

Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama merekeskkonna aspektide  
matemaatiline modelleerimine ja geotehniline kontroll

<b>Tellij:</b>	Skepast&Puhkim OÜ Laki 34, 12915 Tallinn Telefon +372 53 423 684 e-post: hendrik.puhkim@skpk.ee Hendrik Puhkim
<b>Projekteerija:</b>	OÜ CORSON Reg. Nr. 10006729 Laki 14a-704, 10621 Tallinn Tel. 670 1009 e-post: corson@corson.ee
<b>Ehitise aadress:</b>	S. Julaevi tee 4 esine mereala, Paldiski linn Töö nr.: 1721
<b>Köide /Köiteid:</b>	I/I
<b>Köite nimetus:</b>	Matemaatiline modelleerimine ja geotehniline kontroll. Seletuskiri ja joonised
<b>Versioon:</b>	1
<b>Köite koostaja:</b>	OÜ CORSON

## Sisukord

1. Lähteülesanne.....	4
1.1 Eesmärk .....	4
1.2 Lähtematerjalid .....	4
2. Olemasolev olukord .....	4
2.1 Lainetus ja hoovused Pakri lahes.....	4
2.2 Hoovuste üldine dünaamika .....	5
2.3 Veeseisud.....	6
2.4 Looduslik heljum .....	6
3. Matemaatiline modelleerimine .....	6
3.1 Tuuleandmed .....	6
3.2 Matemaatiline mudel MIKE21 .....	7
3.3 MIKE 21 NSW moodul .....	7
3.4 MIKE 21 HD moodul .....	7
3.5 MIKE 21 ST moodul .....	8
3.6 MIKE 21/ 3 Particle Analysis moodul.....	9
3.7 Seletusi graafikutel esitatud tulemuste kasutamiseks .....	9
4. Matemaatilise modelleerimise tulemused.....	10
4.1 Lainetuse väljad .....	10
4.1.1 Lainetuse väljad loodetuulega, olemasolev olukord .....	10
4.1.2 Lainetuse väljad loodetuulega, alternatiiv 1 .....	10
4.1.3 Lainetuse väljad loodetuulega, alternatiiv 2 .....	10
4.1.4 Lainetuse väljad loodetuulega, 50 aasta torm .....	11
4.2 Hoovuste väljad .....	11
4.2.1 Hoovuste väljad loodetuulega, olemasolev olukord .....	11
4.2.2 Hoovuste väljad loodetuulega, alternatiiv 1 .....	11
4.2.3 Hoovuste väljad loodetuulega, alternatiiv 2.....	11
4.2.4 Hoovuste väljad edelatuulega, olemasolev olukord.....	12
4.3 Settetransport .....	12
4.3.1 Settetransport loodetuulega, olemasolev olukord .....	12
4.3.2 Settetransport loodetuulega, alternatiiv 1.....	12

---

---

4.3.3 Settetransport loodetuulega, alternatiiv 2.....	12
4.4 Heljumi leviku modelleerimine .....	12
4.4.1 Heljumi levik loodetuulega.....	13
4.4.2 Heljumi levik edelatuulega .....	13
5. Tehissaare nõlva stabiilsus.....	13
6. Väljavoolutoru hüdrauliline arvutus .....	15
7. Kasutatud materjalid .....	17
8. Lisad.....	18

## 1. Lähteülesanne

### 1.1 Eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on hinnata Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama (edaspidi: PHAJ) lahendusvariante mere hüdrodünaamiliste protsesside seisukohalt merekeskkonna aspektide matemaatilise modelleerimise ja geotehnilise kontrolli kaudu.

Uuritavad lahendused baseeruvad Merin OÜ töö nr 784 „Paldiski pumphüdroakumulatsioonijaama veehaarde ja jaamaosa tehissaar“, milles on toodud jaama kaks alternatiivvarianti. Alternatiivi 1 puhul uuritakse kavandatud pealevoolukanali šahti (põhišahti) kohal asuva veehaarde tehissaare (tasapinnalise osa mõõtmetega 129 x 202 m) mõju rannaprotsessidele. Alternatiivi 2 puhul uuritakse ka laiendatud tehissaart, mille veehaarde osale on liidetud jaama maapealse teeninduskompleksi jaoks vajalik ala. Alternatiivi 2 korral on saare tasapinnaline osa mõõtmetega 150 x 400 m.

