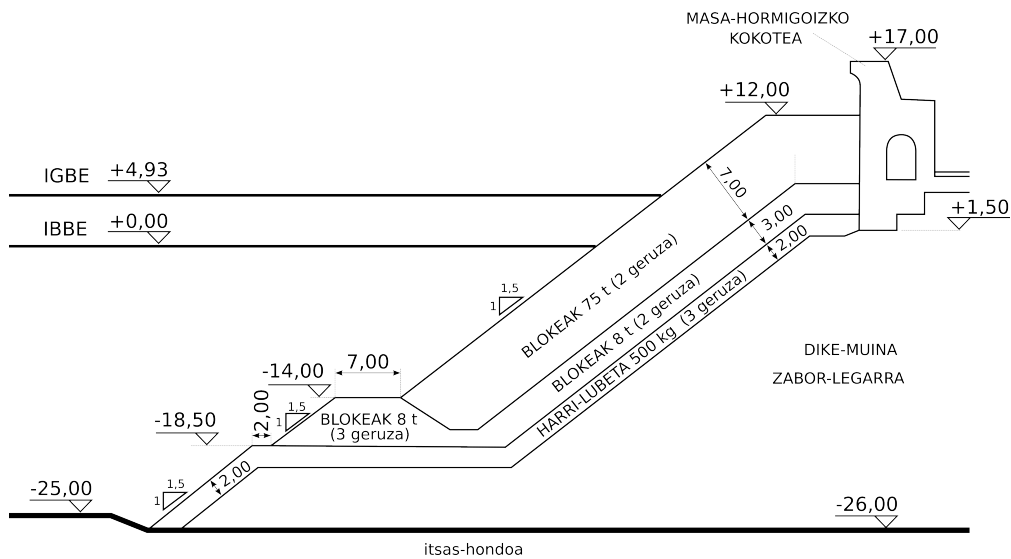
Demagun mantu nagusiko elementuaren diseinua egiteko Hudson irizpidea erabili zela (7.1. taulan ematen dira horretarako koefizienteen balioak), eta diseinuan erabili zen olatu-altuera esanguratsua 8,68 metrokoa zela, haren periodoa 16 segundo izanik.

7.1. taula. Hudson egonkortasun-koefizienteak.

Hudson egonkortasun-koefizientea K_D	Dike-gorputza		Dike-burua	
	Haustura	Haustura gabe	Haustura	Haustura gabe
Kuboak	5,5	6	4	5

Bestalde, Hudson zein Iribarren irizpideetan erabiltzen den hausturarik gabeko olatuaren diseinu-altuerari dagokionez, irizpide berri bat proposatu zen Portuak

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2019-01-10), ohikoaren 3. ariketa.



7.2. irudia. Proiektuko dikearen sekzioa.

eta Kostak Elkartearen III. Biltzar Nazionalean. Irizpide hori aipaturiko elkartearen Portu Ingeniaritzako Batzorde Teknikoaren 2. lan-taldeak egindako ikerketa batean zegoen oinarritua, eta honela zioen: *esperientziarekin baieztatu ondoren, sakonera handiko dikeetan Rock Manual berriak eginiko proposamena gomenda daiteke mantu nagusian; hau da, $H_{1/10}$ erabiliko da harri naturalarekin eta H_s erabiliko da artifizialak diren gainontzeko elementuekin Iribarren eta Hudson irizpideetan.*

Honako hau eskatzen da:

- Egiaztatu diseinuko olatuak hausten ote diren ala ez dikearen oinean. Haus-tura aztertzeko erabili McCowan ($H_b = 0,78 \cdot d$) eta *Shore Protection Manual* (SPM) irizpideak, kontuan hartuta dike aurreko malda 1:20 dela.
- Egiaztatu, Hudson irizpidea erabilita eta Portuak eta Kostak Elkartearen III. Biltzar Nazionalean azalduko irizpide berria kontuan hartuta, sekzioaren egokitasuna: mantu zein filtroen pisuak eta horien lodierak. Honako balio hauek erabil daitezke: $\gamma_w = 1,025 \text{ t/m}^3$ eta $\gamma_{harria} = 2,65 \text{ t/m}^3$.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Olatuak dikearen oinean hausten diren frogatzeko McCowan irizpidea erabiliko dugu lehenik, (7.9) ekuazioren arabera.

$$H_b = 0,78 \cdot d = 0,78 \cdot (25 + 4,93) = 23,34 \text{ m} \quad (7.9)$$

Bigarren irizpidearen kalkulua egiteko, SPM gidak ematen duen nomograma erabiliko dugu, eranskineko E.6 irudian jasoak, dike aurreko sakonera eta haustura erlazioan dituen hain zuzen ere. Nomograma horretan, (7.10) eta (7.11) datuekin sartuta $H_b/d_s \approx 0,95$ dela ondorioztatuko genuke, eta, beraz, H_b zehaztuko (7.12) ekuazioan ikus daitekeen modura.

$$\frac{d_s}{g \cdot T^2} = \frac{(25 + 4,93)}{9,81 \cdot 16^2} = 0,012 \quad (7.10)$$

$$m = 1/20 = 0,05 \quad (7.11)$$

$$\implies \frac{H_b}{d_s} \approx 0,95 \implies H_b = 0,95 \cdot d_s = 0,95 \cdot 29,93 = 28,43 \text{ m} \quad (7.12)$$

Bi irizpide ezberdinekin kalkulatu ditugun bi hauste-altuerak diseinu-olatuaren altuera baino handiagoak direnez ($H_b > H_s$), ez da hausturarik egongo eta olatua hautsi gabe iritsiko da dikearen oinera.

ARIKETAREN EBAZPEN A (a). Aurreko atalean zehaztu bezala, olatua hausten ez bada, $H_d = H_s = 8,68 \text{ m}$ dela esan genezake, hori baita Biltzarrean ematen den irizpide-aldaketa. Hori horrela, blokeen pisua kalkulatzeko besterik ez zaigu geratzen (7.13). Diferentzia txikia bada ere, kalkulaturiko pisua proiektuan aurreikusitakoa baino handiagoa da, baina aldea txikia da. Horrek esan nahi du mantu nagusiko piezak ez liratekeela egokiak.

$$W = \frac{\gamma \cdot H_d^3}{K_D \cdot \cot \alpha \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right)^3} \quad (7.13)$$

$$W = \frac{2,35 \cdot 8,68^3}{6 \cdot 3/2 \cdot \left(\frac{2,35}{1,025} - 1 \right)^3} = 79,1 \text{ t} > 75 \text{ t}$$

Mantu nagusiko blokeen pisua kalkulatu ondoren, lehen eta bigarren iragazkietako elementuen pisua kalkula daiteke, (7.14) eta (7.15) adierazpenekin. Iragazkietako pisuak kalkulatzeko ez gara kalkulatu berri dugun pisan oinarrituko, baizik

eta proiektuan erabili dena baliatuko dugu, horiek baitira proiektuan jarritakoak. Ikus daitekeen modura, lehen filtroan irizpideak emandakoak baino bloke handiagoak erabili dira. Bigarreanean, aldiz, irizpideak emandako tartean dauden harriak erabili dira.

$$\frac{W}{20} \leq W_1 \leq \frac{W}{10} \Rightarrow \frac{75}{20} \leq W_1 \leq \frac{75}{10} \Rightarrow 3,75 \text{ t} \leq W_1 \leq 7,5 \text{ t} \quad (7.14)$$

$$\frac{W_1}{20} \leq W_2 \leq \frac{W_1}{10} \Rightarrow \frac{8}{20} \leq W_2 \leq \frac{8}{10} \Rightarrow 0,4 \text{ t} \leq W_2 \leq 0,8 \text{ t} \quad (7.15)$$

Orain, pisuak kalkulaturik, zehaztu daitezke geruzen lodierak. Hemen ere proiektuan erabili diren pisuentzako egingo dugu azterketa. Mantuaren (7.16), lehen filtroaren (7.17) eta bigarren filtroaren (7.18) geruzei proiektuan eman zaien lodiera bat dator, gutxi gora-behera, egindako kalkuluekin.

$$e = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{75}{2,35}} = 6,4 \text{ m} \quad (7.16)$$

$$e_1 = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_1}{\gamma}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{8}{2,35}} = 3,0 \text{ m} \quad (7.17)$$

$$e_2 = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_2}{\gamma}} = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5}{2,65}} = 1,7 \text{ m} \quad (7.18)$$

7.3. Santanderreko kontradikea³

Santanderreko kostaldean dagoen portu batean dike bat eraiki nahi da, sakonera 6 metrokoa den eremu batean. Dikea erabiliko duen jabeak emandako datuen arabera, dikearen arrisku onargarri maximoa 0,2 da, eta haren bizitza-balioa 25 urte.

ROM gomendioetan ez dagoenez Santanderreko informaziorik, Gijóngo datuak erabiltzea gomendatzen da. Horretarako, Gijóngo buia sakonera mugagabea da-goela joko da. Hala, buiaren eta dike-kokapenaren arteko barreiatze-koefizienteak 7.2. taulan emandakoak dira. Taulan agertzen ez diren noranzkoetatik datozen olatuak baztergarriak direla joko da gure analisisian.

7.2. taula. Barreiatze-koefizienteak buiaren eta dikearen artean.

Noranzkoa	NW	NNW	N	NNE	NE
K_{rs}	0,74	0,81	0,96	0,86	0,72

Dikeari dagokionez, 2H:1B ezponda erabiltzea proposatu da aurreko azterketa bazu-tuetan oinarriturik. Inguruan dauden harrobietatik atera daitezkeen harriak 5 tonakoak izan daitezke gehienez ere, horien pisu espezifikoa $2,3 \text{ t/m}^3$ izanik.

Honako hau eskatzen da:

- Dikearen diseinuan erabiliko den olatu-altuera (dikearen oinean). Haustura aztertzeke, erabili McCowan irizpidea.
- Definitu mantu nagusiarentzako eta lehen filtroarentzako materiala eta elementuen pisua, Iribarren irizpidea erabilita. Harria lehenetsiko dugu, posible baldin bada. Hormigoia-aren pisu espezifikoa $2,1 \text{ t/m}^3$ dela joko dugu. Dikea aztertzeke dike-gorputza aztertu, olatu elkarzutentzat eta matxura-hasierarako. Erabili $\gamma_w=1,025 \text{ t/m}^3$.

ARIKETAREN EBAZPEN A (a). Dikearen diseinuan erabiliko den olatu-altuera zehazteko, ROM gomendioek emandako datuak erabiliko ditugu. Horretarako arriskua, itzultze-denbora eta obraren biziraupena erlazionatzen dituen adierazpena erabiliko dugu, (7.19) adierazpenekoa. Hala, obraren diseinuan erabiliko dugun errepikatze-denbora (7.20) adierazpenekoa izango da.

³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2014/15 ikasturtea (2015-01-16), ohikoaren 2. ariketa.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{L_f} \quad (7.19)$$

$$0,2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{25} \implies T_r = 113 \text{ urte} \quad (7.20)$$

Errepikatze-denbora zehazturik, ROM 0.3-91 atlasean Gijóngo buiaren muturreko erregimen eskalarraren (D taula) % 90 konfiantza-tartea erabiliz, $H_{s,buia} \approx 10,5$ m dela zehaztuko dugu; nomograma hori irudian jaso da. Noranzkoaren koefizienteak (K_α) eta barreiatze-koefizienteak kontuan hartuta, (7.21) ekuazioak emandakoa izango da olatuaren altuera noranzko bakoitzarentzat dike-oinean. Enuntziatuak zioen bezala, buia sakonera mugagabea dagoela suposatuz, $H_{s,buia} = H_{s,o}$ izango da.

$$H_{s,oina} = K_\alpha \cdot H_{s,o} \cdot K_{rs} \quad (7.21)$$

Azken erlazio hori kontuan hartuta, dike-oinean izango genituzkeen olatu-altuerak 7.3. taulan jaso dira. Lorturiko altuera horietan garaiena aukeratuko genuke dikea diseinatzeko, hots, 8,08 m, NNW noranzkoaren olatuei dagokiena.

7.3. taula. Buiaren eta dikearen arteko barreiatze-koefizienteak, K_{rs} , noranzko-koefizientea, K_α , eta dike-oineko olatu-altuera, $H_{s,oina}$.

Noranzkoa	NW	NNW	N	NNE	NE
K_{rs}	0,74	0,81	0,96	0,86	0,72
K_α	1,00	0,95	0,80	0,75	0,70
$H_{s,oina}$	7,77	8,08	8,06	6,77	5,29

Bestalde, McCowan haustura-irizpidea erabiltzen badugu, (7.22) ekuazioaren arabera, olatuak hondoaren eraginagatik hautsi egingo direla ondoriozta dezakegu, eta ez lukete 4,68 m gaindituko. Ondorioz, hori izango da dikean erabiliko dugun diseinu-olatuaren altuera.

$$H_b = 0,78 \cdot d = 0,78 \cdot 6 = 4,68 \text{ m} \implies H_d = H_b = 4,68 \text{ m} \quad (7.22)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Dikearen mantu nagusian harriak ipiniko ditugula suposatuko dugu lehenik, eta horien pisua kalkulatu (7.23) ekuazioaren arabera. Harriak ditugunez, zimurtasun-koefizientea 2,38 izango da. Ezponda 2H:1B denez, $\cot \alpha < \cot \alpha_c$ izango da eta beheranzko oreka-egoeran egin beharko da analisisa. Dike-gorputza, olatu elkarzutak eta matxura-hasierarako kasua aztertzen ari garenez, $N = 0,43$ izango da eranskineko E.11 taularen arabera. Emaitzak erakusten du ezingo direla harriak erabili dikearen mantu nagusian, harrientzako behar den pisua baita harrobian lortu daitekeena baino handiagoa.

$$W_{ha} = \frac{N \cdot H_d^3 \cdot \gamma / \gamma_w}{(f \cdot \cos \alpha \pm \sin \alpha)^3 \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right)^3} \quad (7.23)$$

$$W_{ha} = \frac{0,43 \cdot 4,68^3 \cdot 2,3/1,025}{(2,38 \cdot \cos 26,6 - \sin 26,6)^3 \cdot \left(\frac{2,3}{1,025} - 1 \right)^3} = 10,8 \text{ t} > 5 \text{ t}$$

Beraz, hormigoiarekin egingo dugu kalkulua. N koefizienteak eta f aldagaiak balio bera dute hormigoizko blokeentzat. Aldiz, hormigoizko blokeentzat $\cot_c = 2,80^\circ$ da, baina beheranzko oreka-egoera izaten jarraituko du. Hala, kalkulaturiko blokeen pisua txikiagoa da (7.24) harriekin kalkulaturikoa baino.

$$W_{ho} = \frac{0,43 \cdot 4,68^3 \cdot 2,1/1,025}{(2,38 \cdot \cos 26,6^\circ - \sin 26,6^\circ)^3 \cdot \left(\frac{2,1}{1,025} - 1 \right)^3} = 8,5 \text{ t} \quad (7.24)$$

Mantu nagusiko blokeen pisua hori izanik, filtroaren pisua (7.25) irizpidearen arabera zehaztu daiteke; hau da, adibidez 500 kg izan daitekeela zehaztu dezakegu.

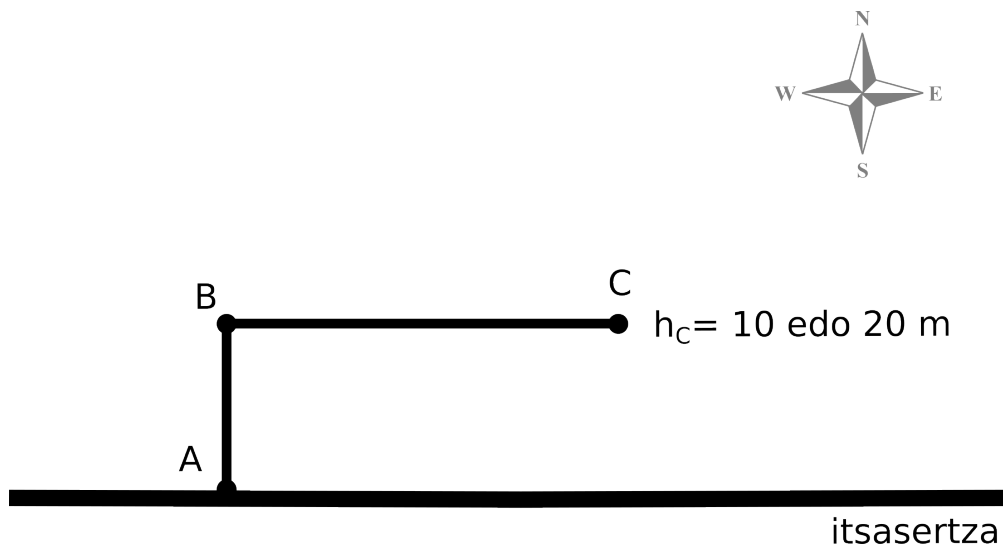
$$\frac{W}{20} \leq W_1 \leq \frac{W}{10} \quad (7.25)$$

$$\frac{8,5}{20} \leq W_1 \leq \frac{8,5}{10} \quad (7.26)$$

$$0,42 \text{ t} \leq W_1 \leq 0,85 \text{ t} \quad (7.27)$$

7.4. Energia sortzeko zentrala⁴

Bizkaiko kostaldean olatuen energia ustiatuko duen zentral baten proiektua garatzen ari da EHU. Zentrala 7.3. irudiko \overline{BC} tartean eraikiko da, eta \overline{AB} tartean kontradike bat jarriko da zentralaren atzealdea babesteko. Beraz, zentralak \overline{BC} tartean jotzen duten uhinen energia ustiatuko du, eta babesean geratuko da \overline{ABC} ren eta kostaren arteko eremua. Zentralaren eragin ekonomikoa baxua da, baita bizitza-galeren arriskua ere.



7.3. irudia. Dikearen eta kontradikearen eskema.

Zentralaren ustiapenerako olatuen bi noranzko hartuko dira soilik kontuan: N eta NW. Gainera, zentralak soilik ustiatuko du energia olatu-altuera adierazgarriak 0,5 metro eta 4 metro artekoak direnean. Zentrala egongo den \overline{BC} tartea eraikitzeke bi sakonera ari dira aztertzen proiektugileak, -10 m eta -20 m. \overline{BC} tartea kostarekiko paraleloa da, eta hura iparraldera begira dago. \overline{AB} tartea kostarekiko elkarzuta da. Sakonera mugagabetik \overline{BC} tarterako $K_{r,s}$ koefizienteak 7.4. taulan jasoak dira; balio horiek periodoarekin ez direla aldatzen joko da, kalkulua errazteko. Itsas hondoren malda %3 da.

Zentrala eraikiko den eremuko itsas klima, sakonera mugagabea, beheago adierazitako taulek emandakoa da, 7.5. eta 7.6. taulek hain zuzen ere. Uhinen periodoak konstanteak direla joko da aipatutako erregimen horietan. Badakigu, baita ere, N noranzkoa duten olatuek 240 orduz gainditzen dutela 3 metroko altuera uda garaian.

⁴Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2019/20 ikasturtea (2020-06-18), ezohikoaren D. ariketa.

7.4. taula. K_{rs} koefizienteak sakonera mugagabetik BC tartera.

K_{rs}	-10 m	-20 m
N	0,95	0,92
NW	0,35	0,32

7.5. taula. Olatuen batez besteko erregimena sakonera mugagabeen (Weibull biparametrikoa).

Noranzkoa	T (s)	Negua (azaroa – apirila)			Uda (maiatza – urria)		
		Frekuentzia %	B m	C	Frekuentzia %	B m	C
N	8	45	2,2	1,5	40	1,4	1,4
NW	6	35	1,8	2	30	1	1,5
Barealdiak	-	20	-	-	30	-	-

7.6. taula. Olatuen muturreko erregimena sakonera mugagabeen (Weibull).

Noranzkoa	T (s)	Negua (azaroa – apirila)				Uda (maiatza – urria)			
		Frekuentzia %	A	B m	C	Frekuentzia %	A	B m	C
N	12	50	1,2	2,5	1,5	40	0,8	1,5	1,5
NW	10	35	1	2	2	30	0,5	1	1,5
Barealdiak	-	15	-	-	-	30	-	-	-

- Zehaztu ezazu, energia espezifikoaren ikuspegitik, zer sakoneratan ipiniko zenukeen zentralaren dikea, -10 edo -20 metrokoan.
- Zehaztu ezazu zentrala urtean zenbat orduz izango den gai energia sortzeko.
- \overline{AB} kontradikearen B puntuan, babesean, igerileku artifiziala eraiki nahi da zentralaren egitura aprobeztatuz, mareekin beteko dena. Dikeak igerilekua babes dezan, zehaztu \overline{BC} dikeak izan beharko lukeen luzera. Horretarako baldintza izango da uda garaiko ekaitzetan N noranzkoa duten olatu-altuera adierazgarriek igerilekuan 0,5 m gainditzeko probabilitatea ezingo dela izan %2 baino handiagoa.

- (d) Zehaztu AB dikearen gorputzeko sekzioan erabili beharko liratekeen hormigoizko blokeen gutxieneko pisuak Hudson metodoa erabiliz (demagun ausaz eta bi geruzetan ipintzen direla), eta B puntuko olatu-ezaugarrietan oinarrituz, dikearen ezponda balitz 3H:2B. Diseinu-olatuaren altuera zehazteko, erabili ROM gomendioetan emandako Bilboko buiaren datuak (ikus 5.4. irudia). Hausturarako, erabili McCowan irizpidea. Itsas uraren eta hormigoia-
ren pisu espezifikoa, hurrenez hurren, 1025 kg/m^3 eta $2,35 \text{ t/m}^3$ direla joko da.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). *Energia espezifikoa* uhinaren energia totala azalera unitateko ematen digu, (7.28) adierazpenean jaso. Adierazpen horretan, sakonera jakineko olatu-altuera sakonera mugagabeko olatu-altueraz eta barreiatze-koefizienteaz ordezkatu da baita ere. Kontuan hartzen badugu sakonera mugagabeen olatu-altuera finkoa dela noranzko jakinarentzat, aurreko adierazpena (7.29) ekuaziokoaz ordezkatu daiteke, sakonerarekin aldatzen den aldagai bakarria K_{rs} baita; besteak konstanteak dira. Hala, adierazpen horretan ikus daiteke barreiatzeko koefizientearen menpe (K_{rs}) dagoela energia espezifikoa.

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot (K_{rs}^{o \rightarrow BC} \cdot H_o)^2 \quad (7.28)$$

$$= \textit{konstantea} \cdot (K_{rs}^{o \rightarrow BC})^2 \quad (7.29)$$

Horren arabera, energia espezifikorik handiena ($K_{rs}^{o \rightarrow BC})^2$ balio handienak emango liguke. 7.4. taulako balioei erreparatzen badiegu, esan dezakegu -10 metroko sakonera izango dutela olatuek energia espezifikorik handiena, sakonera horretan handiagoak baitira $K_{rs}^{o \rightarrow BC}$ koefizienteak bi noranzkoetako olatuentzat.

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Zentralaren operatibitatea aztertzeko batez besteko erregimena baliatuko dugu, 7.5. taulan emandako datuekin. Dike-muturreko olatuen ezaugarriak zehaztu beharko ditugu lehenik sakonera mugagabeen, aipaturiko banaketa-funtzioak sakonera mugagabeko olatu-altuerari dagozkie eta. Sakonera mugagabeko balioekin zehaztu dezakegu olatu-altuera tarte jakinean egoteko probabilitatea (7.30) adierazpenarekin ($H_1 < H_2$). Gogoan izan banaketa-funtzioaren definizioak altuera jakina ez gainditzearen probabilitatea adierazten digula.

$$F(H_1 < H_s < H_2) = F(H_s < H_2) - F(H_s < H_1) \quad (7.30)$$

Beraz, altuera-tartean mugako bi balioentzat kalkulatu ditugu probabilitateak, 0,5 m eta 4,0 m, barreiatze-balioak kontuan hartuta. Sakonera mugagabeko balio horiek (7.31) eta (7.34) arteko ekuazioetan emandakoak dira.

$$(H_o^N)_{min} = \frac{0,5}{0,95} = 0,53 \text{ m} \quad (7.31)$$

$$(H_o^N)_{max} = \frac{4,0}{0,95} = 4,21 \text{ m} \quad (7.32)$$

$$(H_o^{NW})_{min} = \frac{0,5}{0,35} = 1,43 \text{ m} \quad (7.33)$$

$$(H_o^{NW})_{max} = \frac{4,0}{0,35} = 11,43 \text{ m} \quad (7.34)$$

Horrela, kalkula daitezke olatu-altuera zehatzak ez gainditzearen probabilitateak. Balio horiek zehazteko, kontuan hartuko dugu (??) adierazpena, hots, altuera bat ez gainditzearen probabilitatea ematen diguna. Bestalde, gogoan izan gainditzearen eta ez-gainditzearen probabilitateak osagarriak direla; hots, $F(H < H_s) = 1 - F(H_s < H)$.

Noranzko bakoitzak bere probabilitatea du, balio desberdinekin uda eta negurako, 7.5. taulak erakusten duen moduan. Hori dela eta, olatu-altuera ez gainditua izateko probabilitateak bakoitza bere aldetik kalkulatu dugu. N noranzkoari dagozkionak (7.35) eta (7.38) adierazpenetan jasotakoak dira. Ikusi adierazpen horietan sakonera mugagabeko olatu-altuerak darabiltzagula, (7.31) eta (7.34) arteko adierazpenetakoak.

$$[F(H_s < 4,0)]_{negua}^N = 1 - \exp\left(-\left(\frac{4,21}{2,2}\right)^{1,5}\right) = 0,9292 \quad (7.35)$$

$$[F(H_s < 0,5)]_{negua}^N = 1 - \exp\left(-\left(\frac{0,53}{2,2}\right)^{1,5}\right) = 0,1115 \quad (7.36)$$

$$[F(H_s < 4,0)]_{uda}^N = 1 - \exp\left(-\left(\frac{4,21}{1,4}\right)^{1,4}\right) = 0,9906 \quad (7.37)$$

$$[F(H_s < 0,5)]_{uda}^N = 1 - \exp\left(-\left(\frac{0,53}{1,4}\right)^{1,4}\right) = 0,2264 \quad (7.38)$$

Modu berean kalkulatuko ditugu, baita ere, NW noranzkoari dagozkionak. Kalkulu horiek (7.39) eta (7.42) adierazpenetakoak dira.

$$[F(H_s < 4,0)]_{negua}^{NW} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{11,43}{1,8}\right)^{2,0}\right) = 1,0000 \quad (7.39)$$

$$[F(H_s < 0,5)]_{negua}^{NW} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{1,43}{1,8}\right)^{2,0}\right) = 0,4680 \quad (7.40)$$

$$[F(H_s < 4,0)]_{uda}^{NW} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{11,43}{1}\right)^{1,5}\right) = 1,0000 \quad (7.41)$$

$$[F(H_s < 0,5)]_{uda}^{NW} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{1,43}{1}\right)^{1,5}\right) = 0,8191 \quad (7.42)$$

Orain bai, zehaztu dezagun zer-nolakoa den olatuak altuera-bitarteetan egoteko probabilitateak (7.43) adierazpenarekin. Esan bezala, noranzko eta sasoi bakoitza bere aldetik kalkulatu behar dugu, (7.44) adierazpenak erakusten duen moduan. Gogoan izan adierazpen horietan kontuan hartu behar dela sasoi eta noranzko bakoitzaren agertze-probabilitatea edo -maiztasuna, P_i eta P^j deitu ditugunak hurrenez hurren.

$$F(0,5 < H_s < 4,0) = F(H_s < 4,0) - F(H_s < 0,5) \quad (7.43)$$

$$\begin{aligned} &= \left[F(H_s < 4,0) - F(H_s < 0,5) \right]_{negua}^N \cdot P_{negua} \cdot P^N \\ &+ \left[F(H_s < 4,0) - F(H_s < 0,5) \right]_{negua}^{NW} \cdot P_{negua} \cdot P^{NW} \\ &+ \left[F(H_s < 4,0) - F(H_s < 0,5) \right]_{uda}^N \cdot P_{uda} \cdot P^N \\ &+ \left[F(H_s < 4,0) - F(H_s < 0,5) \right]_{uda}^{NW} \cdot P_{uda} \cdot P^{NW} \quad (7.44) \end{aligned}$$

Aipaturiko (7.44) adierazpenean lehenago lortu ditugun balioak ordezkatzuz gero, (7.45) ekuazioan erakusten den moduan, olatuak adierazitako altueren artean

egoteko probabilitate osoa lortuko dugu. Horrela, azken probabilitate hori (7.45) adierazpenekoa litzateke. Probabilitate horrek adierazten du urte osoko denboraren zer ehunekotan betetzen den bilatu dugun baldintza. Gogoan izan sasoi edo urtaro bakoitzaren maiztasuna %50 edo 0,5 dela.

Hala ere, zentralaren operatibitatea ordu kopurutan adieraziko dugu, kontuan hartuz urteak 8760 h dituela. Hala, zentralaren operatibitatea (7.46) adierazpenekoa izango da, hau da, urtean ordu kopuru horretan izango da gai olatuen energia ustiatzeko.

$$\begin{aligned}
 F(0,5 < H_s < 4,0) &= \left[0,9292 - 0,1115 \right]_{negua}^N \cdot 0,5 \cdot 0,45 \\
 &+ \left[1,0000 - 0,4680 \right]_{negua}^{NW} \cdot 0,5 \cdot 0,35 \\
 &+ \left[0,9906 - 0,2264 \right]_{uda}^N \cdot 0,5 \cdot 0,40 \\
 &+ \left[1,0000 - 0,8191 \right]_{uda}^{NW} \cdot 0,5 \cdot 0,30 \\
 &= 0,4570 = \%45,70
 \end{aligned} \tag{7.45}$$

$$\implies \text{operatibitatea} = 8760 \text{ h} \cdot 0,4570 = 4003 \text{ h} \tag{7.46}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Portu barruko B puntuan olatuen eragina aztertu nahi bada, olatuak A puntutik B puntura nola aldatzen diren kontuan hartu beharko dugu, hots, difrakzioa aztertuko dugu. Edonola ere, ezin dugu difrakzioa ohiko moduan aztertu dike-luzera jakin gabe, hori baita eskatzen zai-guna.

Beraz, lehenik, enuntziatuak ematen digun baldintza zer olaturi dagokion zehaztu-ko dugu (7.47) adierazpenarekin, ezaguna baita banaketa-funtzioa. Gogoan izan, oraingoan, muturreko baldintzei dagozkien banaketa-funtzioak baliatuko ditugula, baldintza hori ematen baitu enuntziatuak.

Adierazpenean ezagunak dira A , B , eta C koefizienteak (udari eta N noranzkoari dagozkie), baita 0,5 metroko olatua gainditzeko probabilitatea ere (%2 izango da). Adierazpen horretan baldintza jakina betetzen duen olatu-altuera zehaztu nahi dugunez, H askatu eta (7.48) baliatuko dugu. Aipaturiko baldintza betetzen

duen olatu-altuera, beraz, (7.49) adierazpenak emandakoa da. Balio hori sakonera mugagabeko olatu-altuerari dagokio.

$$F_W(H < H_s) = \exp \left(- \left(\frac{H - A}{B} \right)^C \right) \quad (7.47)$$

$$-\ln(F_W) = \left(\frac{H - A}{B} \right)^C$$

$$H = (-\ln(F_W))^{1/C} \cdot B + A \quad (7.48)$$

$$H = (-\ln(0,02))^{1/1,5} \cdot 1,5 + 0,8 = 4,52 \text{ m} \equiv H_o \quad (7.49)$$

Edonola ere, olatu-altuera hori B punturaino nola aldatzen den kontuan hartu behar dugu. Horretarako, lehenik, errefrakzioaren eta *shoaling*aren eragina zehaztuko dugu, (7.50) adierazpenarekin. Behin dike-muturrean zer altuera dagokion zehaztuta, gaintitu nahi ez dugun B puntuko altuera lortzeko difrakzioaren magnitudea zehaztu beharko dugu, (7.51) adierazpenean bezala. Beraz, badakigu zer nolako difrakzioa izan behar duen olatuak igerilekuari kalterik ez egiteko adierazitako baldintzetan.

$$H_C = K_{rs}^{o \rightarrow C} \cdot H_o^N = 0,95 \cdot 4,52 = 4,29 \text{ m} \quad (7.50)$$

$$H_B = K_d \cdot H_C \quad \Longrightarrow \quad K_d = \frac{H_B}{H_C} = \frac{0,5 \text{ m}}{4,52 \text{ m}} = 0,11 \quad (7.51)$$

Aurrera egin baino lehen, zehaztu dezagun olatuaren uhin-luzera (7.52) adierazpenarekin; ondoren, dispertsio-erlazioaren balioak laburbiltzen dituzten taulak baliatuz, dike-muturreko uhin-luzera zehaztuko dugu, (7.53) adierazpenean emana.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 12^2}{2 \cdot \pi} = 224,8 \text{ m} \quad (7.52)$$

$$\frac{d_C}{L_o} = \frac{10}{224,8} = 0,045 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{E.7} \quad \frac{d_C}{L_C} = 0,08883 \quad \Rightarrow \quad L_C = 112,6 \text{ m} \quad (7.53)$$

Olatu-altuera hori, baina, dike-muturrean izango genukeena denez, zehaztu dezagun zer luzera behar duen dikeak $H_B < 0,5 \text{ m}$ baldintza bete dadin. Kasu honetan,

badakigu olatuen eraso-angelua kostarekiko elkarzuta dela; beraz, $\alpha_C = 90^\circ$. Badakigu B puntua dikearen parean dagoela ere; beraz, $\beta_B = 0^\circ$. Hala, K_d ezagutzen dugunez, baldintza hori beteko duen r/L erlazioa zehaztu dezakegu eranskineko E.8 taularekin, (7.54) adierazpenean erakusten den moduan. Ekuazio horretako balioa balio ezagunekin interpolatu da.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_C = 90^\circ \\ \beta_B = 0^\circ \\ K_d^{C \rightarrow B} = 0,11 \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{E.8} \frac{r_B}{L_C} = 5 - \frac{5-2}{16-10} \cdot (11-10) = 4,5 \quad (7.54)$$

Ondorioz, uhin-luzera eta r/L erlazioa jakinik, dikeak izan beharko lukeen gutxieneko luzera zehaztu dezakegu, (7.55) adierazpenean erakusten den moduan. Dikea hori baino laburragoa balitz, ez litzateke aipaturiko baldintza beteko.

$$\frac{r_C}{L_C} = 4,5 \quad \implies \quad r_C = 4,5 \cdot L_C = 4,5 \cdot 112,6 = 507 \text{ m} \quad (7.55)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Dikeko blokeen pisua zehazteko, lehenik, diseinu-olatuaren altuera zehaztu behar da. Dikearen kasuan olatu-altuerarik handiena aukeratuko dugu, dauzkagun datuetan oinarrituz. Horretarako, obraren diseinuan baliatuko den olatuaren errepikatze-denbora zehaztuko dugu lehenik, (7.56) adierazpenarekin.

Kasu honetan, zehaztu dezakegu obraren arrisku onargarri maximoa ROM-02.90 gomendioko 3.2.3.1.2. taula baliatuz. Dike etzana denez, eragin ekonomiko baxukoa eta probabilitate baxuko bizi-tzagalera, arrisku hori 0,5 izango da.

Zehaztu daiteke obraren bizi-tzagalera ere, ROM-02.90 gomendioko 2.2.1.1. taula baliatuz. Obra zentrala denez, industria-izaera izango du. Gainera, obraren helburua energia sortzea da, eta, enuntziatuan aipatzen denez, ez dago bizi-tzagalera arriskurik. Ondorioz, aipaturiko taularen arabera, 15 urtekoa izango da bizi-tzagalera. Horrela, olatuaren errepikatze-denbora (7.57) adierazpenekoa litzateke.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{L_f} \quad (7.56)$$

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - E)^{L_f}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,5)^{1/15}} = 22,2 \text{ urte} \quad (7.57)$$

Diseinuko olatuaren errepikatze-denbora zehaztuta, buian agertzeko probabilitate hori duen olatua finka daiteke, 5.4. irudian %90 konfiantza-tarteari dagokion olatu-altuera aukeratuz. Altuera hori (7.58) adierazpenekoa da. Gogoratu noranzkoaren arabera K_α koefiziente jakina aplikatu beharko zaiola, aipaturiko irudian emana.

$$T_r = 22,5 \text{ urte} \xrightarrow[\text{ikus 5.4. irudia}]{\text{ROM-03.91}} H_b \approx 9,8 \text{ m} \quad (7.58)$$

Edonola ere, olatu-altuera hori buiakoa da, eta guk dikean zehaztu behar dugu noranzko bakoitzarentzat zer-nolako altuera izango genukeen. Gogoan izan olatu-altuera maximoa dela diseinurako erabiliko duguna. Beraz, bi baldintza hartuko beharko ditugu kontuan: batetik, noranzkoaren arabera olatu-altuera ezberdina dela eta, bestetik, periodoarekin aldatu egiten dela olatu-altuera.

Periodoari dagokionez, ROM-03.91 gomendioak ematen digu puntako periodoentzako balio-tartea Bilboko buiarentzat. Tarte hori olatu-altuerarekin erlazionatua dago, (7.59) adierazpenean bezala. Edonola ere, tarteko balio handienarentzako goi-muga zehazten du gomendioak berak; 22 s, kasu honetan. Beraz, erabiliko dugun periodo-tartea (7.60) adierazpenekoa izango da.

$$T_p = (5 \sim 8,5) \cdot \sqrt{H_s} = (5 \sim 8,5) \cdot 9,8 \text{ m} = (15,6 \text{ s} \sim 26,6 \text{ s}) \quad (7.59)$$

$$\implies T_p = (16 \text{ s} \sim 22 \text{ s}) \quad (7.60)$$

Orain, zehaztu dezagun dikearen diseinuan erabiliko dugun olatu-altuera. Horretarako, kontuan hartuta ditugu *shoaling*aren eta errefrakzioaren eraginak, sakonera mugagabetik buiara, (7.61) adierazpenarekin, eta mugagabetik dikera, (7.62) adierazpenarekin. Biak konbinatuz lortuko dugu dikea eta buiako olatu-altuerak erlazionatzen dituen adierazpena; (7.63), hain zuzen ere.

$$H_b \cdot K_\alpha = K_{rs}^{o \rightarrow b} \cdot H_o \quad (7.61)$$

$$H_{BC} = K_{rs}^{o \rightarrow BC} \cdot H_o \quad (7.62)$$

$$\implies H_{BC} = K_\alpha \cdot H_b \cdot \frac{K_{rs}^{o \rightarrow BC}}{K_{rs}^{o \rightarrow b}} \quad (7.63)$$

Guk, baina, olatu-altuera maximoa zehaztu nahi dugu. Sakonera mugagabetik dikera barreatze-koefizienteak periodoarekin aldatzen ez direla jotzen denez (hori, noski, ez da horrela benetan), noranzko bakoitzaren altuera maximoa (7.64) eta (7.65) adierazpenek emandakoa izango da eta $((K_{rs}^{o \rightarrow b})_{min})$ aukeratzeko garaian ROM-03.91 gomendioko 2.7.1 taula baliatu dugu. Beraz, iparraldeko jatorria duen olatu-altuera erabiliko dugu dikearen diseinuan.

$$(H_{BC})_{max}^N = K_\alpha \cdot H_b \cdot \frac{K_{rs}^{o \rightarrow BC}}{(K_{rs}^{o \rightarrow b})_{min}^N} = 0,8 \cdot 9,8 \cdot \frac{0,95}{0,80(T=19\text{ s})} = 9,31\text{ m} \quad (7.64)$$

$$(H_{BC})_{max}^{NW} = K_\alpha \cdot H_b \cdot \frac{K_{rs}^{o \rightarrow BC}}{(K_{rs}^{o \rightarrow b})_{min}^{NW}} = 1,0 \cdot 9,8 \cdot \frac{0,35}{0,80(T=17\text{ s})} = 4,31\text{ m} \quad (7.65)$$

Dikeko blokeen pisua zehaztu baino lehen, olatuak dikera iritsi aurretik hausten ote diren zehaztu behar da. Horretarako McCowan irizpidea erabiliko dugu, (7.66) adierazpenean emana. Hala lorturiko balioak adierazten du olatua 10 metroko sakonera baino lehen hausten dela.

$$H_b \approx 0,78 \cdot 10 = 7,8\text{ m} < 9,31\text{ m} \quad (7.66)$$

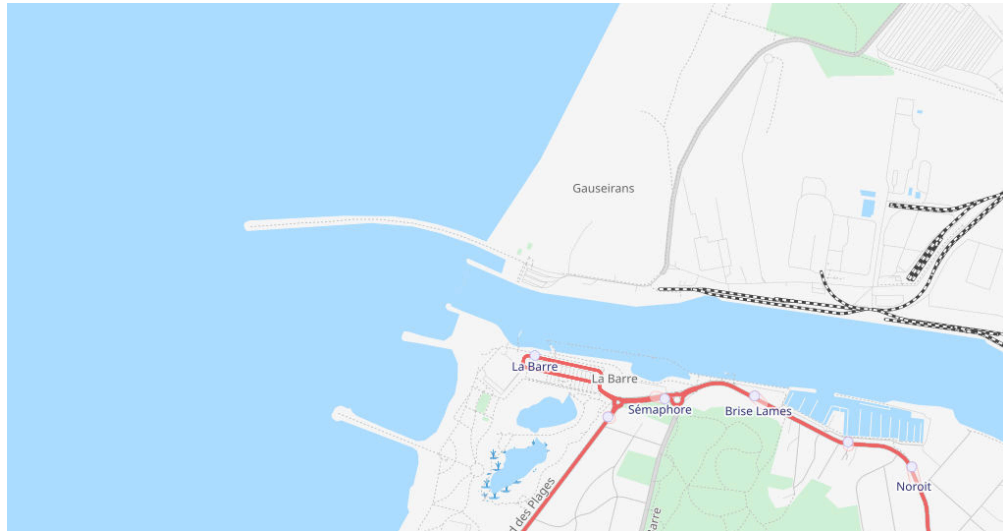
Beraz, dikearen diseinuan olatuaren hauste-altuera baliatuko dugu. Blokeen gutxieneko pisua Hudson irizpidearen arabera zehaztuko dugu, (7.67) adierazpeneakoa. Adierazpen horretan, H_d hauste-altuera izango da, γ harrien pisu espezifikoa, γ_w itsas uraren pisu espezifikoa, eta $\cot \alpha$ dike-ezpondaren H/B erlazioa. K_D Hudsonen proposaturiko balioa da (ikus eranskinen E.14 taula), kontuan izanda dike-gorputza ari garela diseinatzen, olatua hautsia dela, eta blokeak ausaz ipiniak direla bi geruzetan. Blokeen gutxieneko pisua (7.68) adierazpeneakoa da.

$$W = \frac{\gamma \cdot H_d^3}{K_D \cdot \cot \alpha \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right)^3} \quad (7.67)$$

$$W = \frac{2,35 \cdot 7,8^3}{5,5 \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{2,35}{1,025} - 1 \right)^3} = 62,6 \text{ t} \quad (7.68)$$

7.5. Ezponda-dikea Baionako portuan⁵

Baionako portuak ezponda-dike bat du sarbidea babesteko, 7.4. irudiko planoan ikus daitekeena.



7.4. irudia. Baionako portuaren oinplanoa (OSM, 2024).

Dikeak itsasaldetik 2:1 (H:B) inklinazioa du, eta kuboz osatua dago. Barruko ezpondaren malda ere 2:1 (H:B) da. Dikeak, gainera, 2 metroko altuera duen kokote bat du; haren kontra zabaltzen da goiko berma. Kokotea errektangularra da, eta 1,5 metroko zabalera du; haren atzean 5,5 metroko zabalera duen pasealekua dago, +6,5 metrora kokatua.

Badakigu, portuaren zeroarekiko, +4,5 dela itsasgoraren kota, eta dike-oinarria $-7,5$ kotan dagoela portuko zeroarekiko. Portu inguruko eremuan 25 tonako harri naturala atera daiteke gehienez ere.

Hauek dira dike-diseinuan erabilitako irizpideak:

- Kalkulurako ekaitza: $H_s = 8,5$ m, $T = 15$ s, $H_{50} = 9,5$ m.
- Haustura-irizpidea: McCowan.
- Itsas uraren dentsitatea: 1025 kg/m³.
- Hormigoi armatuaren dentsitatea: 2500 kg/m³.
- Masa-hormigoiaren dentsitatea: 2300 kg/m³.

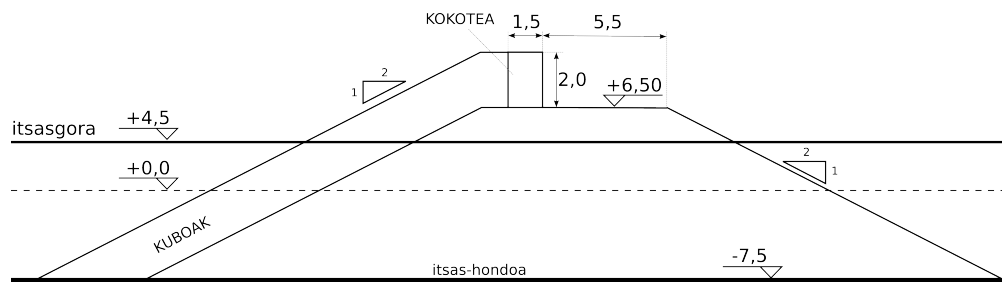
⁵Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2022/23 ikasturtea (2023-01-17), finalaren 1. ariketa.

- Harri naturalaren dentsitatea: 2600 kg/m^3 .

Honako hau eskatzen da:

- Marraztu dikearen eskema.
- Losada eta Giménez-Curto metodoa erabiliz, kalkulatu itsasaldeko mantu nagusiaren zein bigarren mailako piezen pisuak eta neurriak nukleora iritsi arte, matxuraren hasiera-egoerarako.
- Dikea iragazkorra dela eta porositatea $P = 0,4$ dela jakinda, zein izango da haren islapen-koefizientea?
- Dakigunez, dikearen gaineko pasealekua $+6,5$ kotan dago. Koroatzearen zabalera, B , honako hauek osatuko dute: itsasaldeko mantu nagusiaren bi piezek, kokote errektangularrak eta pasealekuak. Zein izango da olatuen igorpen-koefizientea?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Dikearen sekzioari dagozkion datuak irudian jaso dira, enuntziatuak ematen dituen irizpideak islatzen dituela.



7.5. irudia. Enuntziatuan deskribaturiko dikearen eskema.

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Dikearen itsasaldeko kanpo-geruzetan ipini beharko den geruza kopurua eta geruzako blokeen pisuak eta neurriak zehazteko mantu nagusiko blokeen pisuak zehaztuko ditugu lehenik, (7.74) adierazpena baliatuz.

Horretarako, baina, lehenik aipaturiko adierazpeneko aldagaiak zehaztu beharko ditugu. Lehendabizi, egonkortasun-funtzioaren balio maximoa zehaztu dezakegu, kontuan izanik enuntziatuan ematen diren baldintzak, (7.69) adierazpenean jasoak.

$$\left. \begin{array}{l} \text{matxuraren hasiera} \\ \cot \alpha = 2 \\ \text{kuboak (axaxa)} \end{array} \right\} \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.15}} \Psi = 0,047 \quad (7.69)$$

Olatu-altuera zehazteko dike aurreko sakonera baliatuko dugu, (7.70) adierazpenekoa. Sakonera hori kontuan hartuta, + olatuaren hauste-altuera zehaztuko dugu, enuntziatuko McCowan irizpidearekin, (7.71) adierazpenean bezala. Hauste-altuera diseinu-altuera baino txikiagoa denez, olatu hautsiaren altuera baliatuko dugu blokeen pisua kalkulatzekoan.

$$h_b = 4,5 - (-7,5) = 12,0 \text{ m} \quad (7.70)$$

$$H_b = 0,78 \cdot h_b = 0,78 \cdot 12,0 \text{ m} = 9,36 \text{ m} < H_{50} \implies H_{ic} = 9,36 \text{ m} \quad (7.71)$$

Bestalde, R konstantea zehazteko kontuan hartuko dugu haren definizioa, (7.72) adierazpenekoa. Gogoan izanik S_r aldagaiak blokeen eta uraren arteko dentsitate-erlazioa adierazten duela, (7.73) ekuazioak emango digu R aldagaiaren balioa. Blokeen pisua zehazterakoan, material ezberdinak azter ditzakegu. Gure kasuan, masa-hormigoiarekin egingo dugu kalkulua. Blokeak harrizkoak direla joko bagenu, egiaztatu egin beharko genuke bukaeran harrizko bloke horiek lor daitezkeela inguruko harrobietan.

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^2} \quad (7.72)$$

$$= \frac{\rho_s / \rho_w}{(\rho_s / \rho_w - 1)^3} = \frac{2300/1025}{(2300/1025 - 1)^3} = 1,1659 \quad (7.73)$$

Horrela, aipaturiko baldintza betetzen duten blokeen pisua zehaztu dezakegu, W_{50} askatuz (7.75) adierazpenaren arabera. Bloke horien pisua harrobi-harrientzat kalkulatu bagenu, $R0,6992$ litzateke eta $W_{50} = 27,6 \text{ t}$. Beraz, inguruko harrobietako materiala ezin erabil zitekeela ondoriozta genezakeen. (7.76) adierazpeneko emaitzarekin, egokia izan da masa-hormigoia erabiltzea blokeetarako.

$$\Psi = \frac{W_{50}}{\rho_w \cdot g \cdot R \cdot H_{ic}^3} \quad (7.74)$$

$$W_{50} = \Psi \cdot \rho_w \cdot g \cdot R \cdot H_{ic}^3 \quad (7.75)$$

$$= 0,047 \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot 1,1659 \cdot 9,36^3 = 451\,835 \text{ N} = 46\,059 \text{ kg}$$

$$\implies W_{50} = 46,1 \text{ t} \implies \text{hormigoi armatua edo masa-hormigoia} \quad (7.76)$$

Behin mantu nagusiko blokeen pisua zehaztu dugula, kalkula dezagun dentsitate horrekin zer-nolako tamaina izango luketen kuboek, (7.77) adierazpena baliatuz. Kuboen aldeak (7.78) adierazpenean emanikoak lirateke. Tamaina horrekin eta bi geruzakoa diseinatuz, geruzaren zabalera (7.79) adierazpenekoa litzateke.

$$W_{50} = V \cdot \gamma \quad (7.77)$$

$$W_{50} = a^3 \cdot \rho \cdot g$$

$$a = \left(\frac{W_{50}}{\rho \cdot g} \right)^{1/3} = \left(\frac{451\,835}{2300 \cdot 9,81} \right)^{1/3} = 2,72 \text{ m} \quad (7.78)$$

$$\implies e = 2 \cdot a = 2 \cdot 2,72 \text{ m} = 5,44 \text{ m} \quad (7.79)$$

Zehaztu ditzagun orain mantu nagusiaren azpiko geruzen edo iragazkien ezaugarriak. Lehen iragazkiko blokeek bete beharreko baldintza (7.80) adierazpenean emandakoa litzateke. Beraz, (7.81) ekuazioan emandakoa da gutxieneko pisua, W_1 deitu duguna. Bloke horien pisua ikusirik, enuntziatuan agertzen den edozein material aukera genezake; harrobi-harriak aukeratuko ditugu. Kuboen aldeak (7.82) adierazpenekoa litzateke, eta, bi geruzetan ipiniz gero, (7.83) adierazpenekoa geruzaren lodiera.

$$\frac{W_{50}}{W_1} < 10 \quad (7.80)$$

$$W_1 > \frac{W_{50}}{10} = \frac{46\,059 \text{ kg}}{10} = 4606 \text{ kg} = 4,6 \text{ t} \quad (< 25 \text{ t} \Rightarrow \text{harrobi-harriak}) \quad (7.81)$$

$$\Rightarrow a_1 = \left(\frac{W_1}{\rho \cdot g} \right)^{1/3} = \left(\frac{4606}{2600} \right)^{1/3} = 1,21 \text{ m} \quad (7.82)$$

$$\Rightarrow e_1 = 2 \cdot a = 2 \cdot 1,21 \text{ m} = 2,42 \text{ m} \quad (7.83)$$

Defini ditzagun orain bigarren iragazkiko materialaren ezaugarriak. Horretarako, lehen iragazkikoetan oinarrituko gara. Blokeen pisuak (W_2 deitu diogu), (7.84) adierazpeneko baldintza bete beharko du, orokorrean; gutxieneko pisua zehaztuko dugu horrela. Edonola ere, material-galera saihesteko, (7.85) adierazpeneko baldintza ere bete beharko du. Gutxieneko pisua handiagoa denez azken baldintza horren arabera, horixe aukeratuko dugu, oraingoan ere harrizkoa.

$$10 < \frac{W_1}{W_2} < 20 \quad \Rightarrow \quad W_2 > \frac{W_1}{20} = \frac{4606}{20} = 230,3 \text{ kg} \quad (7.84)$$

$$\frac{W_1}{W_2} < 15 \quad \Rightarrow \quad W_2 > \frac{W_1}{15} = \frac{4606}{15} = 307,1 \text{ kg} \quad (7.85)$$

Bigarren geruza horren pisua duten kuboaren aldea (7.86) ekuaziokoa litzateke, eta lodiera, bi geruza aurreikusiz gero, (7.87) adierazpenekoa.

$$a_2 = \left(\frac{W_2}{\rho} \right)^{1/3} = \left(\frac{307}{2600} \right)^{1/3} = 0,49 \text{ m} \quad (7.86)$$

$$e_2 = 2 \cdot a = 2 \cdot 0,49 \text{ m} = 0,98 \text{ m} \quad (7.87)$$

Azkenik, hirugarren geruza bateko blokeen pisua ere egiaztatuko dugu, W_3 deitua. Pisu hori, (7.88) adierazpenekoa, dike-muineko blokeei dagokie jada; ez da beharrezkoa izango, beraz, hirugarren iragazkirik.

$$10 < \frac{W_2}{W_3} < 20 \quad \Rightarrow \quad W_3 > \frac{W_{50}}{20} = \frac{307}{20} = 15,3 \text{ kg} \quad (7.88)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Dikearen islapen-koefizientea zehazteko, uhin erregular eta ezponda zimurrarentzat baliagarri den Van der Meer adierazpena baliatuko dugu, (7.91) ekuazioan jaso. Ekuazio horretan, baina, s_{op} zehaztu behar da lehenik. Olatu-altuera esanguratsua eta sakonera mugagabeen puntako periodoari dagokion uhin-luzeraren arteko erlazio hori (7.90) adierazpenean emanikoa da.

$$s_{op} = \frac{H_s}{L_{op}} = \frac{H_s}{\frac{g \cdot T_p^2}{2 \cdot \pi}} = \frac{H_s}{\frac{g \cdot (1,2 \cdot T_m)^2}{2 \cdot \pi}} \quad (7.89)$$

$$= \frac{H_s \cdot 2 \cdot \pi}{g \cdot 1,2^2 \cdot T_m^2} = \frac{8,5 \cdot 2 \cdot \pi}{9,81 \cdot 1,2^2 \cdot 15^2} = 0,0168 \quad (7.90)$$

Azkenik, dikearen islapen-koefizientea zehaztuko dugu, (7.92) adierazpenean jaso.

$$K_R = 0,071 \cdot P^{-0,082} \cdot (\cot \alpha)^{-0,62} \cdot s_{op}^{-0,46} \quad (7.91)$$

$$K_R = 0,071 \cdot 0,4^{-0,082} \cdot (2)^{-0,62} \cdot 0,0168^{-0,46} = 0,3263 \quad (7.92)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Dikearen igorpen-koefizientea zehazteko (7.96) adierazpena baliatuko dugu, nukleo iragazkorra duten urpeko dike gairientzat baliagarri. Horretarako, baina, dikearen frankobordoa beharko dugu, (7.93) adierazpenekoa. Dikearen zabalera ere zehaztu beharko dugu, (7.94) adierazpenekoa, enuntziatuko deskribapena kontuan hartuz (mantu nagusiko bi kubo, kokotea eta pasealekua). Azkenik, surfaren antzekotasun-parametroa zehaztuko dugu, (7.95) adierazpenarekin, kontuan izanik dikearen malda 1/2 dela.

$$F = (6,5 + 2) - 4,5 = 4 \text{ m} \quad (7.93)$$

$$B = 2 \cdot a + 1,5 + 5,5 = 2 \cdot 2,72 + 1,5 + 5,5 = 12,43 \text{ m} \quad (7.94)$$

$$I_{rop} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_{op}}} = \frac{0,5}{\sqrt{8,5/505,9}} = 3,86 \quad (7.95)$$

Beraz, dikearen igorpen-koefizientea edo dikeak babesten duen eremura igortzen den energia-portzentajea (7.97) ekuazioan jasotakoa izango da.

$$T = -0,4 \cdot \frac{F}{H_s} + 0,64 \cdot \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0,31} \cdot (1 - \exp(-0,5 \cdot I_{rop})) \quad (7.96)$$

$$\begin{aligned} &= -0,4 \cdot \frac{4}{8,5} + 0,64 \cdot \left(\frac{12,43}{8,5} \right)^{-0,31} \cdot (1 - \exp(-0,5 \cdot 3,86)) \\ &= -0,1882 + 0,4863 = 0,298 \end{aligned} \quad (7.97)$$

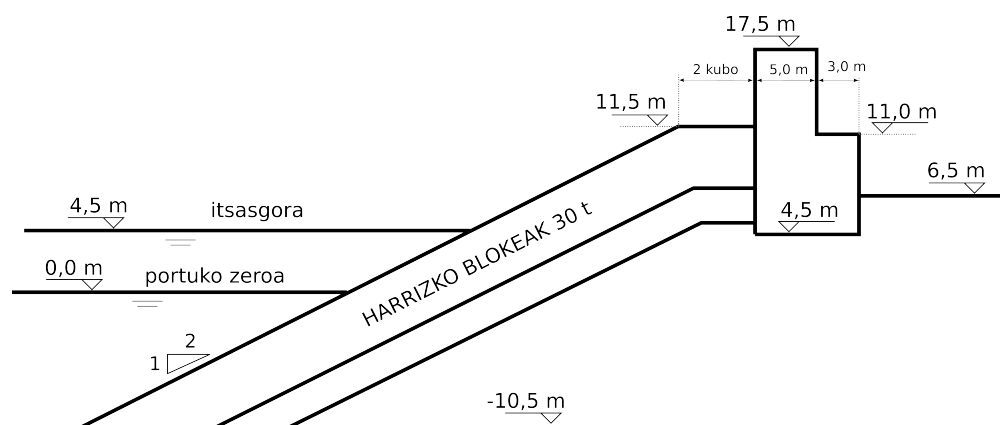
Edonola ere, aipaturiko (7.96) adierazpenak baliagarritasun-baldintza batzuk ditu, egiaztatu beharrekoak lorturiko igorpen-koefizientea egokia dela ziurtatzeko. Bi baldintza horiek (7.98) eta (7.99) adierazpenetakoak dira. Ikus daitekeen moduan, baldintza biak betetzen dira, lorturiko balioaren egokitasuna baieztatuz.

$$\frac{B}{H_s} = \frac{12,43}{8,5} = 1,52 < 8 \quad \checkmark \quad (7.98)$$

$$0,075 < T < 0,8 \quad \checkmark \quad (7.99)$$

7.6. Orioko dikean kokotea⁶

Orioko portuaren bokaleak kanpo-dike bat eta kontradikea ditu. Kanpo-dikea 1997. urtean eraiki zen, bokalearen ezker aldean; 315 m ditu eta dike horren sekzioa da, hain zuzen ere, 7.6. irudian jasotakoa.