Töö käigus modelleeritakse mõlema alternatiivi mõju lainetusele, hoovustele ja settetranspordile PHAJ tehissaare ümbruses ning võrreldakse seda olemasoleva olukorraga.

Lisaks uuritakse täitetöödel tekkiva heljumi levikut.

Töö käigus on modelleeritud ka lainetus ekstreemaalse tormi korral. Modelleerimise eesmärk on anda sisend arvutustele, mille alusel määratakse tehissaare konstruktsioonidele mõjuvad jõud.

### 1.2 Lähtematerjalid

- Eesti Geoloogiakeskus 2017 töö Paldiski lahe pumphüdroakumulatsioonijaama veehaarderajatisse kuntsaare aluse geoloogiliste tingimuste uuring;
- Merin OÜ töö 784 Paldiski pumphüdroakumulatsioonijaama veehaarde ja jaamaosa tehissaar;
- Eesti veeteede atlase kaardimaterjal;
- Veeteede Ameti poolt edastatud hüdrograafilised mõõdistused.
- Riigi Ilmateenistuse poolt edastatud Pakri meteoroloogiajaama tuuleandmed

## 2. Olemasolev olukord

### 2.1 Lainetus ja hoovused Pakri lahes

Pakri laht on Läänemerega ühendatud lõuna poolt Kurkse väina kaudu ja põhjast on see otse avatud Soome lahe lääneossa. Kurkse väina madala sügavuse tõttu ei levi sealt erilist lainetust Pakri lahte, mistõttu on lainetuse kujunemisel määravaks Soome lahe lainetus ja sealt kaudu lahte puhuvad tuuled.

Paldiski Põhjasadamast loodesse jääv ala on seega suhteliselt hästi kaitstud lõuna- ja läänekaartest puhuvate tuulte tekitatud lainetuse eest. Laine jooksupikkus ehk vahemaa mille

---

jooksul saab lainetus vaba vee puhul areneda, on Pakri lahe sees suhteliselt väike. Uuritava ala jaoks piirab läänekaartest jooksupikkust Väike-Pakri saar. Selle tulemusel on läänesuunal laine jooksupikkuseks umbes kolm kilomeetrit. Lõunakaare tuulte puhul on Pakri lahel laine jooksupikkus maksimaalselt seitse kilomeetrit. Kuna sellest pea kolm kilomeetrit on madalatel aladel, ei saa ka sellest suunast suure amplituudiga lainetust tekkida. Ida- ja kirdetuultega Pakri lahes lainetust praktiliselt ei teki, kuna nende tuulte eest varjab lahte Pakri poolsaar.

Põhjatuulte eest kaitsevad kavandatava tehissaare ala osaliselt Pakri poolsaare põhjatipp ja rannik. Loodetuulte poolt genereeritud lainetus saab aga otse Pakri lahte siseneda. Sellelt suunalt on lainetuse tekkimiseks vajalikku vaba vett üle saja kilomeetri, mistõttu on see suund lainetuse hindamise seisukohalt kõige olulisem.

Eelnevate Pakri lahes läbi viidud uuringute alusel (Osaühing Corson töö 1204 „Paldiski Lõunasadama akvatooriumi ja sissesõidutee süvendustööde keskkonnamõju hindamise läbiviimine“) saab väita et edelatuuled genereerivad kavandatava PHAJ tehissaare lähistel lainetuse, mille kõrgus ei ületa ühte meetrit. Kuna lainetus ei suuda nii lühikese vahemaa jooksul korralikult välja kujuneda, on tekkiva lainetuse periood lühike ja see ei tekita märkimisväärselt heljumit. Lisaks kaitseb lõunakaarest PHAJ hüdrotehnilisi ehitisi ka Paldiski Põhjasadama muul.