7.6. irudia. Orioko dikearen sekzioa.

2021eko urte hasieran ekaitza izan zen Orioko dikean, eta komunikabideetan zabaldu zen olatu batek bota egin zuela kokote gainean zebilen gizon bat. Aipaturiko ekaitza aztertuko dugu, honako irizpide hauekin:

- Kalkulurako ekaitza: $H_s = 8,0$ m, $T = 16,5$ s.
- Haustura-irizpidea: McCowan.
- Itsas uraren dentsitatea: 1025 kg/m³.
- Hormigoi armatuaren dentsitatea: 2500 kg/m³.
- Masa-hormigoiaren dentsitatea: 2300 kg/m³.
- Harri naturalaren dentsitatea: 2600 kg/m³.
- Inguruko harrobietatik atera daitekeen harriaren pisu maximoa: 6 t.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Sekzioan adierazitako datuen arabera, zehaztu itsasaldeko mantu nagusiko piezen neurria eta mantuko zein goi-bermaren zabalera.
- (b) Zer tamaina eta pisu dute lehen iragazkiaren piezek?

⁶Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2020/21 ikasturtea (2021-01-18), finalaren 1. ariketa.

- (c) Kasu honetan, nukleoko materiala 1-200 kg artekoa dela suposatuz, beharrezkoa izango al da bigarren iragazkia?
- (d) Gainditze-fenomenorik sortu al da? Zer-nolako emariarekin?
- (e) Zer tentsio dinamiko jasan behar izan zituen kokoteak olatu maximoarekin?
- (f) Zehaztu nolakoa izan den kokotearen segurtasun-koefizientea labaintetarekiko, kalkulaturiko presio dinamikoaren eraginpean. Iradoki ezazu egokia iruditzen zaizun marruskadura-koefizientea.
- (g) Zergatik erori zen gizona?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Mantu nagusiko elementuen dimentsioak zehazteko, (7.100) adierazpena baliatuko dugu; hau da, pieza horiek kubikoak direla kontuan hartuko dugu, alde berdinekoak. Beraz, piezen pisua ezaguna denez, irudikoa, kubo horien aldea (7.101) adierazpenak emango liguke, eta kuboaren aldea (7.102) ekuazioak.

$$W_{50} = D_{50}^3 \cdot \rho \quad (7.100)$$

$$D_{50} = \left(\frac{W_{50}}{\rho} \right)^{1/3} \quad (7.101)$$

$$= \left(\frac{30\,000 \text{ kg}}{2600 \text{ kg/m}^3} \right)^{1/3} = 2,26 \text{ m} \quad (7.102)$$

Kuboaren aldea zehaztuta eta berma bi piezek osatzen dutela jakinda, mantu nagusiko geruzaren zabalera bi piezek osaturikoa litzateke; beraz, geruzaren zein bermaren zabalera (7.103) adierazpenekoa litzateke.

$$e = 2 \cdot D_{50} = 2 \cdot 2,26 \text{ m} = 4,52 \text{ m} \quad (7.103)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Mantu nagusiko piezen pisua zehaztu ondoren, finka ditzakegu lehen iragazkiko piezen ezaugarriak. Lehen iragazkiko piezen pisua zehazteko, (7.104) adierazpeneko erlazioa baliatuko dugu, hori baita pieza horiek izan beharko luketen pisu maximoa. Pisu maximo hori, beraz, (7.105) adierazpenekoa litzateke, harrobietan eskuragarri legokeena.

$$\frac{W_{50}}{W_1} = 10 \quad (7.104)$$

$$W_1 = \frac{W_{50}}{10} = \frac{30\,000 \text{ kg}}{10} = 3000 \text{ kg} = 3,0 \text{ t} < 6 \text{ t} \quad \checkmark \quad (7.105)$$

Piezen neurriak zehazteko, piezak esferikoak direla joko dugu. Beraz, piezen pisua (7.106) adierazpenekoa litzateke, eta dagokion esferaren diametroa (7.107) adierazpenekoa.

$$W_1 = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\phi^3}{8} \quad (7.106)$$

$$\phi = \left(\frac{W_1 \cdot 3 \cdot 8}{\rho \cdot 4 \cdot \pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{3000 \text{ kg} \cdot 3 \cdot 8}{2600 \text{ kg/m}^3 \cdot 4\pi} \right)^{1/3} = 1,30 \text{ m} \quad (7.107)$$

Hala, lehen iragazkiaren lodiera (7.108) adierazpenekoa litzateke, bi geruza dituela joko bagenu.

$$e_1 = 2 \cdot \phi = 2 \cdot 1,30 \text{ m} = 2,60 \text{ m} \quad (7.108)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Bigarren iragazkiko piezen pisua zehazteko, (7.109) adierazpena balia genezake. Geruza horretako elementuen pisua kontuan hartuta, halakorik ez dela behar ondoriozta genezake; hots, iragazki batekin nahikoa da, eta haren azpian dike-muina legoke.

$$W_2 = \frac{W_1}{15} = \frac{3000 \text{ kg}}{15} = 200 \text{ kg} \quad (7.109)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Komunikabideetan aipatu zena ikusirik, garbi dago gainditzea egon bazegoela. Edonola ere, modu teorikoan aztertuko dugu gainditzetik ba ote zen, (7.116) adierazpena baliatuz. Horretarako, baina, olatuen %2k gaindituko luketen igoera zehaztuko dugu, hots, $R_u\%$. Beraz, ekaitzak Rayleigh banaketa jarraitzen duela joko bagenu, olatuek (7.110) adierazpeneko banaketa-funtzioa jarraituko lukete. Hala, olatu-altuera askatuta, (7.111) adierazpenaren arabera, (7.112) adierazpenekoa litzateke gainditua izateko olatuen %2k gainditzeko duten olatu-altuera.

$$F(H > H_x) = \exp\left(-2,005 \cdot \frac{H_x^2}{H_s^2}\right) \quad (7.110)$$

$$H_x = \left[\frac{\ln(F) \cdot H_s^2}{-2,005}\right]^{1/2} \quad (7.111)$$

$$H_x = \left[\frac{\ln(0,02) \cdot 8,0^2}{-2,005}\right]^{1/2} = 11,17 \text{ m} = H_{\%2} \quad (7.112)$$

$R_{u\%2}$ kalkulatzeko behar dugun beste aldagaia ξ_o litzateke, (7.114) adierazpenekoa. Lehenik, sakonera mugagabeko olatu-altuera zehaztuko dugu (7.113) adierazpenarekin. Iribarren parametroa (7.115) adierazpenekoa litzateke.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 16,5^2}{2 \cdot \pi} = 425,1 \text{ m} \quad (7.113)$$

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{H_o/L_o}} \quad (7.114)$$

$$= \frac{1/2}{\sqrt{11,17/425,1}} = 3,08 \quad \text{collapsing} \quad (7.115)$$

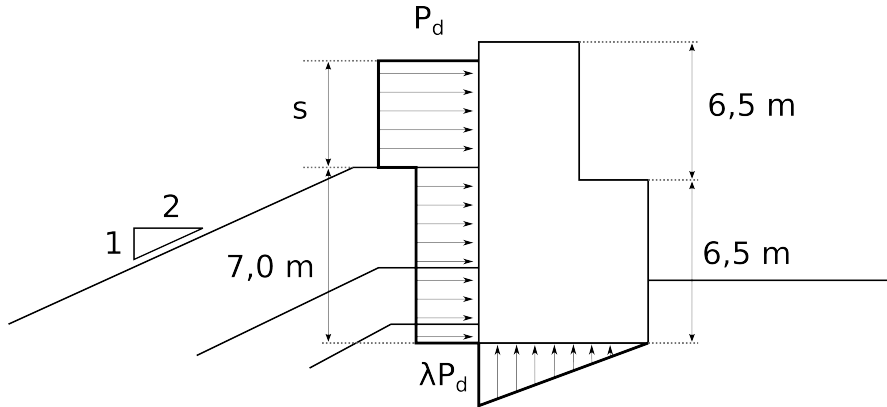
Orain bai, kalkula dezakegu olatuen %2k gaitutako duten dike-gaitutzea. Gaitutze hori (7.117) adierazpenekoa da, eta eranskinen E.16 taulako balioak erabili ditugu. Beraz, (7.118) ekuaziokoa litzateke olatuen %2k gaitutako luketen dike-gaitutzea edo *run-upa*. Balio hori dikearen frankobordoarekin alderatzen badugu, $F = 17,5 - 4,5 = 13 \text{ m}$, zera ondoriozta dezakegu: ez da dike-gaitutzerik egongo, kalkulatu dugun dike-gaitutzea frankobordoa baino txikiagoa baita. Ondorioz, ez dugu gaitutzearen emaririk kalkulatu.

$$\frac{R_u}{H_{\%2}} = A_u \cdot \left(1 - \exp(B_u \cdot I_{ro})\right) \quad (7.116)$$

$$R_u = H_{\%2} \cdot A_u \cdot \left(1 - \exp(B_u \cdot I_{ro})\right) \quad (7.117)$$

$$= 11,17 \cdot 1,05 \cdot \left(1 - \exp(-0,67 \cdot 3,08)\right) = 10,24 \text{ m} \quad (7.118)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Kokoteak jasango duen presio-legea 7.7. irudian jasotakoa litzateke. Lege horretako presio esanguratsua (7.129) adierazpenekoa litzateke.



7.7. irudia. Kokotean olatuak eragindako presioen eskema.

Azter dezagun, lehenik, nolakoa den kokoteari eragiten dion olatua, kalkulurako baliatuko duguna. Hausturaren ondorioz kokotean izan dezakegun olatu-altuera maximoa (7.119) adierazpenekoa litzateke.

$$H_b = 0,78 \cdot d = 0,78 \cdot (4,5 + 10,5) = 11,7 \text{ m} \quad (7.119)$$

Beraz, kokoteko olatu-altuera honako bi hauetako txikiena litzateke, (7.120) adierazpenean jaso: olatu hautsia edo olatu-altuera maximoa (eranskinetako E.10 taularen baliorik txikiena). Beraz, kokotearen kalkuluan erabiliko dugun olatu-altuera (7.121) ekuazioan jasotakoa litzateke.

$$H_i = \min\{H_{max} \ ; \ H_b\} \quad (7.120)$$

$$= \min\{1,611 \cdot H_s \ ; \ H_b\}$$

$$= \min\{1,611 \cdot 8,0 \ ; \ 11,7\} = 11,7 \text{ m} \quad (7.121)$$

(7.129) adierazpeneko presioaren balioa zehazteko, aipaturiko olatu-altuerak eragindako dike-gainditzea zehaztu behar da. Kalkula dezagun, lehenik, olatu horri dagokion surfaren antzekotasun-parametroa, (7.122) adierazpenaren arabera.

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{H_o/L_o}} = \frac{1/2}{\sqrt{11,7/425,1}} = 3,01 \quad (7.122)$$

Kalkula dezagun orain dike-gainditzea, (7.123) adierazpenaren arabera. Adierazpen hori lehengo bera da, aldatzen den bakarra olatu-erasotzailearen altuera da. Hala, olatu-gainditzea (7.124) adierazpenekoa litzateke.

$$\frac{R_u}{H_i} = A_u \cdot \left(1 - \exp(B_u \cdot I_{ro})\right) \quad (7.123)$$

$$\begin{aligned} R_u &= H_i \cdot A_u \cdot \left(1 - \exp(B_u \cdot I_{ro})\right) \\ &= 11,7 \cdot 1,05 \cdot \left(1 - \exp(-0,67 \cdot 3,01)\right) = 10,65 \text{ m} \end{aligned} \quad (7.124)$$

Presio-legea kalkulatzeko ere (7.125) adierazpeneko aldagaia behar dugu; haren balioa (7.126) ekuazioak emandakoa da.

$$s = H_i \cdot \left(1 - \frac{A_c}{R_u}\right) \quad (7.125)$$

$$= 11,7 \cdot \left(1 - \frac{7}{11,65}\right) = 4,01 \text{ m} \quad (7.126)$$

Azkenik, α aldagaiaren balioa zehaztu behar dugu, (7.127) adierazpenaren arabera. Gogoan izan β ezpondaren malda dela; beraz, $\cos \beta = \frac{2}{\sqrt{1^2 + 2^2}} = 0,8944$ izango da. Hala, α aldagaiaren balioa (7.128) ekuazioan jasotakoa izango da.

$$\alpha = 2,9 \cdot \left(\frac{R_u}{H_i} \cdot \cos \beta\right)^2 \quad (7.127)$$

$$= 2,9 \cdot \left(\frac{10,65}{11,7} \cdot 0,8944\right)^2 = 1,92 \quad (7.128)$$

Azkenik, presio-legeko balio nagusia zehaztuko dugu, 7.7. irudian jasotako P_d . Haren balioa (7.130) adierazpenekoa da. Balio hori presio-legeko balio maximoa da, mantu nagusitik kanpo sortzen den presioarena.

$$P_d = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot s \quad (7.129)$$

$$= 1,92 \cdot 10\,205 \cdot 9,81 \cdot 4,01 = 77,62 \text{ kN/m}^2 \quad (7.130)$$

Aldiz, presio-legeko balio txikiena edo mantu nagusiaren azpian sortzen dena kalkulatzeko λ zehaztu behar dugu, (7.133) adierazpenaren arabera. Kalkula dezagun, aurretik, uhin-luzera dikearen parean, (7.131) adierazpena baliatuz.

$$L = L_o \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (7.131)$$

$$L = 425,1 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 15}{L}\right) \quad (7.132)$$

$$= 425,1 \cdot \tanh\left(\frac{94,2}{L}\right) \xrightarrow{\text{hurbilketak}} L = 192,73 \text{ m}$$

Ondorioz, presio-legearen balio minimoa, $\lambda \cdot P_d$, (7.134) adierazpenean jasotakoa litzateke.

$$\lambda = 0,8 \cdot \exp\left(-10,9 \cdot \frac{B}{L}\right) \quad (7.133)$$

$$= 0,8 \cdot \exp\left(-10,9 \cdot \frac{4,52}{192,73}\right) = 0,62$$

$$\implies \lambda \cdot P_d = 0,62 \cdot 77,62 \text{ kN/m}^2 = 48,12 \text{ kN/m}^2 \quad (7.134)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (f). Labainketarekiko Segurtasun Kofiziente (LSK) kalkulatzeko, (7.140) adierazpena baliatuko dugu. Horretarako, baina, kokotearen pisua (7.135) eta azpipresioaren indarra (7.137) finkatu behar ditugu.

$$F_W = 6,5 \cdot 5 + 6,5 \cdot (5 + 3) \cdot 2300 \cdot 9,81 \quad (7.135)$$

$$= 1\,906\,574 \text{ N/m} = 1906,6 \text{ kN/m} \quad (7.136)$$

$$F_U = \frac{48,12 \cdot (5 + 3)}{2} = 192,5 \text{ kN/m} \quad (7.137)$$

Gainera, presio-legearen ondorioz sorturiko indar ezegonkortzailea ere kalkulatu beharko dugu, (7.138) adierazpenean jaso.

$$F_H = s \cdot P_d + (11,5 - 4,5) \cdot \lambda \cdot P_d \quad (7.138)$$

$$= 4,01 \cdot 77,62 + 7,0 \cdot 48,12 = 648,1 \text{ kN/m} \quad (7.139)$$

Azkenik, aipaturiko segurtasun-koefizientea kalkulatu dugu. Koefiziente hori kalkulatzeko erabiliko dugun zimurtasun-koefizientea $\mu = 0,6$ izan daiteke, adibidez, ohiko balioak 0,6 eta 0,7 artekoak izaten baitira. Ondorioz, segurtasunaren alde jotzeko baliorik txikiena aukeratuko genuke. Hala, (7.141) adierazpenarekin, kokotea egonkorra dela egiazta genezake.

$$LSK = \frac{\text{indar egonkortzaileak}}{\text{indar ezegonkortzaileak}} \quad (7.140)$$

$$= \frac{\mu \cdot (F_W - F_U)}{F_H}$$

$$= \frac{0,6 \cdot (1906,6 - 192,5)}{648,1} = 1,59 \quad \checkmark \quad (7.141)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (g). Enuntziatuan aipatzen den bezala, kokote gainean zegoen gizona olatu batek bota zuen; beraz, gaintitza egon egon zen. Gizona erortzearen arrazoiak hainbat izan daitezke. Baliteke, batetik, haustura-irizpidea ez izatea guk ariketan proposatu duguna eta, ondorioz, irits zitezkeen olatuak guk aukeratu duguna baino handiagoak izatera. Izan daiteke, baita ere, ekaitzaren ondorioz itsas maila guk proposatu duguna baino altuagoa izatea.

8. Dike bertikalak

Kapitulu honetan dike bertikalak aztertuko ditugu, eta horien aurre-dimentsionatzea egingo Goda metodoa erabiliz. Godaren arabera aztertuko ditugu dikearen aldagai nagusiak; hala nola, itsasoaren sakonera eta hondoaren malda dikearen eraikitze-eremuan, dikearen sakonera zein haren zabalera eta diseinu-olatuaren altuera. Aldagai horiekin dikeari olatuak eragindako indarrak aurreikusiko ditugu, edo eta haren diseinua aztertuko.

8.1. Indarrak eta irristadura¹

Dike bertikal bat hormigoizko kaxa errektangularrak erabiliz osatu da, itsasoaren batez besteko gainazal askea itsas zorutik 9,5 metrora dagoen eremu batean. Eremu horretan itsas hondoa horizontala dela jo daiteke.

Kaxek 10,5 metroko altuera dute eta 15 metroko aldea duen sekzio karratua oinplantan. Dikeak itsas zoruan dagoen oinarri baten gainean eraiki dira, zeinak 3 metroko lodiera baitu. Kaxen eta oinarriaren arteko marruskadura-koefizientea 0,6 dela joko da.

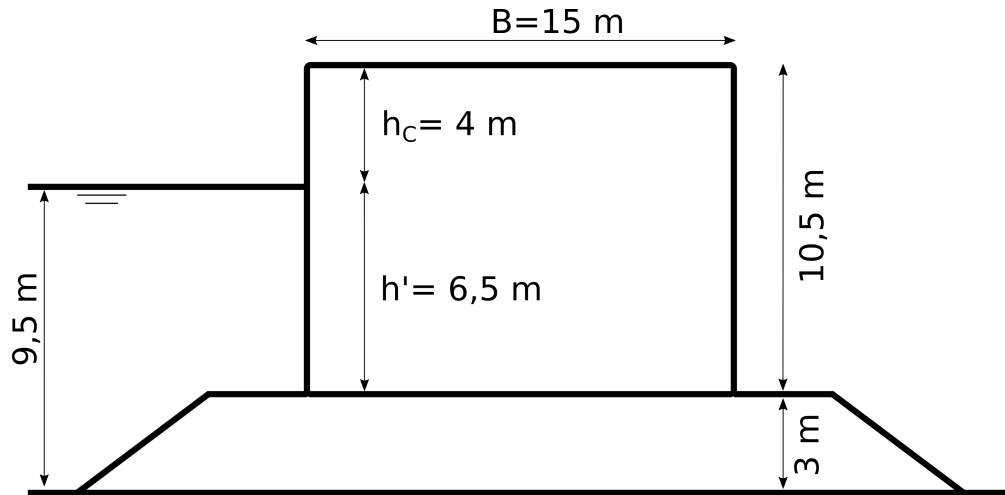
Goda metodoa erabiliz, honako balio hauek lortu dira: $P_1 = 103,9 \text{ kN/m}^2$, $P_2 = 89,1 \text{ kN/m}^2$, $P_3 = 93,7 \text{ kN/m}^2$, $P_4 = 68,6 \text{ kN/m}^2$, $P_U = 66,7 \text{ kN/m}^2$, eta $h_c^* = 4 \text{ m}$.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Olatuek kaxa bakoitzaren horma bertikalean eragiten duten indarra eta haren momentua. Kaxen pisu espezifikoa $\gamma_{kaxa} = 2,235 \text{ t/m}^3$ dela joko da, eta urarena $\gamma_w = 1,025 \text{ t/m}^3$.
- (b) Irriaturarekiko segurtasun-koefizientea.

¹Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2016/17 ikasturtea (2017-06-15), ezohikoaren 3. ariketa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Olatuek dikean eragiten duten indarra zehazteko Goda metodoa erabiliko dugu, horretarako beharrezkoak diren aldagaiak ematen baititu enuntziatuak. Gomendagarria da, hasieran, dikearen eskema egitea erabiltzen diren aldagaiak adieraziz, 8.1. irudian erakusten den moduan.



8.1. irudia. Dikearen eskema.

Hori kontuan harturik, (8.1) adierazpena aplikatu besterik ez da egin behar indar horizontala (P) kalkulatzeko, eta (8.2) adierazpena indar horren momentua (M) kalkulatzeko.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_3) \cdot h' + \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_4) \cdot h_c^* & (8.1) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot (103,9 + 93,7) \cdot 6,5 + \frac{1}{2} \cdot (103,9 + 68,6) \cdot 4,0 = 987,2 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_P &= \frac{(h')^2}{6} \cdot (2 \cdot P_1 + P_3) + \frac{h' \cdot h_c^*}{2} \cdot (P_1 + P_4) + \frac{(h_c^*)^2}{6} \cdot (P_1 + 2 \cdot P_4) & (8.2) \\
 &= \frac{6,5^2}{6} \cdot (2 \cdot 103,9 + 93,7) + \frac{6,5 \cdot 4,0}{2} \cdot (103,9 + 68,6) + \frac{4,0^2}{6} \cdot (103,9 + 2 \cdot 68,6) \\
 &= 5008,5 \text{ kN} \cdot \text{m/m}
 \end{aligned}$$

Kalkulatu ditugun indar eta momentu horiek, edonola ere, egituraren metro lineal bakoitzari dagozkio. Beraz, kaxa bakoitzean eragindako indarra zehazteko, kaxa-

ren zabalera (Z) osoa hartu beharko dugu kontuan, (8.3) eta (8.4) adierazpenen arabera.

$$F = P \cdot Z = 987,2 \text{ kN/m} \cdot 15 \text{ m} = 14\,808,0 \text{ kN} \quad (8.3)$$

$$M = M_P \cdot Z = 5008,5 \text{ kN} \cdot \text{m/m} \cdot 15 \text{ m} = 75\,127,5 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (8.4)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Dikearen irristadura-koefizientea indar horizontal ezegonkortzaileen eta orekatzaileen arteko erlazioak emango digu, (8.7) adierazpenaren arabera. Hori aplikatzeko, baina, lehenik marruskadura eragiten duen indar bertikala kalkulatu beharko dugu, pisuaren, uraren bulkadaren eta azpipresioaren eragina kontuan dituen. Pisuaren (W) eta ur-bulkadaren (E) arteko diferentzia kalkulatzeko (8.5) adierazpena erabili da, eta azpipresioa (U) kalkulatzeko (8.6) adierazpena. Gogoan izan indarrak dikearen metro linealeko ari garela kalkulatzeko; ondorioz, ez da dike-zabalera erabili adierazpenetan (bat litzateke), eta unitateak metroko lirateke.

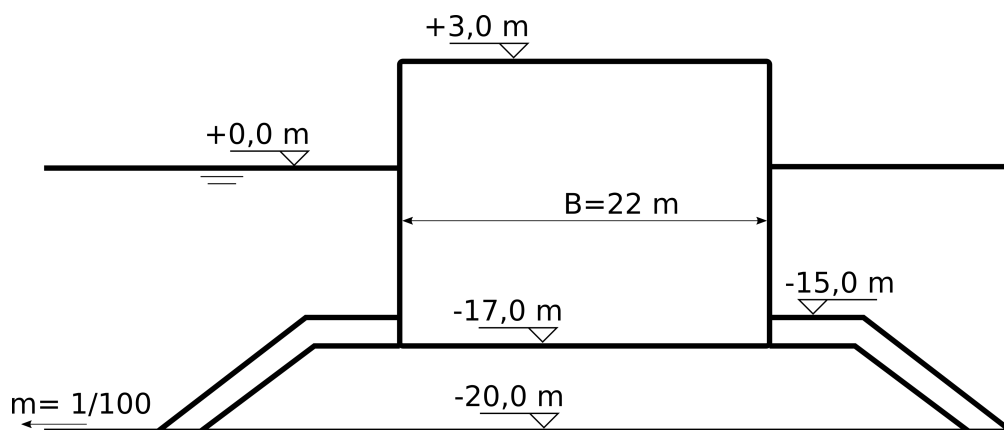
$$W - E = 15 \cdot (2,235 \cdot 10,5 - 1,025 \cdot 6,5) \cdot 9,81 = 2472,9 \text{ kN/m} \quad (8.5)$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot P_U \cdot B = \frac{1}{2} \cdot 66,7 \cdot 15 = 500,3 \text{ kN/m} \quad (8.6)$$

$$SK_{irrist} = \frac{\mu \cdot (W - E - U)}{P} = \frac{0,6 \cdot (2472,9 - 500,2)}{987,2} = 1,20 \quad (8.7)$$

8.2. Dikearen egiaztapena²

Dike bertikal bat eraiki nahi da uraren sakonera 20 metrokoa eta hondoaren malda 1/100 den eremuan. Dikeak sekzio errektangularra du, haren zabalera 22 metrokoa izanik. Dikearen oinarria 3 metro dituen oinarri baten gainean dago. Oinarria babesteko 2 metroko babes-geruza bat ere diseinatu da. Dikearen gaina 3,0 kotan kokatu da; diseinuko itsas maila baino 3 metro gorago, hain zuzen ere. Dikearen eskema bat 8.2. irudian jaso da.



8.2. irudia. Dikearen eskema.

Dikean erabiliko den diseinu-olatuaren altuera 6,8 metrokoa da, eta haren periodoa 12 segundokoa. Diseinu-olatu horien eraso-angelua 10 gradukoa da, dike-frontearen elkarzutarekiko.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Egiaztatu dikearen egonkortasuna iraulketa zein irristadurarekiko. Demagun itsas uraren pisu espezifikoa $1,025 \text{ tn/m}^3$ dela eta $2,3 \text{ tn/m}^3$ dike-gorputzarena; baita marea baztergarria dela ere dikea eraiki nahi den eremuan. Demagun, baita ere, dike-gorputza eta dikearen oinarri den lurzuaren arteko marruskadura-koefizientea 0,6 dela.

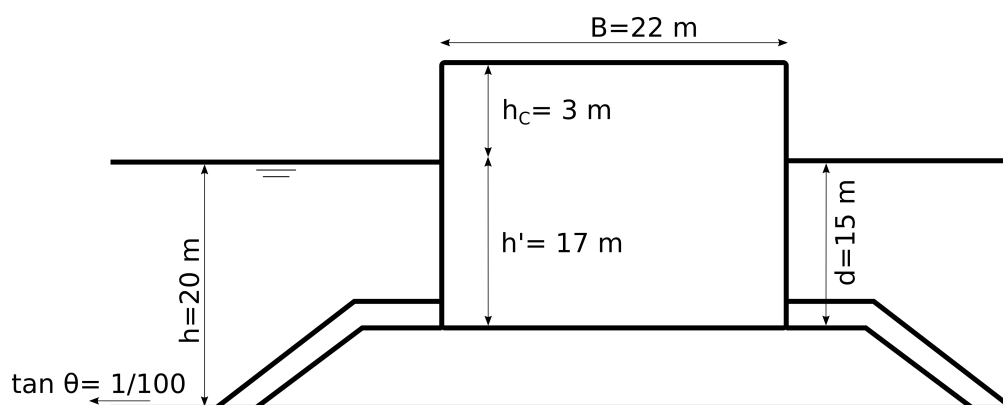
ARIKETAREN EBAZPENA (a). Dikearen egonkortasuna aztertzeko erabiliko ditugun indarrak kalkulatzeko, Goda irizpidea erabiliko dugu, baina lehenik diseinu-olatuaren uhin-luzera beharko dugu dike-oinean. Horretarako, (8.8) adierazpeneko sakonera mugagabeko uhin-luzera baliatuz, dike-oineko uhin-luzera kalkulatu dugu (8.9) adierazpenarekin.

²Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2017/18 ikasturtea (2018-07-02), ezohikoaren 4. ariketa.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 12^2}{2 \cdot \pi} = 224,8 \text{ m} \quad (8.8)$$

$$\frac{d}{L_o} = \frac{20}{224,8} = 0,089 \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} \frac{d}{L} = 0,1313 \rightarrow L = 152,3 \text{ m} \quad (8.9)$$

Goda irizpidea aplikatzeko, erabiliko ditugun aldagaien eskema egitea komeni da, aldagai bakoitza zein den jakiteko. Eskema hori 8.3. irudian jaso da.



8.3. irudia. Dikearen eskema, kalkulurako aldagaiekin.

Egonkortasuna aztertzeko beharko ditugun aldagaiak kalkulatu aurretik, olatuaren haustura-altuera (8.10), diseinuan erabiliko den altuera (8.11), eta η^* aldagaia (8.12) kalkulatuko ditugu.

$$h_b = h + 5 \cdot H_s \cdot \tan \theta = 20 + 5 \cdot 6,8 \cdot 1/100 = 20,3 \text{ m} \quad (8.10)$$

$$H_d = H_{1/250} = 1,80 \cdot H_s = 1,80 \cdot 6,8 = 12,2 \text{ m} \quad (8.11)$$

$$\eta^* = 0,75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_d = 0,75 \cdot (1 + \cos 10^\circ) \cdot 12,2 = 18,2 \text{ m} \quad (8.12)$$

Olatuak dikearen horman eragiten dituen presioak kalkulatzeko, lehenik α_i aldagai adimentsionalak kalkulatuko ditugu, (8.13), (8.14) eta (8.15) ekuazioetan jasoak.

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot h/L)} \right)^2 \quad (8.13)$$

$$= 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 20/152,3}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot 20/152,3)} \right)^2 = 0,82$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3 \cdot h_b} \cdot \left(\frac{H_d}{d} \right)^2 ; \frac{2 \cdot d}{H_d} \right\} \quad (8.14)$$

$$= \min \left\{ \frac{20,3 - 15}{3 \cdot 203} \cdot \left(\frac{12,2}{15} \right)^2 ; \frac{2 \cdot 15}{12,2} \right\}$$

$$= \min\{ 0,06 ; 2,45 \} = 0,06$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h/L)} \right) \quad (8.15)$$

$$= 1 - \frac{17}{20} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot 20/152,3)} \right) = 0,77$$

Aldagai adimentsionalekin, kalkula ditzakegu dike bertikalean olatuak eragiten dituen presio puntualak, (8.16) eta (8.20) arteko ekuazioetan jasoak.

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.16)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 10^\circ) \cdot (0,82 + 0,06 \cdot \cos^2 10^\circ) \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 12,2 = 106,9 \text{ kN/m}^2$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h/L)} = \frac{106,9}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot 20/152,3)} = 78,6 \text{ kN/m}^2 \quad (8.17)$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1 = 0,77 \cdot 106,9 = 82,3 \text{ kN/m}^2 \quad (8.18)$$

$$P_4 = P_1 \cdot \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*} \right) = 106,9 \cdot \left(1 - \frac{3,0}{18,2} \right) = 89,3 \text{ kN/m}^2 \quad (8.19)$$

$$P_U = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.20)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 10^\circ) \cdot 0,82 \cdot 0,77 \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 12,2 = 76,9 \text{ kN/m}^2 \quad (8.21)$$

Presio puntual horiekin olatuek dikean eragindako indarrak kalkula daitezke, (8.23) eta (8.25), baita horiek eragindako momentuak ere, (8.24) eta (8.26). Horretarako, lehenik (8.22) aldagaiaren balioa zehaztuko dugu.

$$h_c^* = \min\{ \eta^* ; h_c \} = \min\{ 18,2 ; 3,0 \} = 3,0 \text{ m} \quad (8.22)$$

Hormako indar horizontala eta momentua kalkulatuko ditugu lehenik.

$$P = \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_3) \cdot h' + \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_4) \cdot h_c^* \quad (8.23)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (106,9 + 82,3) \cdot 17 + \frac{1}{2} \cdot (106,9 + 89,3) \cdot 3 = 1902,5 \text{ kN/m}$$

$$M_P = \frac{(h')^2}{6} \cdot (2 \cdot P_1 + P_3) + \frac{h' \cdot h_c^*}{2} \cdot (P_1 + P_4) + \frac{(h_c^*)^2}{6} \cdot (P_1 + 2 \cdot P_4) \quad (8.24)$$

$$= \frac{17^2}{6} \cdot (2 \cdot 106,9 + 82,3) + \frac{17 \cdot 3}{2} \cdot (106,9 + 89,3) + \frac{3^2}{6} \cdot (106,9 + 2 \cdot 89,3)$$

$$= 19\,693,5 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

Azpipresioak eragindako indarra eta momentua ondoren.

$$U = \frac{1}{2} \cdot P_U \cdot B = \frac{1}{2} \cdot 76,9 \cdot 22 = 845,9 \text{ kN/m} \quad (8.25)$$

$$M_U = \frac{2}{3} \cdot U \cdot B = \frac{2}{3} \cdot 845,9 \cdot 22 = 12\,406,5 \text{ kN} \cdot \text{m/m} \quad (8.26)$$

Hala, indar eta momentuekin, bi segurtasun-koefizienteak (SK) kalkula ditzakegu, (8.28) eta (8.29). Lehen kalkulatzeko, dikearen pisua eta uraren bulkadaren oreka kalkulatuko dugu lehenik (8.27).

$$\begin{aligned} N = W - E &= 22 \cdot (2,3 \cdot 20 - 1,025 \cdot 17) & (8.27) \\ &= 628,65 \text{ t/m} = 6167,1 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

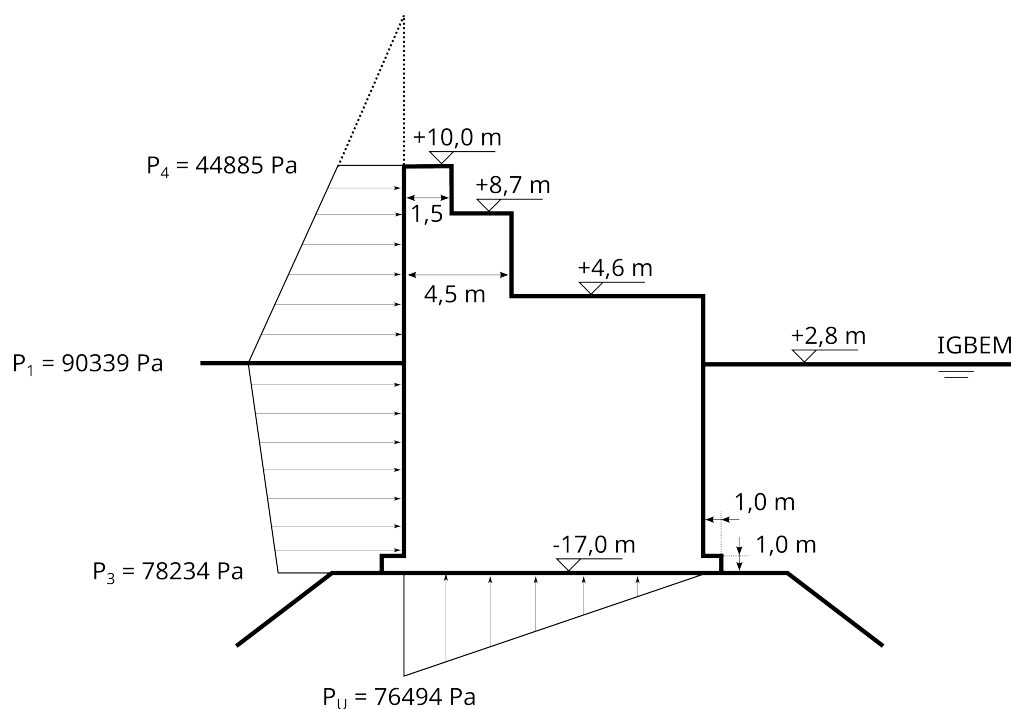
$$SK_{irrist} = \frac{\mu \cdot (N - U)}{P} = \frac{0,6 \cdot (6167,1 - 845,9)}{1902,5} = 1,68 \quad (8.28)$$

$$SK_{iraul} = \frac{N \cdot B/2 - M_U}{M_P} = \frac{6167,1 \cdot 22/2 - 12\,406,5}{19\,693,5} = 2,81 \quad (8.29)$$

8.3. Zabaleraren kalkulua³

Dike bertikala diseinatu nahi da eremu jakin batean, kaxekin. Diseinua egiteko erabiliko den ekaitzarentzat $H_s = 5,3$ m da, eta olatu-fronteak dikearekin osatzen duen eraso-angelua 0° (eraso elkarzuta edo normala).

Kaxak oinarri baten gainean eraikiko dira (ikus 8.4. irudiko eskema); oinarri horren gaina -17 metrora dago. Dikea eraikitzeko masa-hormigoia, hormigoi armatua eta betegarria erabiliko dira. Zehazki, $+3,0$ m kotatik gora dagoen gainegitura masa-hormigoiaren egin dagoela joko dugu osorik. Aldiz, $+3,0$ m kotatik behera dagoen dike-gorputza hormigoi armatuko gelaxkez eta betegarriz osatua dagoela joko dugu. Betelana bolumen osoaren %75 da dike-gorputzean, gelaxken gainontzekoa hormigoia. Gainera, dike-gorputzak zapata bat du azpian, oinarriaren gainean. Zapata horrek metro bateko altuera du, eta metro bana irteten da dike-gorputzaren alde bietara.



8.4. irudia. Dike-sekzioa eta presio-legeen eskema.

Kalkuluak egiteko honako datu hauek erabiliko dira: masa-hormigoiaren dentsitatea 2300 kg/m^3 , hormigoi armatuarena 2350 kg/m^3 , material betegariarena

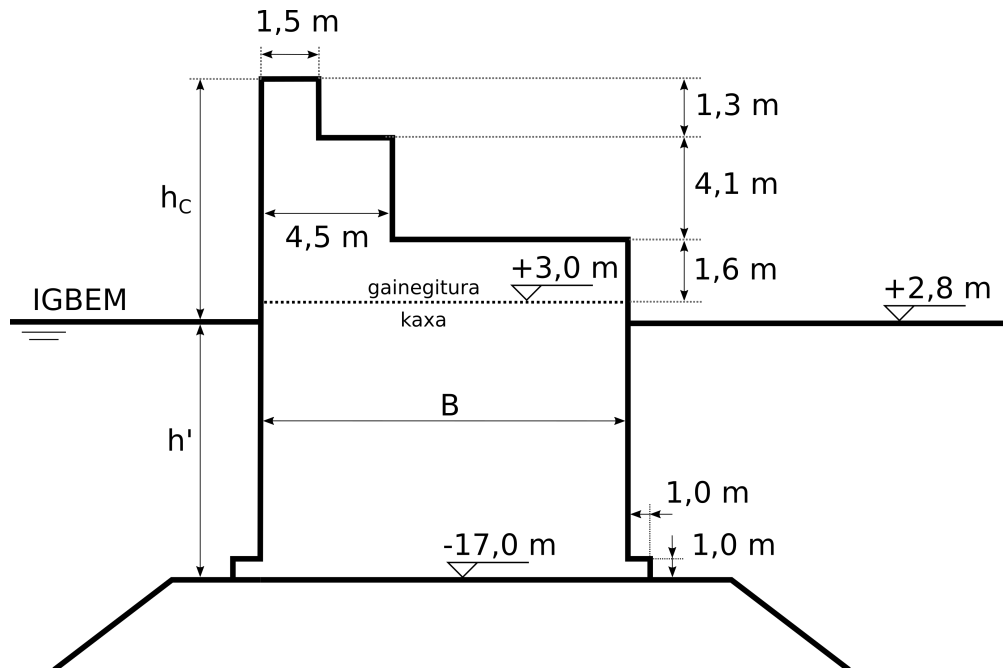
³Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2015/16 ikasturtea (2016-06-16), ezohikoaren 3. ariketa.

1900 kg/m³, eta urarena 1027 kg/m³. Zapataren eta oinarriaren artean eragiten duen marruskadura-koefizientea 0,7 dela joko da.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Lortu kaxaren zabalera irristadurarako egonkortasuna 1,4 izan dadin, Goda metodoa aplikatuz.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Dikearen egonkortasuna Godaren metodoa erabiliz aztertzeko, olatu-altuerarekin eta dikearen geometriarekin lotura duten aldagaiak kalkulatu ditugu lehenik. Hori dela eta, sekzio berean aldagai horiek adieraztea da egokiena, 8.5. irudian jaso bezala.



8.5. irudia. Dike-sekzioa eta kalkulurako aldagaiak.

Ondoren, zehaztu dezagun aldagaien balioa. Lehen, diseinuko olatu-altuera, (8.87) ekuazioan jasotakoa da. Besteak, (8.31), (8.32), (8.33) eta (8.34) ekuazioetan emandako aldagaiak dira.

$$H_d = H_{1/250} = 1.80 \cdot H_s = 1,80 \cdot 5,3 = 9,5 \text{ m} \quad (8.30)$$

$$\eta^* = 0,75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_d = 0,75 \cdot (1 + \cos 0^\circ) \cdot 9,5 = 14,3 \text{ m} \quad (8.31)$$

$$h_c = 10,0 - 2,8 = 7,2 \text{ m} \quad (8.32)$$

$$h' = 17 + 2,8 = 19,8 \text{ m} \quad (8.33)$$

$$h_c^* = \min\{\eta^*; h_c\} = \min\{14,3; 7,2\} = 7,2 \text{ m} \quad (8.34)$$

Aldagai horiekin kalkula daiteke olatuak dikean eragindako indar horizontala (P), (8.35) adierazpenarekin. Enuntziatuak emandako presioak kN/m^2 unitateetan erabiliko ditugu.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_3) \cdot h' + \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_4) \cdot h_c^* \\ &= \frac{1}{2} \cdot (90,3 + 78,2) \cdot 19,8 + \frac{1}{2} \cdot (90,3 + 44,9) \cdot 7,2 = 2155,7 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (8.35)$$

Egonkortasuna aztertzeko, (8.45) ekuazioaren arabera, dikean eragina duen indar egonkortzailea zehaztu beharko dugu, hots, marruskadura-indarra. Horretarako, dikean eragiten duen indar bertikala zehaztu beharko da; hau da, honako hauek: pisua (W), ur-bulkada (E) eta azpipresioa (U). Kalkula dezagun lehenik dikearen pisua, geometria ez baita sinplea, eta, gainera, dentsitate ezberdineko materialez osatua dago. Zapataren pisua (8.36) adierazpenak emanikoa da.

$$\begin{aligned} W_{zapata} &= \rho_{zapata} \cdot g \cdot Azalera_{zapata} \\ &= 2350 \cdot 9,81 \cdot (1 \cdot (B + 2)) \\ &= 23\,054 \cdot (B + 2) \cdot \text{N/m} = 23,1 \cdot (B + 2) \cdot \text{kN/m} \end{aligned} \quad (8.36)$$

Dike-gorputzaren pisua kalkulatzeko, kontuan hartu beharko da material bakoitzak harturiko bolumena. Hala, dentsitate orokorra kalkula daiteke, (8.37) ekuazioa, eta gorputzaren pisua ondoren (8.38).

$$\rho_{gorputza} = 0,25 \cdot 2350 + 0,75 \cdot 1900 = 2013 \text{ kg/m}^3 \quad (8.37)$$

$$\begin{aligned} W_{gorputza} &= \rho_{gorputza} \cdot g \cdot Azalera_{gorputza} & (8.38) \\ &= 2013 \cdot 9,81 \cdot ((3 + 17 - 1) \cdot B) \\ &= 375\,203 \cdot B \cdot \text{N/m} = 375,2 \cdot B \quad \text{kN/m} \end{aligned}$$

Gainegituraren pisua kalkulatzeko, haren azalera kalkula daiteke lehenik, (8.39), eta haren pisua ondoren (8.40), gainegitura guztia masa-hormigoiz egina dagoela kontuan hartuta.

$$\begin{aligned} Azalera_{gainegitura} &= 1,6 \cdot B + 4,1 \cdot 4,5 + 1,3 \cdot 1,5 & (8.39) \\ &= (1,6 \cdot B + 20,4) \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{gainegitura} &= \rho_{hormigoia} \cdot g \cdot Azalera_{gainegitura} & (8.40) \\ &= 2300 \cdot 9,81 \cdot (1,6 \cdot B + 20,4) \\ &= 36\,101 \cdot B + 460\,285 \cdot \text{N/m} = 36,1 \cdot B + 460,3 \quad \text{kN/m} \end{aligned}$$

Horrela, kalkula ditzakegu-marruskadura indarrean eragina izango duten hiru indarrak, pisua (8.41), uraren bulkada (8.42) eta azpipresioa (8.43). Ikus daitekeen moduan, zehaztu nahi dugun aldagaiaren menpe egongo dira hirurak, baita indar bertikal totala ere (8.44).

$$\begin{aligned} W &= \sum W_i = 23,1 \cdot (B + 2) + 375,2 \cdot B + 36,1 \cdot B + 460,3 & (8.41) \\ &= 506,5 + 434,4 \cdot B \quad \text{kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= \rho_w \cdot g \cdot ((h' - 1) \cdot B + h_{zapata} \cdot (B + 2)) & (8.42) \\ &= 1,027 \cdot 9,81 \cdot (18,8 \cdot B + 1 \cdot (B + 2)) = 20,1 + 199,5 \cdot B \quad \text{kN/m} \end{aligned}$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot P_U \cdot B = \frac{1}{2} \cdot 76,5 \cdot B = 38,2 \cdot B \quad \text{kN/m} \quad (8.43)$$

$$\begin{aligned} W - E - U &= (506,5 + 434,4 \cdot B) - (20,1 + 199,5 \cdot B) - 38,2 \cdot B & (8.44) \\ &= 486,4 + 196,7 \cdot B \quad \text{kN/m} \end{aligned}$$

Horrenbestez, indar bertikal totalarekin eta olatuak eragindako indar totalarekin, azter dezakegu irristadurarekiko segurtasun-koefizientearentzat (SK_{irrist}) emandako baldintza (8.45). Baldintza horren arabera, zehaztu dezakegu dikearen zabalerak (8.46) adierazpenean kalkulaturikoak baino handiagoa izan beharko duela.

$$SK_{irrist} < \frac{\mu \cdot (W - E - U)}{P} \quad (8.45)$$

$$SK_{irrist} < \frac{\mu \cdot (486,4 + 196,7 \cdot B)}{P}$$

$$\begin{aligned} B &> \frac{SK_{irrist} \cdot P}{\mu \cdot 196,7} - \frac{486,4}{196,7} \\ &> \frac{1,4 \cdot 2155,7}{0,7 \cdot 196,7} - \frac{486,4}{196,7} = 21,92 - 2,47 = 19,45 \text{ m} \end{aligned} \quad (8.46)$$

8.4. Aldagaien analisia⁴

Portu bateko itsas lan baten garapen-plangintzan estrategikoa dela jo da, ontzi handiagoak atrakatzeko asmoarekin, azalera babestua zein sarkura handitzea. Diseinatu den soluzioak hormigoizko kaxak aurreikusi ditu, eta kaxaren pisu espezifikoa $\gamma = 2,4 \text{ t/m}^3$ izango dela aurreikusi da. Kaxen neurriak hauek dira: zabalera edo *manga* 18 metro eta altuera edo *puntala* 18 metro (horietatik 14 m urpean).

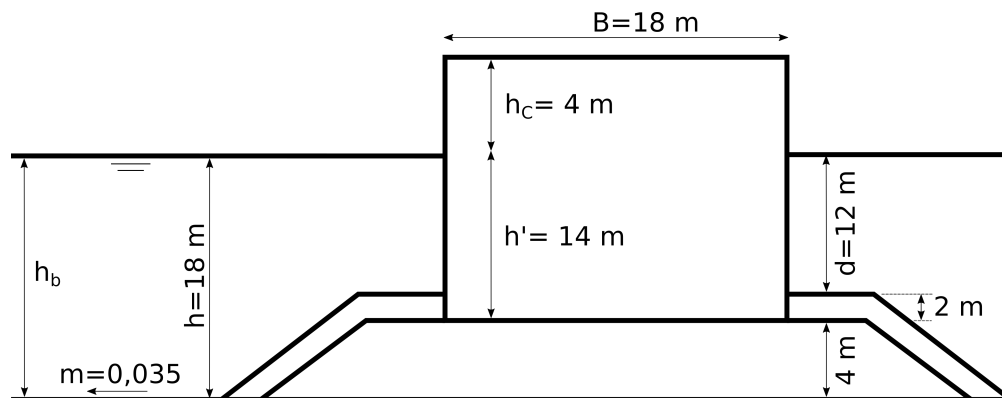
Olatuen altuera adierazgarriaren muturreko erregimena, dikea eraikiko den eremuan, $H_{1/3} = 0,95 \cdot y + 1,08$ da, y Gumbel banaketaren aldagai murriztua izanik. Olatuek 20 gradurekin jotzen dute dikea, eta horien periodoa 15 segundokoa dela jo daiteke. Dikea eraikiko den itsas plataformaren malda 0,035 da. Hondoaren gainean 4 metroko oin edo zimendua eraiki da eta, haren gainean, dikea kokatuko da. Dike-oinaren eta hondoaren arteko zimurtasun-koefizientea 0,6 da. Azken oin edo zimendu horrek, gainera, 2,0 metroko lodiera duen babes-geruza bat izango du. Uraren pisu espezifikoa $\gamma_w = 1,025 \text{ t/m}^3$ dela joko dugu. Diseinuan erabiliko den errepikatze-denbora 200 urtekoa da, eta olatuaren haustura ez da kontuan hartuko.

Honako hau eskatzen da:

- (a) Marraztu dikearen zeharkako sekzioa, kalkulurako beharrezkoak diren magnitudeak adieraziz.
- (b) Diseinu-olatuak eragindako indar horizontala eta haren momentua.
- (c) Azpipresio-indarra eta hari dagokion momentua (U eta M_U).
- (d) Zer pisu izan beharko lukete kaxek metro linealeko (t/m), baldin eta irristadurarekiko segurtasun-koefizientearen balioa 1,20 izatea nahi bada? Eta 1,60 izan dadin? Posible al da hormigoiareneko pisu espezifikoa $2,4 \text{ t/m}^3$ izatea, baldin eta dikearen gelaxkak material betegarriarekin betetzen badira?
- (e) Segurtasun-koefizientea iraultetarekiko (erabili 1,20 irristadura-koefizienteari dagokion pisua).
- (f) Zer zabalera edo *manga* izan behar du kaxak irristadurarekiko segurtasun-koefizientea 1,4 izan dadin, baldin eta 0,5 baliora murrizten bada dike-lurra arteko marruskadura-koefizientea? Kaxaren pisu espezifikoa enuntziatuan adierazitako $2,0 \text{ t/m}^3$ dela joko dugu.

⁴Bilboko Ingeniaritza Eskola, 2018/19 ikasturtea (2019-06-28), ezohikoaren 3. ariketa.

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Gomendagarria da eskura izatea dikearen eskema, olatuek dikean eragiten dituzten indarrak aztertu nahi baditugu. Hala, 8.6. irudian jaso dira dikearen eskema eta haren geometria-alagaiak.



8.6. irudia. Dikearen eskema, kalkulurako aldagai nagusiekin.

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Olatuek dikean eragiten dituzten indar eta momentuak zehazteko, diseinu-olatu zehaztu beharko dugu; hots, $H_{1/3}$. Horretarako, emandako muturreko erregimena baliatuko dugu (8.48), aldez aurretik Gumbelen aldagai murriztuak kalkulatu (8.47), jakinik errepikatze-denboraren alderantzizkoa dela bilatzen ari garen olatu-altuera gainditzeko probabilitatea.

$$y = -\ln(-\ln(1 - P(H_s > x))) = \quad (8.47)$$

$$= -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{200}\right)\right) = 5,296$$

Hala, altuera adierazgarri hori baliatuko dugu diseinuan erabiliko den H_d kalkulatzeko (8.49). Itsas sakonera ere zehaztuko dugu diketik distantzia jakinera, hots, distantzia olatu adierazgarriaren boskoitza den puntuan (8.50).

$$H_{1/3} = 0,95 \cdot y + 1,08 = 0,95 \cdot 5,296 + 1,08 = 6,1 \text{ m} \quad (8.48)$$

$$H_d = H_{1/250} = 1,80 \cdot H_s = 1,80 \cdot 6,1 = 11,0 \text{ m} \quad (8.49)$$

$$h_b = h + 5 \cdot H_s \cdot \tan \theta = 18 + 5 \cdot 6,1 \cdot 0,035 = 19,1 \text{ m} \quad (8.50)$$

Beharko den beste aldagai bat eraso-olatuaren uhin-luzera da (8.52), horretarako sakonera mugagabeko luzera baliatuz (8.51), eranskineko E.7 taulako balioak hartuz. Uhin-luzerarekin ondorengo kalkuluetan erabiliko ditugun bi balio ere kalkulatu ditugu, (8.53) eta (8.54).

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 15^2}{2 \cdot \pi} = 351,3 \text{ m} \quad (8.51)$$

$$\frac{h}{L_o} = \frac{18}{351,3} = 0,051 \quad \xrightarrow[\text{taula}]{\text{E.7}} \quad \frac{h}{L} = 0,0952 \quad \rightarrow \quad L = 189,1 \text{ m} \quad (8.52)$$

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 18}{189,1} = 1,196 \quad \Rightarrow \quad \sinh 1,196 = 1,502 \quad (8.53)$$

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 18}{189,1} = 0,598 \quad \Rightarrow \quad \cosh 0,598 = 1,184 \quad (8.54)$$

Olatuak dikearen paretan eragindako presioak zehazteko, α_i koefizienteak kalkulatu behar dira lehenik, (8.55), (8.56) eta (8.57) ekuazioetan adierazi bezala.

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot h/L)} \right)^2 \quad (8.55)$$

$$= 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1,196}{1,502} \right)^2 = 0,92$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3 \cdot h_b} \cdot \left(\frac{H_d}{d} \right)^2 ; \frac{2 \cdot d}{H_d} \right\} \quad (8.56)$$

$$= \min \left\{ \frac{19,1 - 12}{3 \cdot 19,1} \cdot \left(\frac{11}{12} \right)^2 ; \frac{2 \cdot 12}{11} \right\}$$

$$= \min \{ 0,10 ; 2,18 \} = 0,10$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h/L)} \right) \quad (8.57)$$

$$= 1 - \frac{14}{18} \cdot \left(1 - \frac{1}{1,184} \right) = 0,88$$

Presioak kalkulatzeko, beste bi aldagai beharko ditugu: dike-gainaren altuera diseinuko itsas mailaren gainetik (η^*) eta h_c^* , (8.58) eta (8.59) ekuazioetan jasoak.

$$\eta^* = 0,75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_d = 0,75 \cdot (1 + \cos 20^\circ) \cdot 11,0 = 16,0 \text{ m} \quad (8.58)$$

$$h_c^* = \min\{\eta^*; h_c\} = \min\{16,0; 4,0\} = 4,0 \text{ m} \quad (8.59)$$

Hala, olatuak dikearen paretan eragiten duen presio-legearen P_i presioak zehaztu ditzakegu. Horiek (8.60), (8.61), (8.62) eta (8.63) ekuazioetan daude emanak.