Põhja- ja loodetuulte mõjul jõuavad kavandatava PHAJ alale oluliselt suuremad lained. Eelnevad uuringud on näidanud, et tugevate, pikka aega kestvate tormidega võib lainekõrgus Pakri lahe suudmes ulatuda kuni kaheksa meetrini.

Pakri lahe hoovuste skeem on tugevalt mõjutatud tuulest. Põhjakaare, sh kirdetuule korral liigub hoovus piki Pakri poolsaare ja Väike-Pakri rannikut lahte sisse ning lahe keskosa ja Kurkse väina kaudu lahest välja.

Lääne- ja lõunakaare tuulte korral liigub hoovus Kurkse väinast sisse ja lahe põhjaosast välja.

## 2.2 Hoovuste üldine dünaamika

Järgnev lõik põhineb TTÜ Meresüsteemide instituudi poolt koostatud Paldiski Lõunasadamasse kai 6a rajamise keskkonnamõtjude hindamise aruandest.

Pakri lahe hoovuste skeem on tugevalt mõjutatud tuulest. Soome lahe lõunaranniku lähedane tsirkulatsioon mõjutab Pakri lahe hoovusi lahe põhjaosas. Piki Soome lahe telge puhuv tuul põhjustab aktiivset veevahetust mere pindmiste ja sügavamate kihtide vahel. See soodustab veevahetust ka Pakri lahes. Idatuulte korral toimub vee väljavoolamine Pakri lahe pinnakihis ja sissevoolamine põhjalähedases kihis. Läänetuulte korral on olukord vastupidine. Madalveelises Pakri lahe lõunaosas ning rannikulähedases tsoonis on hoovused mõjutatud peamiselt lokaalsest tuulest. Pakri lahes on kõige tugevamad hoovused madalas Kurkse väinas. Lääne-, edela- ja lõunatuulega on hoovus suunatud Kurkse väinast Pakri lahte, kusjuures kõige tugevamad hoovused on tekitatud läänetuulega. Kagu-, ida-, kirde- ja põhjatuule poolt tekitatud hoovused on Kurkse väinas läänesuunalised. Loode-, lääne-, edela- ja lõunatuulega formeerub lahe lõunaosas kellaosuti liikumise suunale vastupidine osaliselt

suletud hoovus. Kagu-, ida-, kirde- ja põhjatuule poolt tekitatud hoovus on vastupidise pöörlemisega.

Kokkuvõtlikult on valdav vee liikumise suund tehissaare alal asuval rannanõlval suunatud piki kallast lahte sisse. Keskmine kiirus sisse voolava veemassi puhul on 5–10 cm/s. Valdav veemassi suund lahe keskosas on suunatud loodesse lahest välja. Kuna veesügavused on lahe keskosas tunduvalt suuremad, siis vee liikumise kiirus on tunduvalt väiksem kui rannalähedases tsoonis. Keskmine voolamise kiirus on 2–5 cm/s.

### 2.3 Veeseisud

Meretaseme muutlikkus Pakri lahes ja kogu Eesti rannikul sõltub veevahetusest läbi Taani väinade ja tuule suunast. Tugeva, ühest suunast puhuva tuule korral võib veetaseme tõusta väga kiiresti, kuid samas tuule raugedes toimub sama kiiresti ka veeseisu alanemine. Läänekaare tuuled tõstavad veeseisu Pakri lahes, idakaare tuuled viivad merevee taseme allapoole keskmist.

Pikaajaliste vaatluste alusel saab väita, et maksimaalne veeseis Pakri lahes jääb vahemikku +130 cm ja –100 cm piires. Veetaseme kõikumise ööpäevased amplituudid on suuremad sügisel ja kevadel ning väiksemad suvel. Järsumad veetaseme tõusud ja langused leiavad aset sügisel ja talvel, suvised ja kevadised veetõusud on vähem äkilised, taandudes samuti ajas kiiremini.

### 2.4 Looduslik heljum

Loodusliku heljumi kontsentratsiooni foon Pakri lahes jääb vahemikku 4-5 mg/l, kusjuures tormide korral on maksimaalne looduslik foon vahemikus 1-10 mg/l. Loodusliku heljumi ruumiline jaotus on seotud hüdrodünaamiliste protsessidega lahes. Hoovused ja lainetus tõstavad Pakri lahe madalamas osas lahe päras ja Kurkse väinas üles setted, mis jäävad vees heljumisse ja muudavad merevee häguseks. Kagutuulte mõjul võib see heljum kanduda kogu lahele ja tõsta heljumi kontsentratsiooni kuni 10 milligrammini liitris.