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.60)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 20) \cdot (0,92 + 0,10 \cdot \cos^2 20) \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 11,0 = 108,2 \text{ kN/m}^2$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h/L)} = \frac{108,2}{1,184} = 91,4 \text{ kN/m}^2 \quad (8.61)$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1 = 0,88 \cdot 108,2 = 95,2 \text{ kN/m}^2 \quad (8.62)$$

$$P_4 = P_1 \cdot \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right) = 108,2 \cdot \left(1 - \frac{4}{16}\right) = 81,2 \text{ kN/m}^2 \quad (8.63)$$

Azkenik, olatuak eragindako indar horizontala (P) eta haren momentua (M_P) kalkula daitezke, (8.64) eta (8.65) ekuazioekin.

$$P = \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_3) \cdot h' + \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_4) \cdot h_c^* \quad (8.64)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (108,2 + 95,2) \cdot 14 + \frac{1}{2} \cdot (108,2 + 81,2) \cdot 4 = 1802,6 \text{ kN/m}$$

$$M_P = \frac{(h')^2}{6} \cdot (2 \cdot P_1 + P_3) + \frac{h' \cdot h_c^*}{2} \cdot (P_1 + P_4) + \frac{(h_c^*)^2}{6} \cdot (P_1 + 2 \cdot P_4) \quad (8.65)$$

$$= \frac{14^2}{6} \cdot (2 \cdot 108,2 + 95,2) + \frac{14 \cdot 4}{2} \cdot (108,2 + 81,2) + \frac{4^2}{6} \cdot (108,2 + 2 \cdot 81,2)$$

$$= 16\,203,7 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Azpipresioa kalkulatzeko, lehenik haren legeari dagokion P_U presio maximoa kalkulatu dugu, (8.66) ekuazioaren arabera. Horrekin azpipresioa (U) eta haren momentua (M_U) kalkula daitezke, lehena (8.67) ekuazioarekin, eta bigarrena (8.68) ekuazioarekin.

$$P_U = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.66)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 20^\circ) \cdot 0,92 \cdot 0,88 \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 11,0 = 86,8 \text{ kN/m}^2$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot P_U \cdot B = \frac{1}{2} \cdot 86,8 \cdot 18 = 781,2 \text{ kN/m} \quad (8.67)$$

$$M_U = \frac{2}{3} \cdot U \cdot B = \frac{2}{3} \cdot 781,2 \cdot 18 = 9374,4 \text{ kN} \cdot \text{m/m} \quad (8.68)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Kasu bakoitzean dikeak izan beharko lukeen pisu espezifikoak (8.70) adierazpenarekin zehaztuko genuke, irristadurarekiko egonkorra dela ziurtatuz. Lehenik, dike-pisuaren (W) eta ur-bulkadaren (E) arteko oreka-indarra zehaztu dugu, (8.69) adierazpenarekin. γ deitu diogu dikearen pisu espezifikoari.

$$N = W - E = 18 \cdot (\gamma \cdot 18 - 1,025 \cdot 14) \cdot 9,81 \quad \text{kN/m} \quad (8.69)$$

$$= 3178,4 \cdot \gamma - 2533,9 \quad \text{kN/m}$$

Orain, kalkula daiteke irristadurarekiko bi segurtasun-koefizienteak (SK_{irrist}) lortzeko kaxak izan behar duen gutxieneko pisu espezifikoa, (8.71) eta (8.72) ekuazioetakoak. Hala, koefizientea 1,2 zan dadin, pisu espezifikoa $2,18 \text{ t/m}^3$ izan beharko da, eta koefizientea 1,6 izan dadin, pisu espezifikoa $2,55 \text{ t/m}^3$ izan beharko da. Kaxaren pisu espezifikoa denez betegarriaren eta hormigoiaaren proportzioen arabera, eta betegarria hormigoia baino arinagoa denez, lehen kasuan betetzen da baldintza, baina ez bigarreanean.

$$SK_{irrist} = \frac{\mu \cdot (N - U)}{P} \quad (8.70)$$

$$1,2 = \frac{0,6 \cdot (3178,4 \cdot \gamma - 2533,9 - 781,2)}{1802,6} \implies \gamma = 2,18 \text{ t/m}^3 \quad (8.71)$$

$$1,6 = \frac{0,6 \cdot (3178,4 \cdot \gamma - 2533,9 - 781,2)}{1802,6} \implies \gamma = 2,55 \text{ t/m}^3 \quad (8.72)$$

Enuntziatuak eskaturiko metro linealeko pisua zehazteko, soilik pisu espezifikoaren sekzioaren azalergatik biderkatu beharko dugu, (8.73) adierazpenean eman bezala. Pisu horiek (8.74) eta (8.75) ekuazioetakoak dira. Edonola ere, bigarrena ezin lor daiteke eskuragarri dauden materialekin, aurrerago aipatu dugun arrazoiagatik.

$$W_{metroko} = \gamma \cdot azalera \quad (8.73)$$

$$= 2,18 \cdot (18 \cdot 18) = 706,3 \text{ t/m} \quad (8.74)$$

$$= 2,55 \cdot (18 \cdot 18) = 826,2 \text{ t/m} \quad (8.75)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Kaxaren pisu espezifikoaren finkatuta, (8.71), N indar bertikala kalkula daiteke (8.69) adierazpenarekin, aipaturiko pisu espezifikoarekin, hots, 1,2 segurtasun-koefizientearekin dagokionarekin. Horrekin, iraulketa-rikiko segurtasun-koefizientea zehaztu dezakegu, (8.77) ekuazioa baliatuta.

$$N = W - E = 3178,4 \cdot \gamma - 2533,9 \quad (8.76)$$

$$= 3178,4 \cdot 2,18 - 2533,9 = 4395,0 \text{ kN/m}$$

$$SK_{irraul} = \frac{N \cdot B/2 - M_U}{M_P} = \frac{4395,0 \cdot 18/2 - 9374,4}{16203,7} = 1,86 \quad (8.77)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (f). Irristadura-baldintza beteko duen zabalera (B) zehazteko, berridatzi egin beharko ditugu N eta U indarren adierazpenak, (8.78) eta (8.79), irristadura-koefizientearen adierazpenetik kaxaren zabalera askatu ahal izateko (8.80). Ikus daitekeen moduan, irristadura-koefizientearen murrizpenak kaxaren zabalera handitzea dakar.

$$N = W - E = B \cdot (2,0 \cdot 18 - 1,025 \cdot 14) \cdot 9,81 \quad \text{kN/m} \quad (8.78)$$

$$= 212,4 \cdot B \quad \text{kN/m}$$

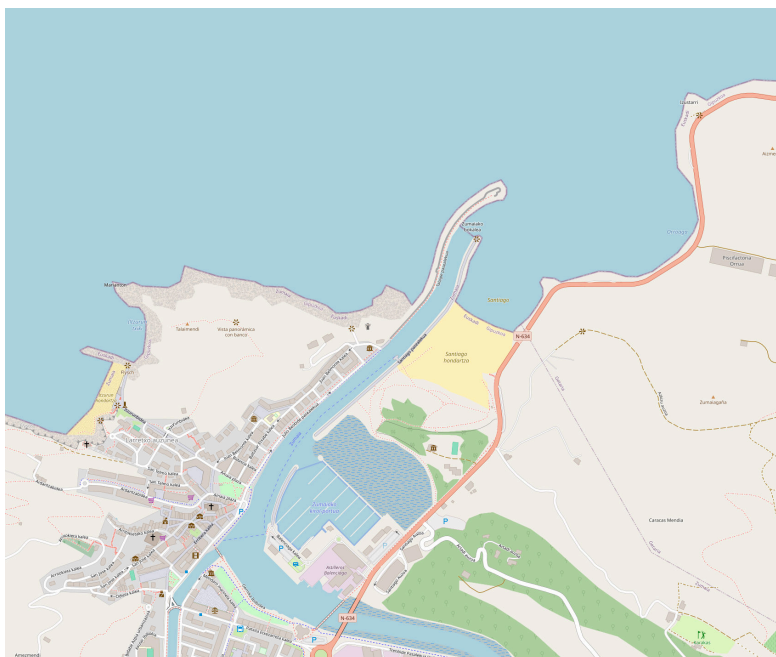
$$U = \frac{1}{2} \cdot P_U \cdot B = \frac{1}{2} \cdot 86,8 \cdot B = 43,4 \cdot B \quad \text{kN/m} \quad (8.79)$$

$$SK_{irrist} = \frac{\mu \cdot (N - U)}{P} \quad (8.80)$$

$$1,4 = \frac{0,5 \cdot (212,4 \cdot B - 43,4 \cdot B)}{1802,6} \quad \Rightarrow \quad B = 29,9 \text{ m}$$

8.5. Zumaiako portua⁵

Urola ibaiaren bokalean, Zumaian, sarreran ezponda-dike bat eraiki zen 1990eko hamarkadan; 8.7. irudian ikus daiteke dikea, bokalearen ezkerraldean. Dikearen sekzioa 8.8. irudian jasotakoa da. Dikea NE noranzkoan eraiki zen, iparraldearekiko 45° zituela. Badirudi aukeren artean zegoela dikearen noranzkoa NNE izatea, iparraldearekiko $22,5^\circ$ zituenena, baina ez zela eraiki garestiegia zelako.

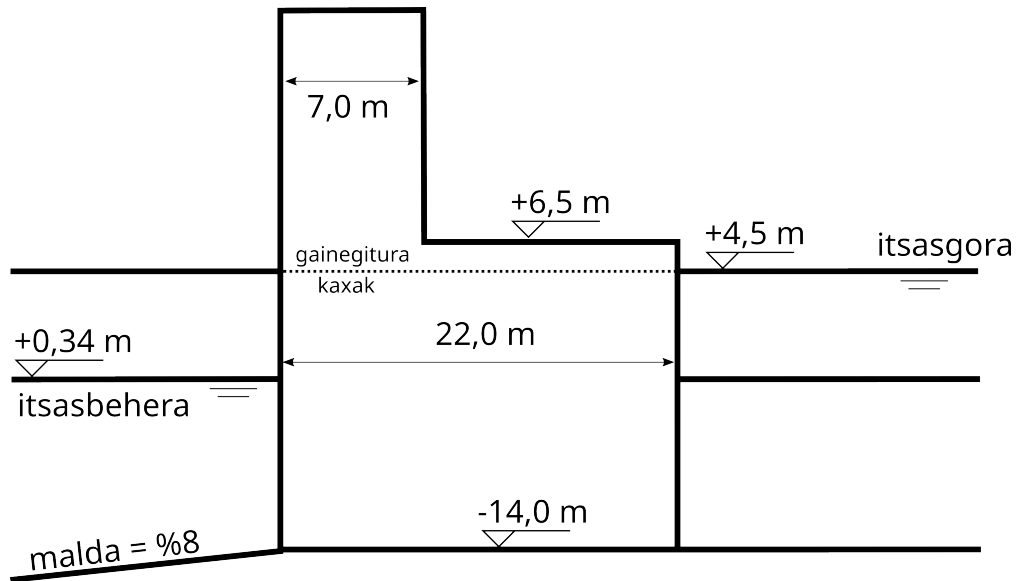


8.7. irudia. Urola ibaiaren itsasoratzea eta dikea (OSM, 2024).

Orain, dikearen diseinuan eraiki ez zen alternatiba bat aztertu nahi da, NNE noranzkoa zuena, alegia. Diseinua honako baldintza hauetan egingo da:

- $H_s = 6,5$ m
- $T_p = 15$ s.
- Olatuen noranzkoa: NW.
- $\rho_w = 1025$ kg/m³.
- $\rho_{HM} = 2300$ kg/m³.
- $\rho_{HA} = 2500$ kg/m³.

⁵Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2021/22 ikasturtea (2022-01-18), finalaren 2. ariketa.



8.8. irudia. Zumaiako babes-dikearen sekzioa.

- $\rho_{betegarria} = 1900 \text{ kg/m}^3$.
- Gainegitura: masa-hormigoia.
- Kaxak: %25 hormigoi armatua eta %75 betegarria.

Honako hau eskatzen da:

- Zein izan beharko da kokotearen gutxieneko kota egiturazko segurtasunean kalterik sor ez dadin, barne-ezponda babestua egonik ere?
- Dikearen egonkortasuna kalkulatzeko, zehaztu honako hauek: h , h' , d , h_b eta η^* .
- Kalkulatu itzazu: α_1 , α_2 (Takahashi zuzenketarik gabe) eta α_3 .
- Kokotearen kota +14,00 bada, kalkulate P_1 , P_3 , P_4 zein P_U , eta marraztu presio dinamikoen legea.
- Kaxa-oinarriaren marruskadura-koefizientea $\mu = 0,7$ baldin bada, nahikoa al da zabalera 22 m izatea labainketarik egon ez dadin?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). Dike-egituraren segurtasun-maila dikea gainditzen duen ur kopuruaren ikuspuntutik aztertuko dugu, horretarako beharko litzatekeen gutxieneko frankobordoa zehaztuz (8.81) adierazpenaren arabera. Egituraren segurtasun-ikuspuntutik, eta babesaren duen horma bat denez, $501/(\text{s} \cdot \text{m})$

litzateke kalterik ez sortzeko emariaren muga-balioa, eranskinetako E.18 nomogramaren arabera. Edonola ere, egitura mota ere izan behar da kontuan b definitzeko, eranskinetako E.17 nomogramaren arabera. Dikea iragazgaitza denez eta emandako eskemaren arabera dikeak ez duenez olatu-babesik, $b = 4,3$ izango da. Hala, frankobordoa askatuz (8.82) adierazpenean ikusten den moduan, frankobordoaren gutxieneko altuera zehaztuko genuke, (8.83) ekuazioan emana.

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{F}{H_s}\right) \quad (8.81)$$

$$F = -\ln\left(\frac{q}{0,2 \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3}}\right) \cdot \frac{H_s}{b} \quad (8.82)$$

$$= -\ln\left(\frac{50 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 6,5^3}}\right) \cdot \frac{6,5}{4,3} = 8,07 \text{ m} \quad (8.83)$$

Frankobordoa zehaztu ondoren, kokote-gainaren kota finka dezakegu itsasgoraren maila erreferentzia izanik, (8.84) adierazpenarekin. Hori izango da dike-gainak izan beharreko gutxieneko kota, egitura-segurtasunean kalterik sor ez dadin.

$$\text{Kokote-gainaren kota} = 4,5 + 8,07 = 12,57 \text{ m} \quad (8.84)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Dikearen diseinuan erabiliko diren aldagaiek eskatzen dira. h izango da hondoraino dagoen itsas sarkura naturala, h' izango da dike-gorputzaren oinarriraino dagoen itsas sarkura, eta d izango da babes-bermaren gainetik dagoen sarkura. Dikea zuzenean eraikitzen denez itsas hondoaren gainean, eta babes-bermarik ez duenez, gauza bera adieraziko dute hiru aldagaiek; balioa (8.85) ekuaziokoa litzateke.

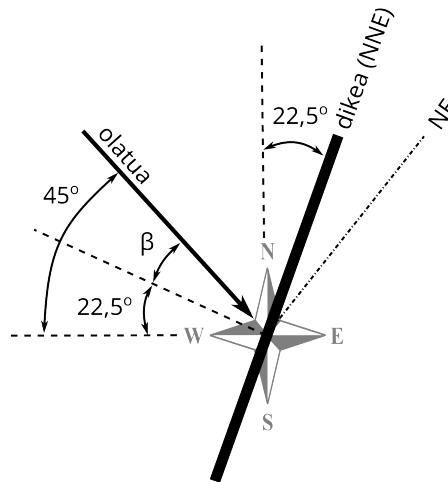
$$h = h' = d = 4,5 - (-14,0) = 18,5 \text{ m} \quad (8.85)$$

$$h_b = h + (5 \cdot H_s) \cdot m = 18,5 + (5 \cdot 6,5) \cdot 0,08 = 21,1 \text{ m} \quad (8.86)$$

Dikean η^* aldagaia (8.89) adierazpenean jasotakoa da, baina olatuen eraso-angelua eta olatu-erasotzailearen altuera finkatu behar ditugu lehenik. Godaren irizpidean erabiltzen den olatu-altuera oinarritua dago olatu adierazgarrian, (8.87) adierazpenean jaso bezala.

$$H_d = H_{1/250} = 1,80 \cdot H_s = 1,80 \cdot 6,50 = 11,7 \text{ m} \quad (8.87)$$

Eraso-angelua, aldiz, olatu-erasotzailearen eta dike-lerrokaduraren arteko angeluak emana dator, besteak beste. Angelu horren balioa 8.9. irudiak erakusten du. Olatu-erasotzaileak ipar mendebaldetik datozela kontuan hartuta, $22,5^\circ$ da angelu hori. Edonola ere, angelu hori 15° baino handiagoa denez, 15° murriztuko dugu segurtasunaren alde egiteko, balioa (8.88) ekuaziokoa da. Horrenbestez, η^* zehaztuko genuke, (8.89) adierazpenean jaso.



8.9. irudia. Babes-dikearen eta olatuen noranzkokoaren eskema.

$$\beta = 22,5^\circ - 15^\circ = 7,5^\circ \quad (8.88)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \eta^* &= 0,75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_d & (8.89) \\ &= 0,75 \cdot (1 + \cos 7,5^\circ) \cdot 11,7 = 17,5 \text{ m} \end{aligned}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Godaren presio-legea zehazteko koefizienteen kalkulurako, (8.95), (8.97) eta (8.98) adierazpenak baliatuko ditugu. Edonola ere, adierazpen horietan agertzen diren gai jakinen balioa zehaztu dezagun lehenik, gero etorriko diren kalkuluak errazteko.

Gai horiek (8.93) eta (8.94) adierazpenetakoak dira. Horretarako, baina, olatuaren uhin-luzera zehaztu behar dugu dike parean. Hori egiteko periodoa fin-

katu, (8.90) adierazpenekoa, dagokion uhin-luzera kalkulatu sakonera mugagabea, (8.91) adierazpenarekin, eta uhin-luzera zehaztuko dugu (8.92) adierazpeneko dispertsio-erlazioarekin.

$$T = 15 \text{ s} \quad (8.90)$$

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 15^2}{2 \cdot \pi} = 351,3 \text{ m} \quad (8.91)$$

$$L = L_o \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (8.92)$$

$$L = 351,3 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 18,5}{L}\right) \xrightarrow{\text{hurbilketak}} L = 190,9 \text{ m}$$

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 18,5}{190,9} = 1,212 \implies \sinh 1,212 = 1,531 \quad (8.93)$$

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 18,5}{190,9} = 0,609 \implies \cosh 0,609 = 1,191 \quad (8.94)$$

Orain bai, kalkula ditzagun aipaturiko koefizienteen balioak. Balio horiek (8.95), (8.97) eta (8.98) adierazpenekin kalkulatu dira, jada zehaztu baititugu horko aldagaien balioak.

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot h/L)}\right)^2 \quad (8.95)$$

$$= 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1,212}{1,531}\right)^2 = 0,913 \quad (8.96)$$

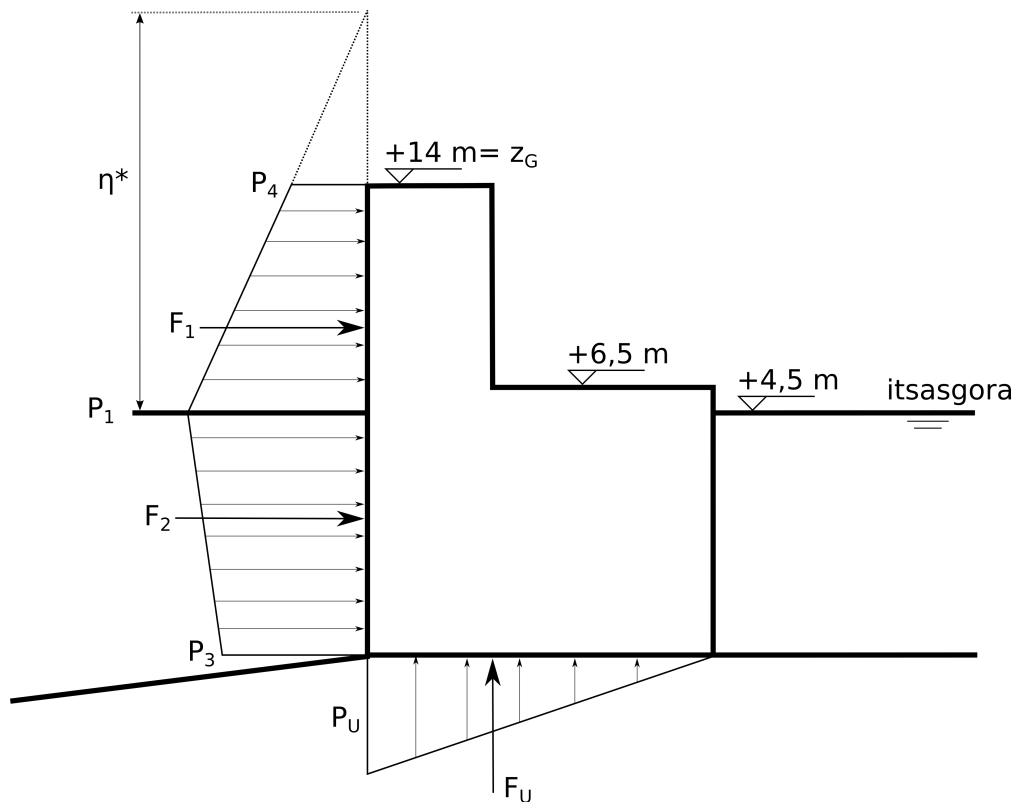
$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3 \cdot h_b} \cdot \left(\frac{H_d}{d}\right)^2 ; \frac{2 \cdot d}{H_d} \right\} \quad (8.97)$$

$$= \min \left\{ \frac{21,1 - 18,5}{3 \cdot 21,1} \cdot \left(\frac{11,7}{18,5}\right)^2 ; \frac{2 \cdot 18,5}{11,7} \right\}$$

$$= \min\{ 0,0164 ; 3,162 \} = 0,0164$$

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh(2 \cdot \pi \cdot h/L)} \right) \\ &= 1 - \frac{18,5}{18,5} \cdot \left(1 - \frac{1}{1,191} \right) = 0,840\end{aligned}\quad (8.98)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Presio-legearen balioak zehaztu aurretik, marraztu dezagun eskatzen zaigun presio-legea, uhin-erasotzaileak dikeari eragiten diona. Eskema hori 8.10. irudian jaso da.



8.10. irudia. Uhin-erasotzaileak dikeari eragiten dion presio-legearen eskema.

Legean agertzen diren puntu adierazgarrien balioak (8.99) eta (8.102) arteko adierazpenetan zehaztu dira. Azkena kalkulatzeko, P_4 , eskeman emaniko presio-legea baliatu eta hiruko erregela egin da, kontuan harturik kokote-gainaren kota, Z_G deituko duguna, 14 metrora finkatu dena.

$$\begin{aligned}
P_1 &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot H_d & (8.99) \\
&= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 7,5^\circ) \cdot (0,913 + 0,0164 \cdot \cos^2 7,5^\circ) \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot 11,7 \\
&= \frac{1}{2} \cdot (1,991) \cdot (0,929) \cdot 117\,646 = 108\,801 \text{ N/m}^2 = 108,8 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1 = 0,840 \cdot 108,8 = 91,4 \text{ kN/m}^2 \quad (8.100)$$

$$P_4 = P_1 \cdot \frac{(\eta^* - (Z_G - 4,5))}{\eta^*} = 108,8 \cdot \frac{(17,5 - (14 - 4,5))}{17,5} = 49,7 \text{ kN/m}^2 \quad (8.101)$$

$$\begin{aligned}
P_U &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho \cdot g \cdot H_d & (8.102) \\
&= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 7,5^\circ) \cdot 0,913 \cdot 0,840 \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot 11,7 = 89,8 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Labainketarik egongo ote den frogatzeko, irristadurarekiko segurtasun-koefizientea kalkulatu dugu, (8.109) adierazpena baliatuz. Horretarako, dikeari eragiten dioten indar horizontalak kalkulatu behar ditugu lehenik.

Oinarrian dagon marruskadura-indarra kalkulatzeko, dikearen pisua zehaztuko dugu aurretik, material ezberdineko eremuetan banatuz. Kontuan hartuz gainegitura masa-hormigoizkoa dela, (8.103) eta (8.104) adierazpenekin kalkulatu dugu haren pisua, bitan banatuz forma geometrikoa: kokotea eta haren azpitik geratzen den gainegitura. Kaxen pisua (8.105) adierazpenarekin kalkulatu dugu, gogoan hartuta material bakoitzaren proportzioa. Ikus pisuak dikearen metro luzera bakoitzeko ari garela ematen.

$$\begin{aligned}
W_{\text{kokotea}} &= V \cdot \gamma_{HM} = V \cdot (\rho_{HM} \cdot g) & (8.103) \\
&= (7 \cdot (14 - 6,5)) \cdot (2300 \cdot 9,81) = 1\,184\,558 \text{ N/m} = 1184,6 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

$$W_{gaineq} = V \cdot \rho_{HM} \cdot g \quad (8.104)$$

$$= (22 \cdot (6,5 - 4,5)) \cdot 2300 \cdot 9,81 = 992\,772 \text{ N/m} = 992,8 \text{ kN/m}$$

$$W_{kaxa} = V \cdot \rho_{kaxa} \cdot g \quad (8.105)$$

$$= (22 \cdot (4,5 + 14)) \cdot (1900 \cdot 0,75 + 2500 \cdot 0,25 - 1025) \cdot 9,81$$

$$= 4\,092\,487 \text{ N/m} = 4092,5 \text{ kN/m}$$

Ondoren, dikeari eragiten dioten indarrak kalkulatuko ditugu 8.10. irudiko presiolegea kontuan hartuta. Hala, F_1 litzateke itsas mailaren gaineko presioen batura, F_2 itsas mailaren azpikoa presioena eta F_U oinarrian eragindako presioena, bertikala dena. Indar horiek, hurrenez hurren, (8.106), (8.107) eta (8.108) adierazpenetan jasotakoak dira.

$$F_1 = \frac{P_1 + P_4}{2} \cdot (14 - 4,5) \quad (8.106)$$

$$= \frac{108,8 + 49,7}{2} \cdot (14 - 4,5) = 752,9 \text{ kN/m}$$

$$F_2 = \frac{P_1 + P_3}{2} \cdot (4,5 + 14) \quad (8.107)$$

$$= \frac{108,8 + 91,4}{2} \cdot (4,5 + 14) = 1881,9 \text{ kN/m}$$

$$F_U = P_U \cdot \frac{B}{2} = 89,8 \cdot \frac{22}{2} = 987,8 \text{ kN/m} \quad (8.108)$$

Azkenik, irristadurarekiko segurtasun-koefizientea kalkulatuko dugu (8.109) adierazpenarekin. Adierazpen horretan, indar egonkortzaileen eta ezegonkortzaileen arteko oreka aztertzen da. Indar egonkortzailea da marruskadura-indarra, oinarriko indar normala marruskadura-koefizienteaz biderkatua; indar ezegonkortzaileak dira olatuak sorturiko indar horizontalak, F_1 eta F_2 . Koefiziente horren balioa, (8.110) adierazpenean jaso, gutxieneko balioa baino handiagoa denez, dikearen sekzioa egonkorra dela esan daiteke.

$$SK_{irristadura} = \frac{\mu \cdot (\sum W_i - F_U)}{\sum F_{Hi}} \quad (8.109)$$

$$= \frac{\mu \cdot ((W_{kokotea} + W_{gainea} + W_{kaxa}) - F_U)}{F_1 + F_2}$$

$$= \frac{0,7 \cdot ((1184,6 + 992,8 + 4092,5) - 987,8)}{752,9 + 1881,9}$$

$$= \frac{0,7 \cdot (6275,9 - 987,8)}{2634,8} = 1,41 > 1,4 \quad \checkmark \quad (8.110)$$

8.6. Bartzelonako portua⁶

Beheko irudian, 8.11. irudia, Bartzelonako portuaren ipar-sarbidea ageri da. Sarbide horretan dike bertikal berria eraiki zen 2001. urtean, irudian nabarmendu dena. Hain zuzen ere, 2001eko azaroaren 10ean, lanean ari zirela, dike bertikalaren haustura eragin zuen ekaitz batek.



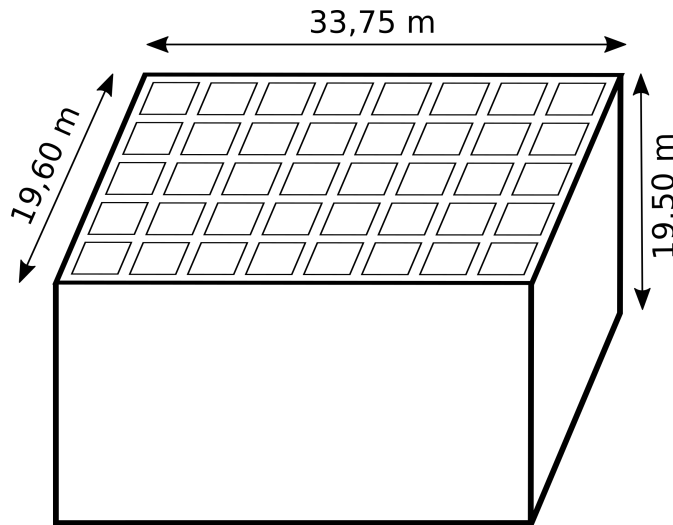
8.11. irudia. Bartzelonako portuaren oinplanoa, eraikitzen ari ziren dikea eta ekaitzaren noranzkoa (OSM, 2024).

Dikea kaxa zelularrez osatuta zegoen; 8.12. irudian jaso dira haren neurriak. Dikea oinarriaren erdian ainguratu berri zegoen, eta gelaxkak egun batzuk lehenago bete ziren.

Oinarriak 2 metroko lodiera zuen, eta 30 metroko zabalera goialdean. Haren gainean zuzenean bermatu zen kaxa, itsasgorari dagokion ur-lerroa gainaldea baino 2 metro beherago utziz. Itsas hondoa ia horizontala da; sakonera 20 metrokoa da kaxaren itsasaldeko paramentutik 22,5 metrora. Hauek dira aztertuko ditugun ekaitzaren eta materialen ezaugarriak:

- $H_s = 4,5$ m, olatua hautsi gabe iristen da.
- $T = 9$ s.
- Olatuen noranzkoa: 30° dikearen elkarzutarekiko.

⁶Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, 2023/24 ikasturtea (2024-01-16), finalaren 2. ariketa.



8.12. irudia. Dikeko kaxen eskema, haren dimentsioekin.

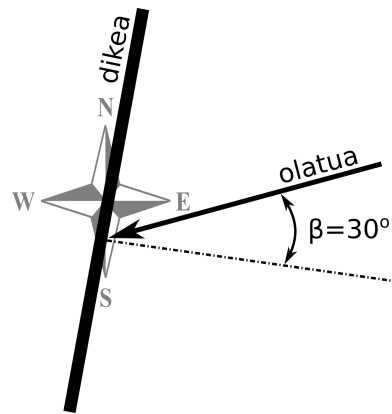
- Itsasoko ura: $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$.
- Masa-hormigoia: $\rho_{HM} = 2300 \text{ kg/m}^3$.
- Hormigoi armatua: $\rho_{HA} = 2350 \text{ kg/m}^3$.
- Betegarria: $\rho_{RG} = 1900 \text{ kg/m}^3$.
- Harri-lubeta: $\rho_{HL} = 2600 \text{ kg/m}^3$.

Honako hau eskatzen da:

- Egin dikearen eta ekaitzaren noranzkoaren eskema, kalkulurako erabiliko den eraso-angelua adieraziz.
- Kaxaren egonkortasuna kalkulatzeko, zehaztu honako hauek: h , h' , d , h_b eta η^* .
- Kalkula itzazu Godaren α_1 eta α_3 parametroak. Bigarren balioa ezaguna da, α_2 , eta 0,0205 balio du.
- Marraztu kaxa zelularreko presioen eta azpipresioen diagrama, eta kalkulatu balio esanguratsuak.
- Kaxa ainguratu berri zenez, kaxaren oinarrian marruskadura-koefizientea $\mu = 0,6$ dela joko dugu. Ezaguna da, gainera, kaxen % 25 hormigoi armatukoa zela eta % 75 betegarria. Kalkulatu Labaindurarekiko Segurtasun Koefizientea (LSK).

- (f) Olatuek eta azpipresioak sortutako momentu ezegonkortzailea $14\,045 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ dela jakinik, kalkula itzazu momentu egonkortzaileak eta Iraulketarekiko Segurtasun Koefizientea (ISK). Azpipresioaren momentua ezegonkortzailea dela joko dugu, eta ez duela momentu egonkortzailea murrizten.
- (g) Kalkulatoriko LSK eta ISK koefizienteak aztertuz, eta kaxak benetan huts egin zuela jakinik, zer uste duzu gertatu zela? Garatu zure erantzuna, ikasgelan ikusi ditugun kaxen akats motetan oinarrituta.
- (h) Olatu-egoera horretan, zer nolakoa zen dike-gainditzea eta haren arrisku-maila?

ARIKETAREN EBAZPENA (a). 8.11. irudian oinarrituta egingo dugu noranzkoen eskema, (8.13.) irudian jaso. Beharrezkoa ez bada ere, iparrorratza gehitu da irudian. Enuntziatuko datuak kontuan hartuta, dikea eta dike-elkarzutarekiko eraso-angelua zehaztu dira eskeman.



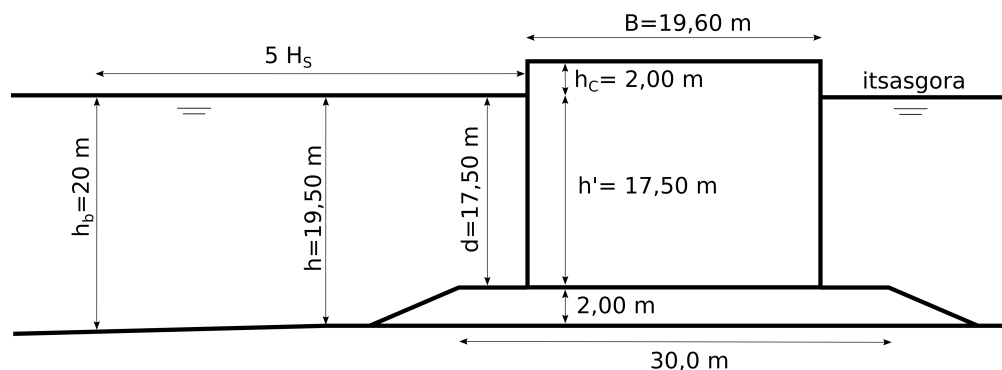
8.13. irudia. Dike-sekzioaren eskema.

Edonola ere, angelu hori ez da kalkuluan erabiliko duguna. Segurtasunagatik 15° murriztuko dugu angelu hori, (8.111) adierazpenean jaso bezala. Angelua 15° baino txikiagoa balitz, 0° erabiliko genuke.

$$\beta_{zuzendua} = \beta - 15^\circ = 30^\circ - 15^\circ = 15^\circ \quad (8.111)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (b). Oraingoan, enuntziatuak eskatzen ez bada ere, eskema bat egingo dugu aldagaiak zehazteko. Eskema hori 8.14. irudian jaso da. Irudian bertan jaso dira aldagaiak eta horien balioak. Ikus irudian h_b

aldagaia adierazi dela baina ez dela kalkulatu, datua baita. Enuntziatuak esan diguna egiaztatu beharko genuke; hau da, sakonera hori dagoen distantzia olatu adierazgarriaren boskoitza dela: $5 \cdot H_s = 5 \cdot 4,5 \text{ m} = 22,5 \text{ m}$.



8.14. irudia. Dike-sekzioaren eskema.

Lehenik diseinuko olatu-altuera zehaztu dugu, (8.112) ekuazioan jaso, eta, ondoren, η^* zehaztu dugu, (8.113) adierazpenekoa.

$$H_d = H_{1/250} = 1,80 \cdot H_s = 1,80 \cdot 4,50 = 8,10 \text{ m} \quad (8.112)$$

$$\eta^* = 0,75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_d \quad (8.113)$$

$$= 0,75 \cdot (1 + \cos 15^\circ) \cdot 8,10 = 11,94 \text{ m} \quad (8.114)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (c). Godaren aldagaiak kalkulatu aurretik, zehaztu dezagun olatuaren uhin-luzera dikean, α koefizienteak kalkulatzeko behar dugu eta. Horretarako, sakonera mugagabeko uhin-luzera kalkulatu dugu lehenik, (8.115) adierazpenekoa. Ondoren, dispertsio-erlazioa baliatuz, (8.116) adierazpenekoa, aipaturiko uhin-luzera kalkulatu dugu, (8.117) adierazpenean jaso.

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,81 \cdot 9^2}{2 \cdot \pi} = 126,47 \text{ m} \quad (8.115)$$

$$L = L_o \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L} \right) \quad (8.116)$$

$$L = 126,47 \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 19,5}{L} \right) \xrightarrow{\text{hurbilketak}} L = 104,63 \text{ m} \quad (8.117)$$

Koefizienteen kalkulua errazteko, bi gai gehigarri kalkulatu ditugu, (8.118) eta (8.119) adierazpenetan jasotakoak.

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 19,5}{104,63} = 2,342 \quad \Longrightarrow \quad \sinh 2,342 = 5,153 \quad (8.118)$$

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 19,5}{104,63} = 1,171 \quad \Longrightarrow \quad \cosh 1,171 = 1,768 \quad (8.119)$$

Orain bai, zehaztu ditzakegu α koefizienteak (8.120), (8.121) eta (8.122) adierazpenetan jasoak. Gogoratu bigarrena enuntziatuak emandakoa dela.

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h/L}{\sinh (4 \cdot \pi \cdot h/L)} \right)^2 \quad (8.120)$$

$$= 0,6 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2,342}{5,153} \right)^2 = 0,703$$

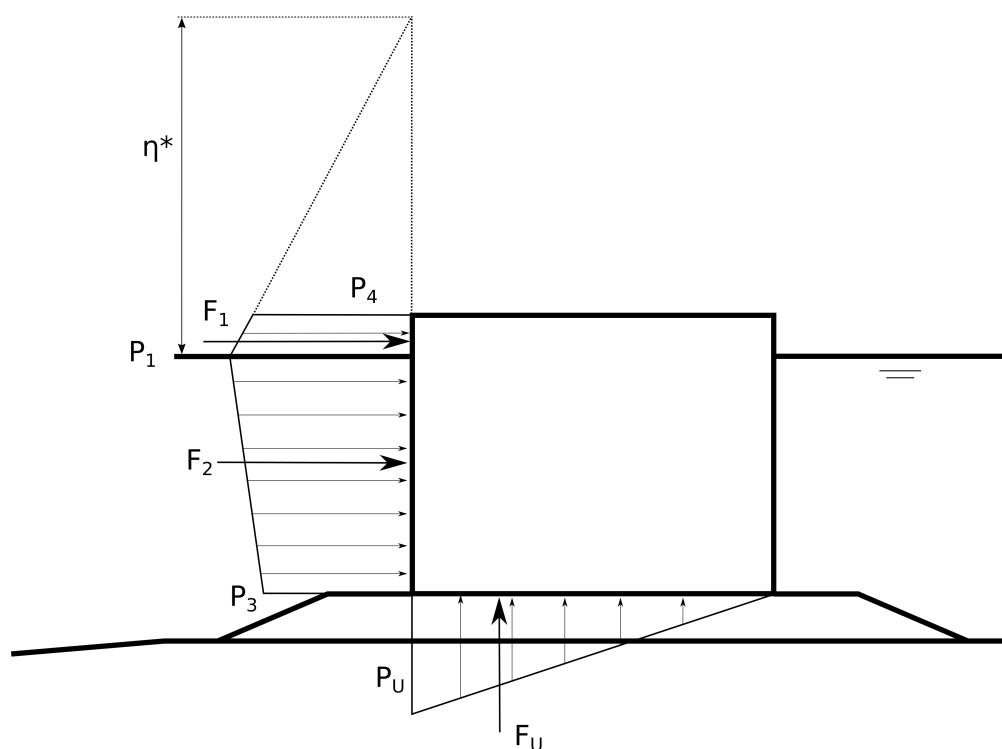
$$\alpha_2 = 0,0205 \quad (\text{datua da}) \quad (8.121)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh (2 \cdot \pi \cdot h/L)} \right) \quad (8.122)$$

$$= 1 - \frac{17,5}{19,5} \cdot \left(1 - \frac{1}{1,768} \right) = 0,610$$

ARIKETAREN EBAZPENA (d). Presio-legearen eskema 8.15. irudian egin da. P_i presioak legearen puntu jakineko presioak dira: P_4 gainaren parean, P_1 itsas mailan, P_3 zimenduan eta P_U itsasaldeko paramentuan. F_i indarrak dira: F_1 ur-mailatik kanpo dagoen presio-legearena, F_2 urpean dagoen presio-legearena, eta F_U azpipresioarena.

Aipaturiko presioak (8.123) eta (8.126) arteko adierazpenetan jasotakoak dira.



8.15. irudia. Uhin-erasotzaileak dikeari eragiten dion presio-legearen eskema.

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.123)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 15^\circ) \cdot (0,703 + 0,0205 \cdot \cos^2 15^\circ) \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot 8,10$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1,966) \cdot (0,722) \cdot 81\,448 = 57\,806 \text{ N/m}^2 = 57,8 \text{ kN/m}^2$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1 = 0,610 \cdot 57,8 = 35,3 \text{ kN/m}^2 \quad (8.124)$$

$$P_4 = P_1 \cdot \frac{\eta^* - 2}{\eta^*} = 57,8 \cdot \frac{11,94 - 2}{11,94} = 48,1 \text{ kN/m}^2 \quad (8.125)$$

$$P_U = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (8.126)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 15^\circ) \cdot 0,703 \cdot 0,610 \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot 8,10 = 34\,332 \text{ N/m}^2 = 34,3 \text{ kN/m}^2$$

Presio horiek eragindako indarrak, aurreko presio esanguratsuetan oinarrituak, (8.127) eta (8.129) arteko adierazpenetan kalkulaturikoak lirateke.

$$F_1 = \frac{P_1 + P_4}{2} \cdot 2 = \frac{57,8 + 48,1}{2} \cdot 2 = 105,9 \text{ kN/m} \quad (8.127)$$

$$F_2 = \frac{P_1 + P_3}{2} \cdot 17,5 = \frac{57,8 + 35,3}{2} \cdot 17,5 = 814,6 \text{ kN/m} \quad (8.128)$$

$$F_U = P_U \cdot \frac{B}{2} = 34,3 \cdot \frac{19,60}{2} = 336,1 \text{ kN/m} \quad (8.129)$$

ARIKETAREN EBAZPENA (e). Labaindurarekiko segurtasun-koefizientea kalkulatzeko, kaxen pisua eta uraren bulkada zehaztu behar ditugu lehenik, bien arteko diferentzia lurrean izango dugun indar normala izango baita. Pisua (8.130) adierazpenean jaso da, eta bulkada (8.132) adierazpenean. Pisua kalkulatzeko goan izan kaxak hormigoizkoak direla eta betegarriz bete, eta enuntziatuak ematen duela bakoitzak osotasunean duen proportzioa.

$$W_{kaxa} = V \cdot \gamma_{kaxa} = V \cdot (\rho_{HA} \cdot 0,25 + \rho_{betegarrria} \cdot 0,75) \cdot g \quad (8.130)$$

$$= (19,6 \cdot 19,5) \cdot (2350 \cdot 0,25 + 1900 \cdot 0,75) \cdot 9,81$$

$$= 7545631 \text{ N/m} = 7545,6 \text{ kN/m} \quad (8.131)$$

$$E = V_{urpean} \cdot \rho_w \cdot g \quad (8.132)$$

$$= ((19,5 - 2) \cdot 19,6) \cdot 1025 \cdot 9,81$$

$$= 3322770 \text{ N/m} = 3322,7 \text{ kN/m}$$

Indar normala zehaztuta, $W - E$ izango da, indar horizontal egonkortzaileen eta ezegonkortzaileen arteko erlazioa zehaztu besterik ez dugu. Orekatzailea pisua izango da, azpipresioa ere kontuan hartuta, eta ezegonkortzailea olatuak eragindako presio-legearena. Erlazio hori da LSK, (8.133) adierazpenean jaso. Koefiziente horren arabera, kaxa egonkorra litzateke.

$$LSK = \frac{\mu \cdot (W_{kaxa} - E - F_U)}{\sum F_{Hi}} \quad (8.133)$$

$$= \frac{0,6 \cdot (7545,6 - 3322,7 - 336,1)}{105,9 + 814,6} = 2,53 > 1,4 \quad \checkmark$$

ARIKETAREN EBAZPENA (f). ISK zehazteko momentu egonkortzaileen eta ezegonkortzaileen arteko oreka aztertuko dugu, (8.134) adierazpenean bezala. Momentu egonkortzailea indar normala litzateke, pisua eta bulkada kontuan dituen. Aldiz, indar ezegonkortzaileak lirarteke azpipresioa eta olatu-indarrak. Dikea egonkorra litzateke iraulketarekiko ere.

$$\begin{aligned}
 ISK &= \frac{M_{egonkortzailea}}{M_{ezegonkortzailea}} = \frac{N \cdot B/2}{M_{ezegonkortzailea}} & (8.134) \\
 &= \frac{(7545,6 - 3322,7) \cdot \frac{19,6}{2}}{14\,045} = \frac{41\,384}{14\,045} = 2,95 \quad \checkmark
 \end{aligned}$$

Iraulketarekiko koefizientea ez bagenu kalkulatu enuntziatuak dioen moduan, baikik eta aurreko ariketetan egin dugun modura (hots, azpipresioa ez bagenu momentu ezegonkortzaile bezala baliatu baikik eta momentu egonkortzailea murrizten duena bezala, LSK koefizientearekin egin dugun modura), segurtasun-koefizientea handiagoa izango litzateke. Kalkulatu ez dugun arren, azpipresioaren momentuak 4387 kN · m/m balio du, eta, ondorioz, ISK 3,8 litzateke, kalkulatu dugun hori baino handiagoa. Ondorioz, ariketa honetan erabili dugun irizpidea segurtasunaren aldekoa litzateke.

ARIKETAREN EBAZPENA (g). Bi segurtasun-koefizienteak egokiak zirela jakinik, pentsa daiteke hutsegitea oinarrian egon zitekeela. Matxuraren arrazoa puntzonaketa edo higadura izan zitekeen, adibidez.

ARIKETAREN EBAZPENA (h). Dike-gainditzea aztertzeko, (8.135) adierazpena baliatuko dugu. Adierazpen horretan ezagunak direnez dikearen ezaugarriak, baita frankobordoa ere, gainditze-emia zehaztu dezakegu. Esan bezala, frankobordoa itsas maila eta gainaren arteko kota-diferentzia da, hots, 2 m. Aldiz, eranskineko E.17 nomograma baliatuko dugu b zehazteko: dike iragazgaitza da, olatu-babesik gabea. Hala, gainditze-emia (8.138) adierazpenekoa litzateke. Eranskineko E.18 nomogramaren arabera, emari oso arriskutsua dela ondoriozta dezakegu.

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{F}{H_s}\right) \quad (8.135)$$

$$q = \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot 0,2 \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{F}{H_s}\right) \quad (8.136)$$

$$= \sqrt{9,81 \cdot 4,5^3} \cdot 0,2 \cdot \exp\left(-4,3 \cdot \frac{2}{4,5}\right) \quad (8.137)$$

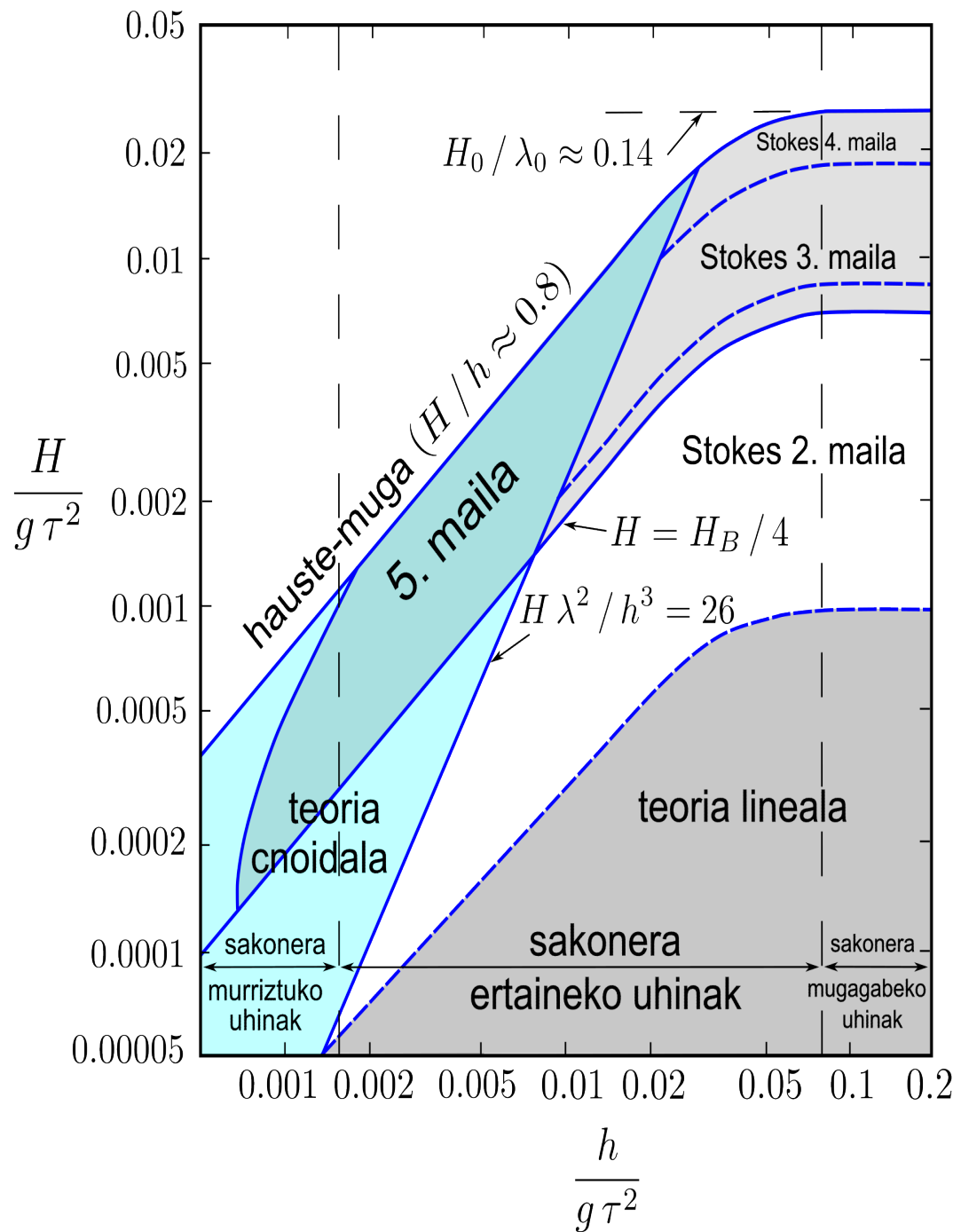
$$= 0,885 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) = 885 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}) \quad (8.138)$$

Eranskina: taulak eta nomogramak

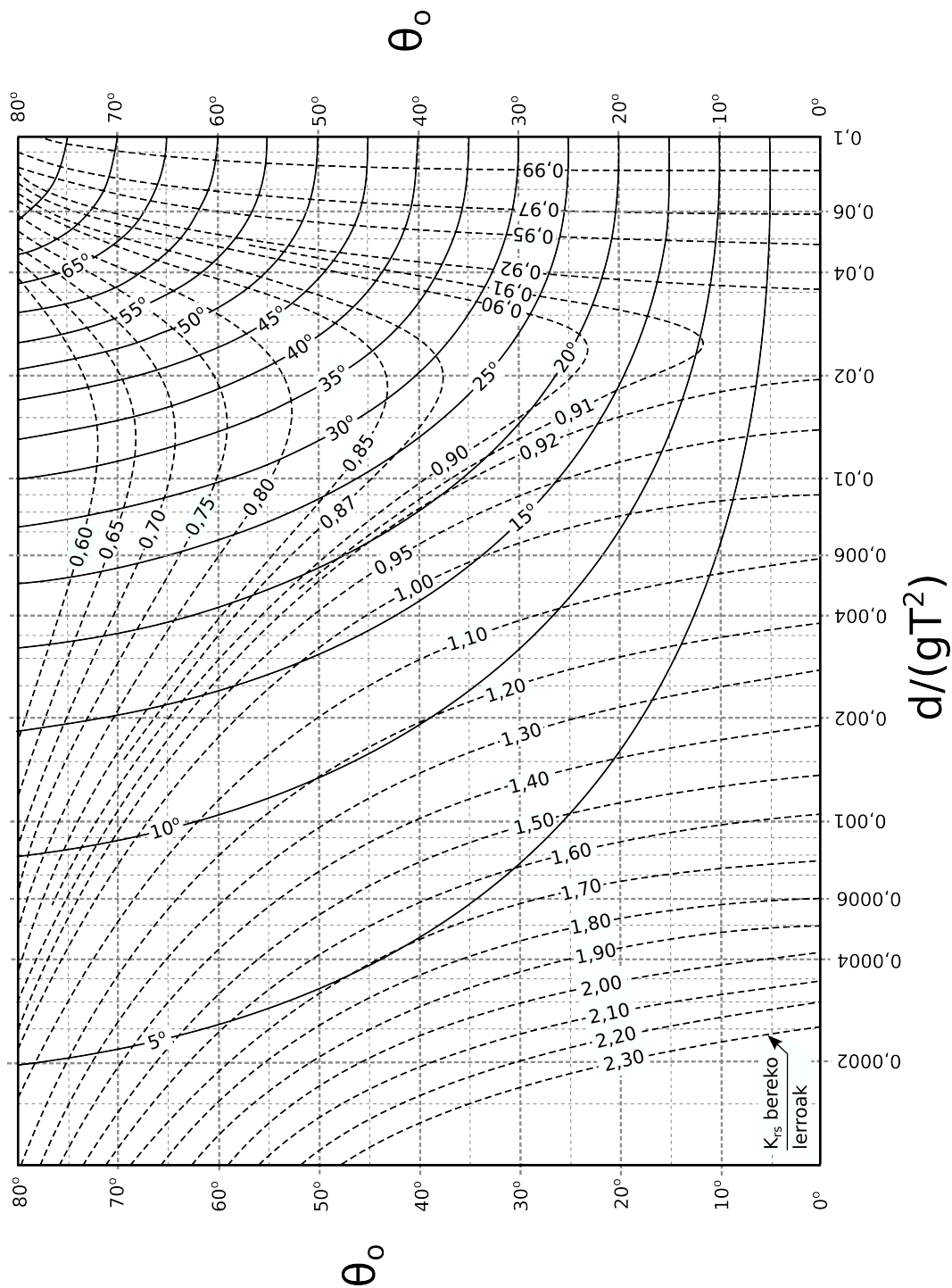
Atal honetan, ariketen ebazpenean erabiltzen diren hainbat taula eta nomograma jaso dira. Honako hau da horien zerrenda:

- E.1 irudia.** Uhin-teorien baliagarritasun eremuak adierazten dituen nomograma (Le Méhauté, 1976).
- E.2 irudia.** Uhinaren noranzkoaren eta altueraren aldaketa batimetria-lerro zuzenak eta paraleloak dauden eremuan, errefrakzioaren eta *shoaling*aren eragina kontuan harturik (CERC, 1984).
- E.3 irudia.** Hauste-altuera indizearen (H_b/H'_o) eta sakonera mugagabeko maldaren (H'_o/gT^2) arteko erlazioa (Goda, 1970).
- E.4 irudia.** Hauste-sakonera adimentsionalaren (d_b/H_b) eta hauste-maldaren (H_b/gT^2) arteko erlazioa (Weggel, 1972).
- E.5 irudia:** d_b/H_b balioen goi- eta behe-mugen, α eta β , eta hauste-maldaren (H_b/gT^2) arteko erlazioa (CERC, 1984).
- E.6 irudia.** Diseinuko hauste-sakonera adimentsionalaren (H_b/d_s) eta egiturako sakonera erlatiboaren (d_s/gT^2) arteko erlazioa (CERC, 1984).
- E.7 taula.** d/L eta H/H'_o aldagaien balioak teoria linealean, d/L_o balioaren arabera (CERC, 1984).
- E.8 taula.** Dike erdi-infinituarentzako difrakzio-koefizientea, $K_d \cdot 10^{-2}$, uhinaren eraso-angeluaren (α), uhin-luzeraren (L), eta portu barruko puntuaren angeluaren (β) eta distantziaren (r) arabera (Wiegel, 1962).
- E.9 taula.** Olatu-altuera esanguratsuen arteko erlazioak, Rayleigh banaketa funtziotik eratorriak (Goda, 2010).
- E.10 taula.** N uhin dituen itsas egoera bateko olatu-altuera maximoaren batezbestekoa ($\bar{H}_{max,N}$) eta H_s zein H_{rms} aldagaien arteko erlazioak (Goda, 2010).

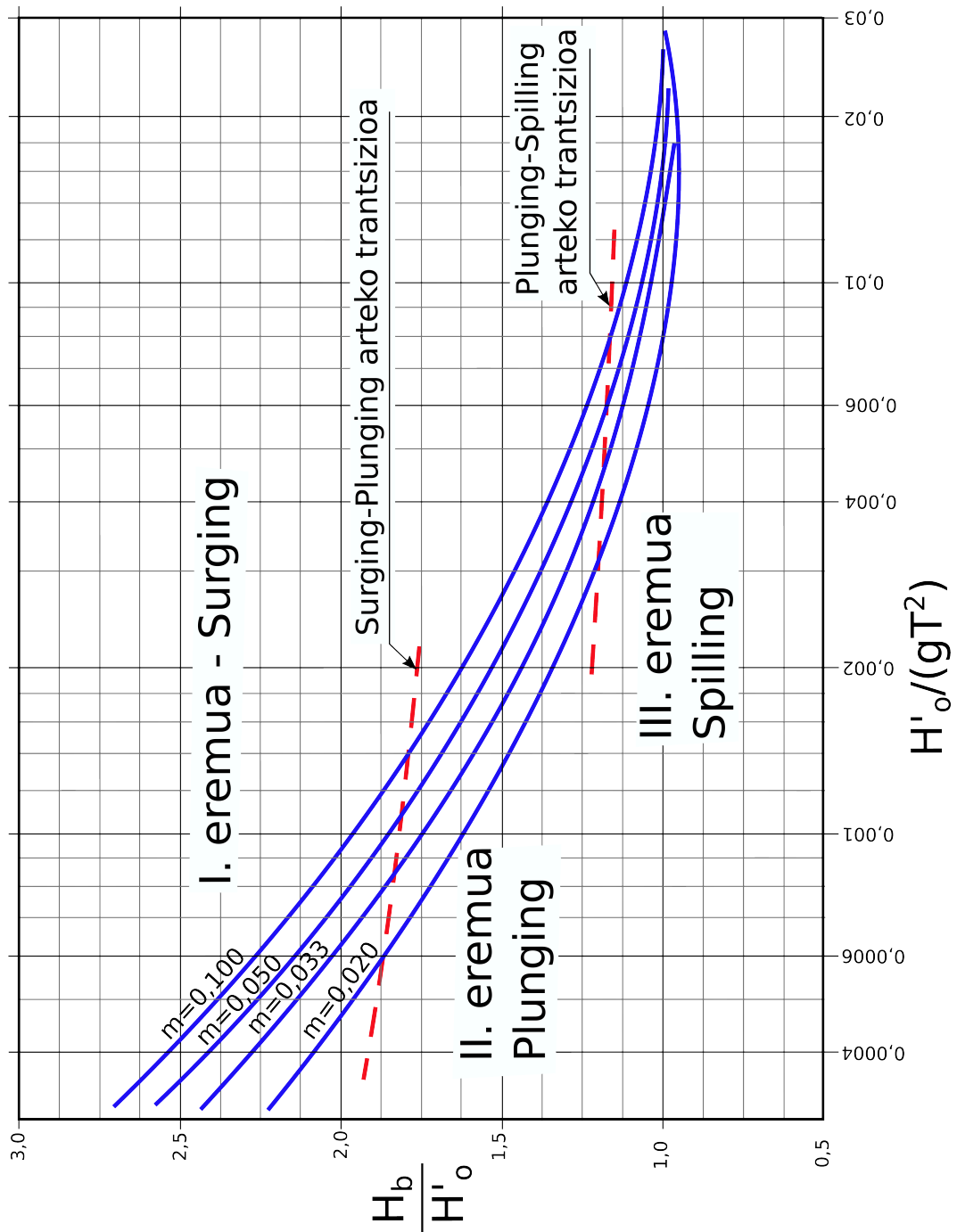
- E.11 taula.** Iribarren formulako N koefizienteen balioak. Eraso elkarzuta; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-gorputza; matxura-hasiera zein suntsipena; goranzko oreka zein beheranzkoa (Negro eta Varela, 2002).
- E.12 taula.** Iribarren formulako N koefizienteen balioak. Eraso zeharra; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-gorputza; matxura-hasiera zein suntsipena; goranzko oreka zein beheranzkoa (Negro eta Varela, 2002).
- E.13 taula.** Iribarren formulako N koefizienteen balioak. Eraso elkarzuta zein zeharra; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-muturra; matxura-hasiera zein suntsipena; goranzko oreka zein beheranzkoa (Negro eta Varela, 2002).
- E.14 taula.** Gomendaturiko K_D balioak mantuko piezen pisua zehazteko (CERC, 1984).
- E.15 taula.** Egonkortasun-funtzioaren (Ψ) balio maximoa bloke paralelepipedikoentzat (Losada eta Desiré, 1985).
- E.16 taula.** Harri-lubeta batean igotzea edo run-up (R_u) zein beheratzea edo run-down (R_d) zehazteko koefizienteak, pieza motaren arabera (Losada eta Giménez-Curto, 1979).
- E.17 taula.** Dike bertikalen gainditzea zehazten duen b aldagaiaren balioa (Franco et al., 1994).
- E.18 irudia.** Batez besteko gainditze-emarien mugako balioak (Besley, 1999).



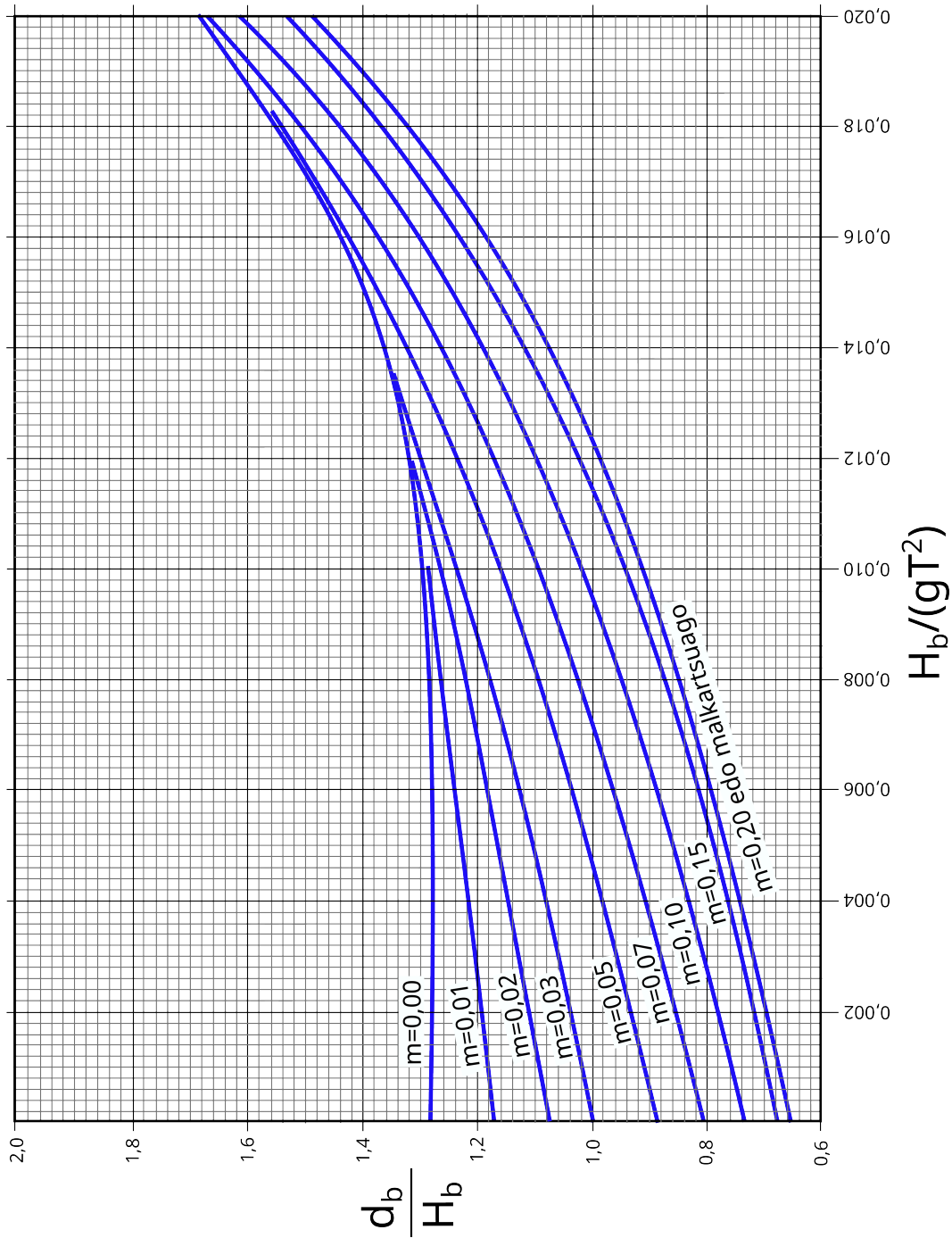
E.1 irudia. Uhin-teorien baliagarritasun-eremuak adierazten dituen nomograma (Le Méhauté, 1976).



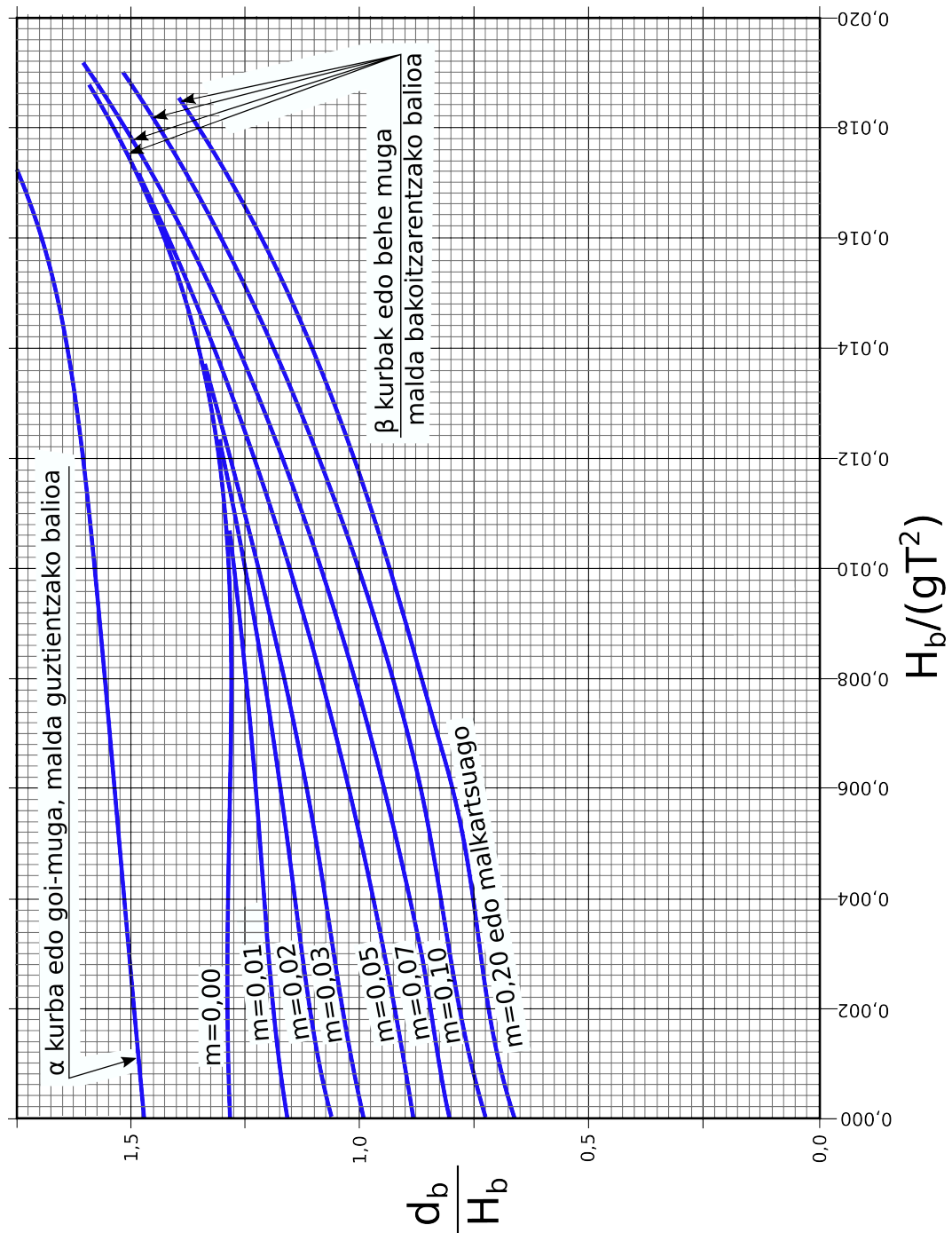
E.2 irudia. Uhinen noranzkoaren eta altueraren aldaketa batimetria-lerro zuzenak eta paraleloak dauden eremuan, errefrakzioaren eta *shoaling*aren eragina kontuan harturik (CERC, 1984).



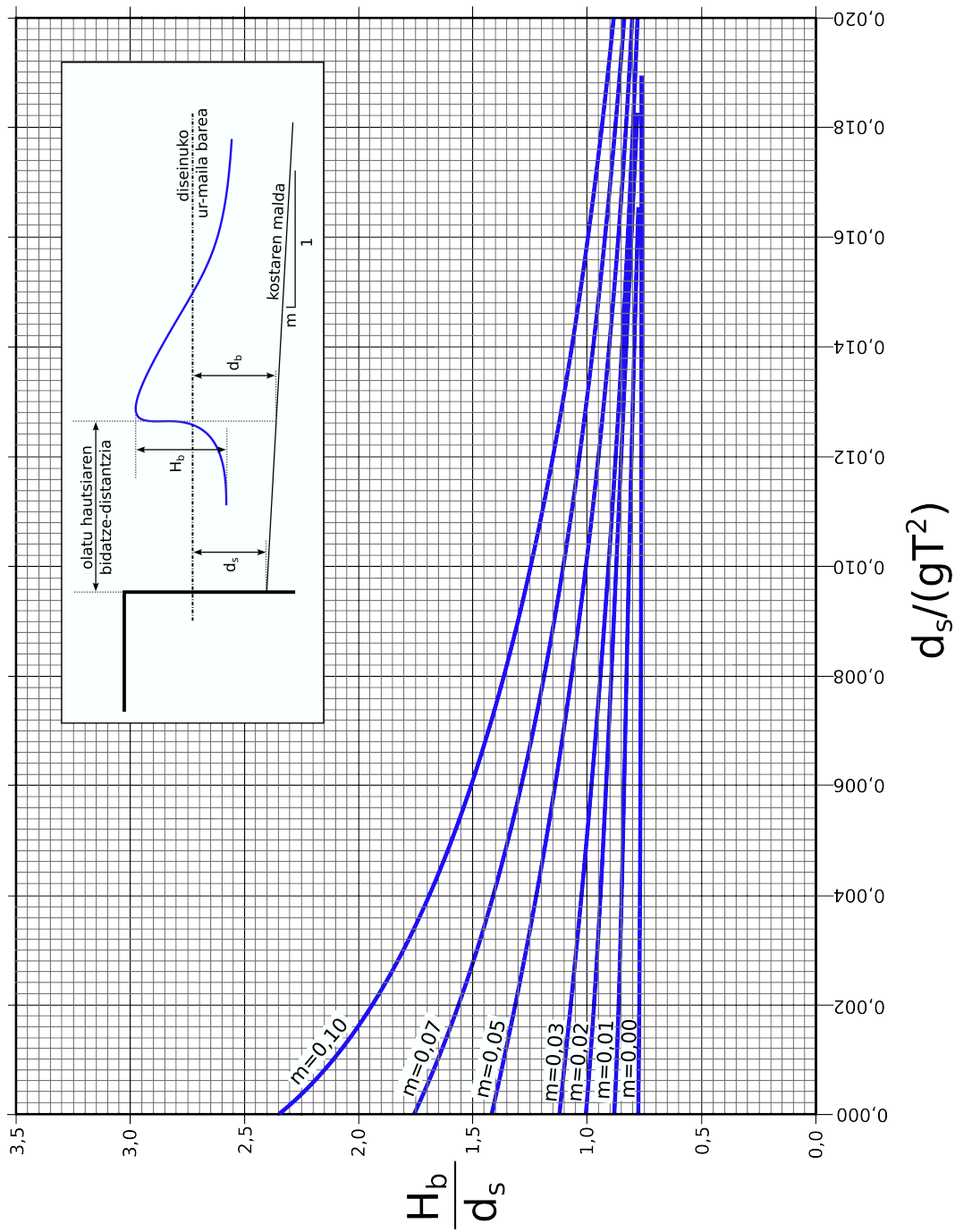
E.3 irudia. Hauste-altuera indizearen (H_b/H'_o) eta sakonera mugagabeko maldaren (H'_o/gT^2) arteko erlazioa (Goda, 1970).



E.4 irudia. Hauste-sakonera adimentsionalaren (d_b/H_b) eta hauste-maldaren (H_b/gT^2) arteko erlazioa (Weggel, 1972).



E.5 irudia. d_b/H_b balioen goi- eta behe-mugen, α eta β , eta hauste-maldaren (H_b/gT^2) arteko erlazioa (CERC, 1984).



E.6 irudia. Diseinuko hauste-sakonera adimentsionalaren (H_b/d_s) eta egiturako sakonera erlatiboaren (d_s/gT^2) arteko erlazioa (CERC, 1984).

E.7 taula. d/L eta H/H'_o aldagaien balioak teoria linealean, d/L_o balioaren araberaren (CERC, 1984).

d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o
0	0	∞	0,0040	0,025 34	1,787	0,0080	0,035 98	1,512
0,0001	0,003 990	4,467	0,0041	0,025 66	1,776	0,0081	0,036 21	1,508
0,0002	0,005 643	3,757	0,0042	0,025 97	1,766	0,0082	0,036 44	1,503
0,0003	0,006 912	3,395	0,0043	0,026 28	1,756	0,0083	0,036 66	1,499
0,0004	0,007 982	3,160	0,0044	0,026 59	1,746	0,0084	0,036 89	1,495
0,0005	0,008 925	2,989	0,0045	0,026 89	1,737	0,0085	0,037 11	1,491
0,0006	0,009 778	2,856	0,0046	0,027 19	1,727	0,0086	0,037 33	1,487
0,0007	0,010 56	2,749	0,0047	0,027 49	1,718	0,0087	0,037 55	1,483
0,0008	0,011 29	2,659	0,0048	0,027 78	1,710	0,0088	0,037 77	1,479
0,0009	0,011 98	2,582	0,0049	0,028 07	1,701	0,0089	0,037 99	1,475
0,0010	0,012 63	2,515	0,0050	0,028 36	1,693	0,0090	0,038 21	1,471
0,0011	0,013 25	2,456	0,0051	0,028 64	1,685	0,0091	0,038 42	1,467
0,0012	0,013 84	2,404	0,0052	0,028 93	1,677	0,0092	0,038 64	1,463
0,0013	0,014 40	2,357	0,0053	0,029 21	1,669	0,0093	0,038 85	1,459
0,0014	0,014 95	2,314	0,0054	0,029 48	1,662	0,0094	0,039 06	1,456
0,0015	0,015 48	2,274	0,0055	0,029 76	1,654	0,0095	0,039 28	1,452
0,0016	0,015 98	2,239	0,0056	0,030 03	1,647	0,0096	0,039 49	1,449
0,0017	0,016 48	2,205	0,0057	0,030 30	1,640	0,0097	0,039 70	1,445
0,0018	0,016 96	2,174	0,0058	0,030 57	1,633	0,0098	0,039 90	1,442
0,0019	0,017 43	2,145	0,0059	0,030 83	1,627	0,0099	0,040 11	1,438
0,0020	0,017 88	2,119	0,0060	0,031 10	1,620	0,0100	0,040 32	1,435
0,0021	0,018 32	2,093	0,0061	0,031 36	1,614	0,0110	0,042 33	1,403
0,0022	0,019 76	2,017	0,0062	0,031 62	1,607	0,0120	0,044 26	1,375
0,0023	0,019 18	2,047	0,0063	0,031 88	1,601	0,0130	0,046 12	1,350
0,0024	0,019 59	2,026	0,0064	0,032 13	1,595	0,0140	0,047 91	1,327
0,0025	0,020 00	2,005	0,0065	0,032 38	1,589	0,0150	0,049 64	1,307
0,0026	0,020 40	1,986	0,0066	0,032 64	1,583	0,0160	0,051 32	1,288
0,0027	0,020 79	1,968	0,0067	0,032 89	1,578	0,0170	0,052 96	1,271
0,0028	0,021 17	1,950	0,0068	0,033 13	1,572	0,0180	0,054 55	1,255
0,0029	0,021 55	1,933	0,0069	0,033 38	1,567	0,0190	0,056 11	1,240
0,0030	0,021 92	1,917	0,0070	0,033 62	1,561	0,0200	0,057 63	1,226
0,0031	0,022 28	1,902	0,0071	0,033 87	1,556	0,0210	0,059 12	1,213
0,0032	0,022 64	1,887	0,0072	0,034 11	1,551	0,0220	0,060 57	1,201
0,0033	0,023 00	1,873	0,0073	0,034 35	1,546	0,0230	0,062 00	1,189
0,0034	0,023 35	1,859	0,0074	0,034 59	1,541	0,0240	0,063 40	1,179
0,0035	0,023 69	1,846	0,0075	0,034 82	1,536	0,0250	0,064 78	1,169
0,0036	0,024 03	1,834	0,0076	0,035 06	1,531	0,0260	0,066 13	1,159
0,0037	0,024 36	1,821	0,0077	0,035 29	1,526	0,0270	0,067 47	1,150
0,0038	0,024 69	1,810	0,0078	0,035 52	1,522	0,0280	0,068 78	1,141
0,0039	0,025 02	1,798	0,0079	0,035 76	1,517	0,0290	0,070 07	1,133

d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o
0,030	0,071 35	1,125	0,070	0,1139	0,9713	0,110	0,1496	0,9257
0,031	0,072 60	1,118	0,071	0,1149	0,9694	0,111	0,1505	0,9250
0,032	0,073 85	1,111	0,072	0,1158	0,9676	0,112	0,1513	0,9245
0,033	0,075 07	1,104	0,073	0,1168	0,9657	0,113	0,1522	0,9239
0,034	0,076 30	1,098	0,074	0,1177	0,9641	0,114	0,1530	0,9234
0,035	0,077 48	1,092	0,075	0,1186	0,9624	0,115	0,1539	0,9228
0,036	0,078 67	1,086	0,076	0,1195	0,9609	0,116	0,1547	0,9224
0,037	0,079 84	1,080	0,077	0,1205	0,9592	0,117	0,1556	0,9218
0,038	0,081 00	1,075	0,078	0,1214	0,9576	0,118	0,1564	0,9214
0,039	0,082 15	1,069	0,079	0,1223	0,9562	0,119	0,1573	0,9209
0,040	0,083 29	1,064	0,080	0,1232	0,9547	0,120	0,1581	0,9205
0,041	0,084 42	1,059	0,081	0,1241	0,9533	0,121	0,1590	0,9200
0,042	0,085 55	1,055	0,082	0,1251	0,9518	0,122	0,1598	0,9197
0,043	0,086 64	1,050	0,083	0,1259	0,9507	0,123	0,1607	0,9192
0,044	0,087 74	1,046	0,084	0,1268	0,9494	0,124	0,1615	0,9189
0,045	0,088 83	1,042	0,085	0,1277	0,9481	0,125	0,1624	0,9185
0,046	0,089 91	1,038	0,086	0,1286	0,9468	0,126	0,1632	0,9181
0,047	0,090 98	1,034	0,087	0,1295	0,9456	0,127	0,1640	0,9178
0,048	0,092 05	1,030	0,088	0,1304	0,9445	0,128	0,1649	0,9175
0,049	0,093 11	1,026	0,089	0,1313	0,9433	0,129	0,1657	0,9172
0,050	0,094 16	1,023	0,090	0,1322	0,9422	0,130	0,1665	0,9169
0,051	0,095 20	1,019	0,091	0,1331	0,9411	0,131	0,1674	0,9166
0,052	0,096 23	1,016	0,092	0,1340	0,9401	0,132	0,1682	0,9163
0,053	0,097 26	1,013	0,093	0,1349	0,9390	0,133	0,1691	0,9161
0,054	0,098 29	1,010	0,094	0,1357	0,9381	0,134	0,1699	0,9158
0,055	0,099 30	1,007	0,095	0,1366	0,9371	0,135	0,1708	0,9156
0,056	0,1003	1,004	0,096	0,1375	0,9362	0,136	0,1716	0,9154
0,057	0,1013	1,001	0,097	0,1384	0,9353	0,137	0,1724	0,9151
0,058	0,1023	0,9985	0,098	0,1392	0,9345	0,138	0,1733	0,9149
0,059	0,1033	0,9958	0,099	0,1401	0,9336	0,139	0,1741	0,9147
0,060	0,1043	0,9932	0,100	0,1410	0,9327	0,140	0,1749	0,9146
0,061	0,1053	0,9907	0,101	0,1419	0,9319	0,141	0,1758	0,9144
0,062	0,1063	0,9882	0,102	0,1427	0,9312	0,142	0,1766	0,9142
0,063	0,1073	0,9858	0,103	0,1436	0,9304	0,143	0,1774	0,9141
0,064	0,1082	0,9837	0,104	0,1445	0,9296	0,144	0,1783	0,9140
0,065	0,1092	0,9814	0,105	0,1453	0,9289	0,145	0,1791	0,9138
0,066	0,1101	0,9794	0,106	0,1462	0,9282	0,146	0,1800	0,9137
0,067	0,1111	0,9772	0,107	0,1470	0,9276	0,147	0,1808	0,9136
0,068	0,1120	0,9753	0,108	0,1479	0,9269	0,148	0,1816	0,9135
0,069	0,1130	0,9732	0,109	0,1488	0,9262	0,149	0,1825	0,9134

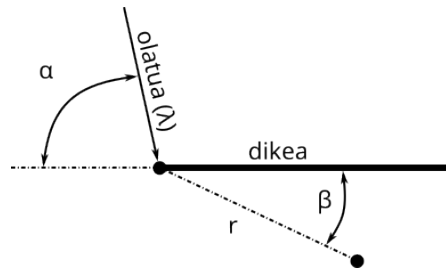
d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o
0,150	0,1833	0,9133	0,190	0,2167	0,9161	0,230	0,2506	0,9260
0,151	0,1841	0,9133	0,191	0,2176	0,9162	0,231	0,2515	0,9264
0,152	0,1850	0,9132	0,192	0,2184	0,9164	0,232	0,2523	0,9266
0,153	0,1858	0,9131	0,193	0,2192	0,9166	0,233	0,2532	0,9270
0,154	0,1866	0,9131	0,194	0,2201	0,9168	0,234	0,2540	0,9272
0,155	0,1875	0,9131	0,195	0,2209	0,9170	0,235	0,2549	0,9276
0,156	0,1883	0,9130	0,196	0,2218	0,9172	0,236	0,2558	0,9279
0,157	0,1891	0,9130	0,197	0,2226	0,9174	0,237	0,2566	0,9282
0,158	0,1900	0,9130	0,198	0,2234	0,9176	0,238	0,2575	0,9285
0,159	0,1908	0,9130	0,199	0,2243	0,9179	0,239	0,2584	0,9288
0,160	0,1917	0,9130	0,200	0,2251	0,9181	0,240	0,2592	0,9291
0,161	0,1925	0,9130	0,201	0,2260	0,9183	0,241	0,2601	0,9295
0,162	0,1933	0,9130	0,202	0,2268	0,9185	0,242	0,2610	0,9298
0,163	0,1941	0,9130	0,203	0,2277	0,9188	0,243	0,2618	0,9301
0,164	0,1950	0,9131	0,204	0,2285	0,9190	0,244	0,2627	0,9304
0,165	0,1958	0,9131	0,205	0,2293	0,9192	0,245	0,2635	0,9307
0,166	0,1966	0,9132	0,206	0,2302	0,9195	0,246	0,2644	0,9310
0,167	0,1975	0,9132	0,207	0,2310	0,9197	0,247	0,2653	0,9314
0,168	0,1983	0,9133	0,208	0,2319	0,9200	0,248	0,2661	0,9317
0,169	0,1992	0,9133	0,209	0,2328	0,9202	0,249	0,2670	0,9320
0,170	0,2000	0,9134	0,210	0,2336	0,9205	0,250	0,2679	0,9323
0,171	0,2008	0,9135	0,211	0,2344	0,9207	0,251	0,2687	0,9326
0,172	0,2017	0,9136	0,212	0,2353	0,9210	0,252	0,2696	0,9330
0,173	0,2025	0,9137	0,213	0,2361	0,9212	0,253	0,2705	0,9333
0,174	0,2033	0,9138	0,214	0,2370	0,9215	0,254	0,2714	0,9337
0,175	0,2042	0,9139	0,215	0,2378	0,9218	0,255	0,2722	0,9340
0,176	0,2050	0,9140	0,216	0,2387	0,9220	0,256	0,2731	0,9343
0,177	0,2058	0,9141	0,217	0,2395	0,9223	0,257	0,2740	0,9346
0,178	0,2066	0,9142	0,218	0,2404	0,9226	0,258	0,2749	0,9350
0,179	0,2075	0,9143	0,219	0,2412	0,9229	0,259	0,2757	0,9353
0,180	0,2083	0,9145	0,220	0,2421	0,9231	0,260	0,2766	0,9356
0,181	0,2092	0,9146	0,221	0,2429	0,9234	0,261	0,2775	0,9360
0,182	0,2100	0,9147	0,222	0,2438	0,9237	0,262	0,2784	0,9363
0,183	0,2108	0,9149	0,223	0,2446	0,9240	0,263	0,2792	0,9366
0,184	0,2117	0,9150	0,224	0,2455	0,9243	0,264	0,2801	0,9370
0,185	0,2125	0,9152	0,225	0,2463	0,9246	0,265	0,2810	0,9373
0,186	0,2134	0,9154	0,226	0,2472	0,9249	0,266	0,2819	0,9376
0,187	0,2142	0,9155	0,227	0,2481	0,9252	0,267	0,2827	0,9380
0,188	0,2150	0,9157	0,228	0,2489	0,9254	0,268	0,2836	0,9383
0,189	0,2159	0,9159	0,229	0,2498	0,9258	0,269	0,2845	0,9386

d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o
0,270	0,2854	0,9390	0,310	0,3211	0,9521	0,350	0,3579	0,9641
0,271	0,2863	0,9393	0,311	0,3220	0,9525	0,351	0,3588	0,9643
0,272	0,2872	0,9397	0,312	0,3230	0,9528	0,352	0,3598	0,9646
0,273	0,2880	0,9400	0,313	0,3239	0,9531	0,353	0,3607	0,9649
0,274	0,2889	0,9403	0,314	0,3248	0,9534	0,354	0,3616	0,9651
0,275	0,2898	0,9406	0,315	0,3257	0,9537	0,355	0,3625	0,9654
0,276	0,2907	0,9410	0,316	0,3266	0,9541	0,356	0,3635	0,9657
0,277	0,2916	0,9413	0,317	0,3275	0,9544	0,357	0,3644	0,9659
0,278	0,2924	0,9416	0,318	0,3284	0,9547	0,358	0,3653	0,9662
0,279	0,2933	0,9420	0,319	0,3294	0,9550	0,359	0,3663	0,9665
0,280	0,2942	0,9423	0,320	0,3302	0,9553	0,360	0,3672	0,9667
0,281	0,2951	0,9426	0,321	0,3311	0,9556	0,361	0,3682	0,9670
0,282	0,2960	0,9430	0,322	0,3321	0,9559	0,362	0,3691	0,9672
0,283	0,2969	0,9433	0,323	0,3330	0,9562	0,363	0,3700	0,9675
0,284	0,2978	0,9437	0,324	0,3339	0,9565	0,364	0,3709	0,9677
0,285	0,2987	0,9440	0,325	0,3349	0,9569	0,365	0,3719	0,9680
0,286	0,2996	0,9443	0,326	0,3357	0,9571	0,366	0,3728	0,9683
0,287	0,3005	0,9447	0,327	0,3367	0,9575	0,367	0,3737	0,9685
0,288	0,3014	0,9450	0,328	0,3376	0,9577	0,368	0,3747	0,9688
0,289	0,3022	0,9453	0,329	0,3385	0,9580	0,369	0,3756	0,9690
0,290	0,3031	0,9456	0,330	0,3394	0,9583	0,370	0,3766	0,9693
0,291	0,3040	0,9460	0,331	0,3403	0,9586	0,371	0,3775	0,9695
0,292	0,3049	0,9463	0,332	0,3413	0,9589	0,372	0,3785	0,9698
0,293	0,3058	0,9466	0,333	0,3422	0,9592	0,373	0,3794	0,9700
0,294	0,3067	0,9470	0,334	0,3431	0,9595	0,374	0,3804	0,9702
0,295	0,3076	0,9473	0,335	0,3440	0,9598	0,375	0,3813	0,9705
0,296	0,3085	0,9476	0,336	0,3449	0,9601	0,376	0,3822	0,9707
0,297	0,3094	0,9480	0,337	0,3459	0,9604	0,377	0,3832	0,9710
0,298	0,3103	0,9483	0,338	0,3468	0,9607	0,378	0,3841	0,9712
0,299	0,3112	0,9486	0,339	0,3477	0,9610	0,379	0,3850	0,9714
0,300	0,3121	0,9489	0,340	0,3486	0,9613	0,380	0,3860	0,9717
0,301	0,3130	0,9493	0,341	0,3495	0,9615	0,381	0,3869	0,9719
0,302	0,3139	0,9496	0,342	0,3504	0,9618	0,382	0,3879	0,9721
0,303	0,3148	0,9499	0,343	0,3514	0,9621	0,383	0,3888	0,9723
0,304	0,3157	0,9502	0,344	0,3523	0,9624	0,384	0,3898	0,9726
0,305	0,3166	0,9506	0,345	0,3532	0,9627	0,385	0,3907	0,9728
0,306	0,3175	0,9509	0,346	0,3540	0,9629	0,386	0,3917	0,9730
0,307	0,3184	0,9512	0,347	0,3551	0,9632	0,387	0,3926	0,9732
0,308	0,3193	0,9515	0,348	0,3560	0,9635	0,388	0,3936	0,9735
0,309	0,3202	0,9518	0,349	0,3570	0,9638	0,389	0,3945	0,9737

d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o	d/L_o	d/L	H/H'_o
0,390	0,3955	0,9739	0,430	0,4337	0,9816	0,470	0,4725	0,9873
0,391	0,3964	0,9741	0,431	0,4347	0,9818	0,471	0,4735	0,9874
0,392	0,3974	0,9744	0,432	0,4356	0,9819	0,472	0,4744	0,9875
0,393	0,3983	0,9746	0,433	0,4366	0,9821	0,473	0,4754	0,9876
0,394	0,3993	0,9748	0,434	0,4376	0,9822	0,474	0,4764	0,9878
0,395	0,4002	0,9750	0,435	0,4385	0,9824	0,475	0,4774	0,9879
0,396	0,4012	0,9752	0,436	0,4395	0,9826	0,476	0,4783	0,9880
0,397	0,4021	0,9754	0,437	0,4405	0,9827	0,477	0,4793	0,9881
0,398	0,4031	0,9756	0,438	0,4414	0,9829	0,478	0,4803	0,9882
0,399	0,4040	0,9758	0,439	0,4424	0,9830	0,479	0,4813	0,9883
0,400	0,4050	0,9760	0,440	0,4434	0,9832	0,480	0,4822	0,9884
0,401	0,4059	0,9762	0,441	0,4443	0,9833	0,481	0,4832	0,9886
0,402	0,4069	0,9764	0,442	0,4453	0,9835	0,482	0,4842	0,9887
0,403	0,4078	0,9766	0,443	0,4463	0,9836	0,483	0,4852	0,9888
0,404	0,4088	0,9768	0,444	0,4472	0,9838	0,484	0,4862	0,9889
0,405	0,4098	0,9771	0,445	0,4482	0,9839	0,485	0,4871	0,9890
0,406	0,4107	0,9772	0,446	0,4492	0,9841	0,486	0,4881	0,9891
0,407	0,4116	0,9774	0,447	0,4501	0,9842	0,487	0,4891	0,9892
0,408	0,4126	0,9776	0,448	0,4511	0,9844	0,488	0,4901	0,9893
0,409	0,4136	0,9778	0,449	0,4521	0,9845	0,489	0,4911	0,9894
0,410	0,4145	0,9780	0,450	0,4531	0,9847	0,490	0,4920	0,9895
0,411	0,4155	0,9782	0,451	0,4540	0,9848	0,491	0,4930	0,9896
0,412	0,4164	0,9784	0,452	0,4550	0,9850	0,492	0,4940	0,9897
0,413	0,4174	0,9786	0,453	0,4560	0,9851	0,493	0,4950	0,9898
0,414	0,4183	0,9788	0,454	0,4569	0,9852	0,494	0,4960	0,9899
0,415	0,4193	0,9790	0,455	0,4579	0,9854	0,495	0,4969	0,9900
0,416	0,4203	0,9791	0,456	0,4589	0,9855	0,496	0,4979	0,9901
0,417	0,4212	0,9793	0,457	0,4599	0,9856	0,497	0,4989	0,9902
0,418	0,4222	0,9795	0,458	0,4608	0,9858	0,498	0,4999	0,9903
0,419	0,4231	0,9797	0,459	0,4618	0,9859	0,499	0,5009	0,9904
0,420	0,4241	0,9799	0,460	0,4628	0,9860	0,500	0,5018	0,9905
0,421	0,4251	0,9801	0,461	0,4637	0,9862	0,501	0,5028	0,9906
0,422	0,4260	0,9802	0,462	0,4647	0,9863	0,502	0,5038	0,9907
0,423	0,4270	0,9804	0,463	0,4657	0,9864	0,503	0,5048	0,9908
0,424	0,4280	0,9806	0,464	0,4666	0,9865	0,504	0,5058	0,9909
0,425	0,4289	0,9807	0,465	0,4676	0,9867	0,505	0,5067	0,9909
0,426	0,4298	0,9809	0,466	0,4686	0,9868	0,506	0,5077	0,9910
0,427	0,4308	0,9811	0,467	0,4695	0,9869	0,507	0,5087	0,9911
0,428	0,4318	0,9813	0,468	0,4705	0,9870	0,508	0,5097	0,9912
0,429	0,4328	0,9814	0,469	0,4715	0,9872	0,509	0,5107	0,9913

E.8 taula. Dike erdi-infinituarentzako difrakzio-koefizientea, $K_d \cdot 10^{-2}$, uhinaren eraso-angeluaren (α), uhin-luzeraren (L), eta portu barruko puntuaren angeluaren (β) eta distantziaren (r) arabera (Wiegel, 1962).

α	r/λ	β											
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
15°	0,5	49	79	83	90	97	101	103	102	101	99	99	100
	1	38	73	83	95	104	104	99	98	101	101	100	100
	2	21	68	86	105	103	97	102	99	100	100	100	100
	5	13	63	99	104	103	102	99	99	100	101	100	100
	10	35	58	110	105	98	99	101	100	100	100	100	100
30°	0,5	61	63	68	76	87	97	103	105	103	101	99	95
	1	50	53	63	78	95	106	105	98	98	101	101	97
	2	40	44	59	84	107	103	96	102	98	101	99	95
	5	27	32	55	100	104	104	102	99	99	100	101	97
	10	20	24	54	112	106	97	99	101	100	100	100	98
45°	0,5	49	50	55	63	73	85	96	104	106	104	100	99
	1	38	40	47	59	76	95	107	106	98	97	101	101
	2	29	31	39	56	83	108	104	96	103	98	101	100
	5	18	20	29	54	101	104	105	103	100	99	101	100
	10	13	15	22	53	113	107	96	98	102	99	100	100
60°	0,5	40	41	45	52	60	72	85	113	104	106	103	101
	1	31	32	36	44	57	75	96	108	106	98	98	101
	2	22	23	28	37	55	83	108	104	96	103	98	101
	5	14	15	18	28	53	101	104	105	103	99	99	100
	10	10	11	13	21	52	114	107	96	98	101	100	100
75°	0,5	34	35	38	42	50	59	71	85	97	104	105	102
	1	25	26	29	34	43	56	75	95	102	106	98	98
	2	18	19	22	26	36	54	83	109	104	96	103	99
	5	12	12	13	17	27	52	101	104	105	103	99	99
	10	8	8	10	13	20	52	114	104	96	98	101	100
90°	0,5	31	31	33	36	41	49	59	71	85	96	103	103
	1	22	23	24	28	33	42	56	75	96	107	105	99
	2	16	16	18	20	26	35	54	69	108	104	96	102
	5	10	10	11	13	16	27	53	101	104	105	102	99
	10	7	7	8	9	13	20	52	114	107	96	99	101



α	r/λ	β											
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
105°	0,5	28	28	29	32	35	41	49	59	72	85	97	101
	1	20	20	21	23	27	33	42	56	75	95	106	104
	2	14	14	13	17	20	25	35	54	83	108	103	97
	5	9	9	10	11	13	17	27	52	102	104	104	102
	10	7	6	8	8	9	12	20	52	114	107	97	99
120°	0,5	25	26	27	28	31	35	41	50	60	73	87	97
	1	18	19	19	21	23	27	33	43	57	76	95	104
	2	13	13	14	14	17	20	26	36	55	83	107	103
	5	8	8	8	9	11	13	16	27	53	101	104	103
	10	6	6	6	7	7	9	13	20	52	113	106	98
135°	0,5	24	24	25	26	28	32	36	42	52	63	76	90
	1	18	17	18	19	21	23	28	34	44	59	78	95
	2	12	12	13	14	14	17	20	26	37	56	84	105
	5	8	7	8	8	9	11	13	17	28	54	100	104
	10	5	6	6	6	7	8	9	13	21	53	112	105
150°	0,5	23	23	24	25	27	29	33	38	45	55	68	83
	1	16	17	17	18	19	22	24	29	36	47	63	83
	2	12	12	12	13	14	15	18	22	28	39	59	86
	5	7	7	8	8	8	10	11	13	18	29	55	99
	10	5	5	5	6	6	7	8	10	13	22	54	110
165°	0,5	23	23	23	24	26	28	31	35	41	50	63	79
	1	16	16	17	17	19	20	23	26	32	40	53	73
	2	11	11	12	12	13	14	16	19	23	31	44	68
	5	7	7	7	7	8	9	10	12	15	20	32	63
	10	5	5	5	6	6	6	7	8	11	11	21	58
180°	0,5	20	25	23	24	25	28	31	34	40	49	61	78
	1	10	17	16	18	18	23	22	25	31	38	50	70
	2	2	9	12	12	13	18	16	18	22	29	40	60
	5	2	6	7	7	7	7	8	10	12	14	18	27
	10	1	5	5	4	4	6	7	7	8	10	13	20

E.9 taula. Olatu-altuera esanguratsuen arteko erlazioak, Rayleigh banaketa funtziotik eratorriak (Goda, 2010).

N	$\frac{H_{1/N}}{\bar{H}}$	$\frac{H_{1/N}}{H_{rms}}$	Oharrak
500	3,023	2,680	-
100	2,662	2,359	-
50	2,490	2,206	-
20	2,241	1,986	-
10	2,031	1,800	Olatuen %10 handienak
5	1,796	1,591	-
3	1,597	1,416	Olatu adierazgarria (H_s)
2	1,417	1,256	-
1	1	0,886	Batez besteko olatua (\bar{H})

H_{rms} : uhin-altuera koadratikoa.

\bar{H} : batez besteko uhin-altuera.

$H_{1/N}$: 1/N uhin altuenen batez besteko altuera.

E.10 taula. N uhin dituen itsas egoera bateko olatu-altuera maximoaren batezbestekoa ($\overline{H}_{max,N}$) eta H_s zein H_{rms} aldagaien arteko erlazioak (Goda, 2010).

N	$\frac{\overline{H}_{max,N}}{H_{rms}}$	$\frac{\overline{H}_{max,N}}{H_s}$
100	2,280	1,611
200	2,427	1,751
500	2,609	1,843
1000	2,738	1,934
2000	2,862	2,022
3000	2,932	2,071
4000	2,980	2,105
5000	3,017	2,131
10 000	3,130	2,211

N : olatu kopurua.

H_{rms} : uhin-altuera koadratikoa.

H_s : uhin-altuera adierazgarria.

$\overline{H}_{max,N}$: N uhin dituen itsas egoera bateko olatu-altuera maximoaren batezbestekoa.

$$\frac{\overline{H}_{max,N}}{H_{rms}} \approx \sqrt{\ln N} + \frac{0,57722}{2} \cdot (\ln N)^{-1/2}$$

$$\frac{\overline{H}_{max,N}}{H_s} \approx 0,706 \cdot \left[\sqrt{\ln N} + \frac{0,5772}{2 \cdot \sqrt{\ln N}} \right]$$

E.11 taula. Iribarren formulako N koefizienteen balioak. Eraso elkarzuta; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-gorputza; matxura-hasiera zein suntsipena; goranzko oreka zein beheranzkoa (Negro eta Varela, 2002).

EGONKORTASUNA DIKE-GORPUTZEAN					
OLATUEN ERASO ELKARZUTA					
Pieza mota	Matxura mota	Kalteak $N_{\%}$	Oreka beherantz	$\cot \alpha_c$	Oreka gorantz
Harriak	Matxura-hasiera	%0	0,430	3,64	0,849
	Erabateko suntsipena	%100	0,105	3,64	0,207
Blokeak	Matxura-hasiera	%0	0,430	2,80	0,918
	Erabateko suntsipena	%100	0,105	2,80	0,224
Tetrapodoak	Matxura-hasiera	%0	0,656	1,77	1,743
	Erabateko suntsipena	%100	0,157	1,77	0,425

E.12 taula. Iribarren formulako N koefizienteen balioak. Eraso zeharria; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-gorputza; matxura-hasiera zein suntsipena; gorantzko oreka zein beherantzkoa (Negro eta Varela, 2002).

EGONKORTASUNA DIKE-GORPUTZEAN					
OLATUEN ERASO ZEIHARRA					
Pieza mota	Matxura mota	Kalteak $N_{\%}$	Oreka beherantz	$\cot \alpha_c$	Oreka gorantz
Harriak	Matxura-hasiera	%0	0,438	2,00	1,515
	Erabateko suntsipena	%100	0,146	2,00	0,505
Blokeak	Matxura-hasiera	%0	0,452	2,00	1,474
	Erabateko suntsipena	%100	0,174	2,00	0,567
Tetrapodoak	Matxura-hasiera	%0	1,014	1,50	3,572
	Erabateko suntsipena	%100	0,390	1,50	1,374

E.13 taula. Iribarren formulako N koefizienteen balioak, eraso elkarzuta eta zeharria; harriak, blokeak zein tetrapodoak; dike-muturra; matxura-hasiera zein suntsipena; goranzko oreka zein beheranzkoa (Negro eta Varela, 2002).

EGONKORTASUNA DIKE-MUTURREAN					
OLATUEN ERASO ELKARZUTA ETA ZEIHARRA					
Pieza mota	Matxura mota	Kalteak $N_{\%}$	Oreka beherantz	$\cot \alpha_c$	Oreka gorantz
Harriak	Matxura-hasiera	%0	0,386	1,50	2,184
	Erabateko suntsipena	%100	0,161	1,50	0,910
Blokeak	Matxura-hasiera	%0	0,468	1,50	2,171
	Erabateko suntsipena	%100	2,223	1,50	1,034
Tetrapodoak	Matxura-hasiera	%0	1,128	1,50	4,650
	Erabateko suntsipena	%100	0,564	1,50	0,325

E.14 taula. Gomendaturiko K_D balioak mantuko piezen pisua zehazteko (CERC, 1984).

KALTERIK GABEKO IRIZPIDEA ETA GAINDITZE ARINA							
Pieza mota	$n^{(1)}$	Jartzea	Gorpua		Muturra		Ezponda $\cot \theta$
			olatu-haustura				
			bai	ez	bai	ez	
Harrobi-harri borobildu leuna	2	ausaz	1,2	2,4	1,1	1,9	1,5-3,0 ⁽²⁾
	>3		1,6	3,2	1,4	2,3	
Harrobi-harri zimurra ertzekin	1 ⁽³⁾	ausaz	-	2,9	-	2,3	1,5-3,0 ⁽²⁾
	2		2,0	4,0	1,9	3,2	1,5
			1,6	2,8	2,0		
			1,3	2,3	3,0		
	>3	2,2	4,5	2,1	4,2	1,5-3,0 ⁽²⁾	
2	berezia ⁽⁴⁾	5,8	7,0	5,3	6,4	1,5-3,0 ⁽²⁾	
Paralepipedoak ⁽⁵⁾	2	berezia ⁽⁶⁾	7,0-20,0	8,5-24,0	-	-	-
Tetrapodoak eta kuadripodoak	2	ausaz	7,0	8,0	5,0	6,0	1,5
					4,5	5,5	2,0
					3,5	4,0	3,0
Tribarrak	2	ausaz	9,0	10,0	8,3	9,0	1,5
					7,8	8,5	2,0
					6,0	6,5	3,0
	1	uniformea	12,0	15,0	7,5	9,5	1,5-3,0 ⁽²⁾
Doloak	2	ausaz	15,8 ⁽⁷⁾	31,8 ⁽⁷⁾	8,0	16,0	2,0 ⁽⁸⁾
					7,0	14,0	3,0
Kuboak	2	ausaz	5,5	6,0	4,0	5,0	1,5-3,0
Kubo molda- tuak	2	ausaz	6,5	7,5	-	5,0	1,5-3,0 ⁽²⁾
Hexapodoak	2	ausaz	8,0	9,5	5,0	7,0	1,5-3,0 ⁽²⁾

(1): mantuaren lodiera osatzen duten pieza kopurua.

(2): ezponda mugatua datu gehigarririk lortu bitartean.

(3): ez da gomendagarria geruza bakarrekoa olatua hautsi-gabea denean.

(4): harriaren ardatz luzea ezponda-planoarekiko elkarzuta.

(5): harlauza luze formakoa, dimentsio luzea laburrena halako hiru inguru.

(6): $\cot \alpha$ 1,5 eta 5 arteko ezponda-balioetan aplikagarri.

(7): kalterik gabeko irizpideekin (< %5); halakorik nahi ez bada (< %2), %50 murriztu behar da K_D .

(8): doloekin ezponda $\cot \alpha$ 2,0 baino txikiagoa denean ereduarekin aztertu behar da.

E.15 taula. Egonkortasun-funtzioaren (Ψ) balio maximoa bloke paralelepipedikoentzat (Losada eta Desiré, 1985).

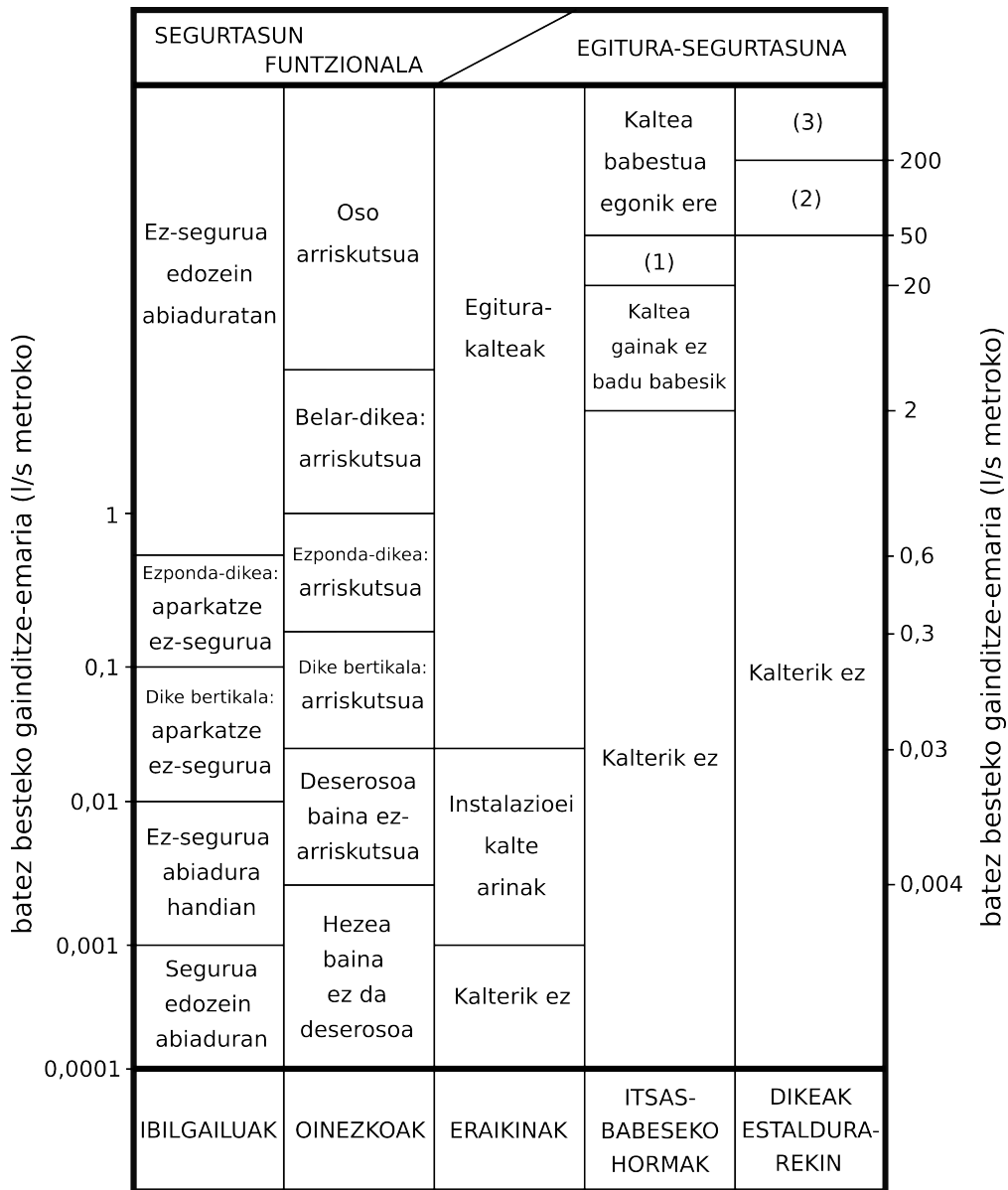
Bloke mota	a x a x a			a x a x 1,5a			a x a x 2a		
	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5
$\cot \alpha$	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5
Matxura-hasiera	0,060	0,047	0,043	--	--	0,084	0,120	--	0,116
Iribarren matxura	0,033	0,028	0,024	--	--	0,030	0,042	--	0,038
Suntsipena	0,027	0,022	0,018	--	--	0,021	0,035	--	0,027

E.16 taula. Harri-lubeta batean igotzea edo run-up (R_u) zein beheratzea edo run-down (R_d) zehazteko koefizienteak, pieza motaren arabera (Losada eta Giménez-Curto, 1979).

Pieza mota	A_u	B_u	A_d	B_d
Harri sailkatu gabea	1,80	-0,46	-1,10	0,30
Harri sailkatua	1,37	-0,60	-0,85	-0,43
Tetrapodoak	0,93	-0,75	-0,80	-0,45
Doloak	0,70	-0,82	-0,75	-0,49
Kuadripodoak	0,93	-0,75	-0,80	-0,45
Kuboak	1,05	-0,67	-0,72	-0,42

E.17 taula. Dike bertikalen gainditzea zehazten duen b aldagaiaren balioa (Franco et al., 1994).

Tipologia	b
Bertikal iragazgaitza, olatu-babesik gabe	4,30
Bertikal iragazgaitza, olatu-babesarekin	6,04
Bertikal iragazgaitza, olatu-babesik gabe, kokote atzeraemanarekin	4,65
Bertikal zulatua, olatu-babesik gabe	4,54
Bertikal zulatua, olatu-babesarekin	6,59
Bertikal iragazgaitza, olatu-babesik gabe, ezpondan babesarekin	4,26



- (1) Kalteak atzealdeko malda ez badago babestua.
- (2) Kalteak itsas pasealekuak ez badu zoladurarik.
- (3) Kalteak itsas pasealekuak zoladura badu ere.

E.18 irudia. Batez besteko gainditze-emarien mugako balioak (Franco et al., 1994).

Bibliografía

CERC, Coastal Engineering Research Center (1984). *Shore Protection Manual (SPM)*. United States Army, Corps of Engineers.

Franco, L., De Gerloni, M., & Van der Meer, J. W. (1994). *Wave overtopping on vertical and composite breakwaters*. In Coastal Engineering 1994 (1030-1045).

Goda, Y. (1970). *A Synthesis of Breaker Indices*. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 2.lib., 2. zatia, 227-230.

Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. World scientific.

Le Méhauté, B. (1976). *Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer-Verlag, New York.

Losada, M. A., & Gimenez-Curto, L. A. (1979). *The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number*. Coastal Engineering, 3. lib., 77-96.

Losada, M. A., & Desiré, J. M. (1985). *Random response of mound breakwaters under wave attack*. Proceedings of the Iceland Coastal and River Symposium, 357-367.

Negro Valdecantos, V., & Varela Carnero, O. (2002). *Diseño de diques rompeolas*. Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

OSM, OpenStreetMap contributors (2017). <https://planet.openstreetmap.org> webgunetik hartua. CC BY-SA 2.0

Weggel, J. R. (1972). *Maximum Breaker Height*. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 98. lib., No. WW4, 529-548.

Wiegel, R. L. (1962). *Diffraction of Waves by Semi-infinite Breakwater*, Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 88. lib., No. HY1, 27-44.

Unibertsitateko eskuliburuak
Manuales universitarios

ISBN: 978-84-9082-943-1

UPV/EHuko Argitalpen Zerbitzua
argitaletxea@ehu.eus • 94 601 2227
Biblioteka eraikuntza, 1. solairua
Sarriena auzoa z/g. Bizkaiko campusa
www.ehu.eus/argitalpenak

emeryta zahar. 2020

Universidad
del País Vasco Euskal Herriko
Unibertsitatea

Servicio Editorial de la UPV/EHU
editorial@ehu.eus • 94 601 2227
Edificio Biblioteca, 1ª planta
Bº Sarriena s/n. Campus de Bizkaia
www.ehu.eus/argitalpenak