## 3. Matemaatiline modelleerimine

### 3.1 Tuuleandmed

Modelleerimise aluseks olevad tuuleandmed pärinevad Pakri meteoroloogiajaamast. Hinnangu aluseks on mõõtejaama andmed vahemikust 1966-1991 ja 2004-2014. Esimeste mõõtmistulemuste alusel on võimalik määrata pikaajalist tuulte käitumist, teise järgi saab hinnata kuivõrd on muutunud tuulte iseloom seoses kliima muutumisega.

Vastavalt Ilmateenistuse andmetele on Pakri poolsaarel loodest puhuvaid tuuli umbes 11% kõikidest aasta jooksul puhuvatest tuultest. Üle 15 m/s puhuvaid tuuli loodesuunalt on aastas orienteeruvalt 0,2% kõikidest tuultest. Alla 5 m/s puhuvaid tuuli on loodesuunalt 4,5%. Seega valdav osa loodetuultest on tuulekiiruste vahemikus 5 – 15 m/s. Kuna modelleerimise

---

eesmärk on uurida halvimat võimalikku olukorda, kasutatakse lainetuse, hoovuste ja settetranspordi modelleerimisel tuulekiirust 15 m/s.

Sama tuulekiirus on sobiv ka ehitusaegse heljumi leviku modelleerimiseks, kuna üldjuhul peatavad ehitusettevõtted turvalisuse tagamiseks tööd merel kui tuulekiirus ületab 15 m/s.

### **3.2 Matemaatiline mudel MIKE21**

Matemaatiline mudel MIKE 21 on loodud Taani Hüdraulika Instituudis ja on ette nähtud mitmesuguste hüdrodünaamiliste probleemide lahendamiseks. Mudel koosneb moodulitest, mille kasutamine erineb ja on sõltuvuses lahendatava ülesande iseloomust. Vaadeldava ülesande jaoks kasutati nelja moodulit, mille kirjeldused esitatakse allpool.

### **3.3 MIKE 21 NSW moodul**

MIKE 21 moodulit NSW kasutatakse kaldajoonega piirnevatel aladel laineväljade arvutamiseks. Laineväljade määramisel on tähtsad järgmised lainete parameetrid: laine kõrgus, laine periood ja lainete liikumise suund, ehk suurused mis kõik on vajalikud lainetusest rannajoonel tekkivate jõudude määramisel.

Matemaatiline mudel MIKE 21 NSW võtab arvesse vee sügavuse vähenemisest tingitud veepinna taseme muutuse ja refraktsiooni, kohaliku valitsevate tuule olukorda ja energia dissipatsiooni, mis on tingitud mere põhjal tekkivatest hõõrdejõududest ning lainete murdumisest. Mudel arvestab ka lainetuse ning hoovuste vastastikust koosmõju. MIKE 21 NSW on statsionaarne, suuna mõju arvestav parameetiline mudel. Selleks, et arvestada hoovuste mõjuga on mudeli põhivõrrandite koostamisel lähtutud laine spektraaltiheduse jäävuse võrrandist. Selle jäävuse võrrandi parameetriseerimisel sageduse järel on muutujatena lisatud nullinda ja esimest järku spektri momendid. MIKE 21 NSW

Põhivõrrandid lahendatakse kasutades Euleri lõplike vahede meetodit. Nullinda ja esimese järgu spektri momendid arvutatakse täisnurkses arvutusvõrgus kasutades selleks diskreetseid laine levikusuundi. Mudel kasutab põhilises laine leviku suunas iga võrgu punkti piiritingimusena eelmise võrgu punkti arvutustulemusi.

Mudeli väljund annab põhiliste arvutustulemustena järgmised integraalsed laine parameetrid: oluline lainekõrgus, keskmise laine perioodi, keskmise laine leviku suuna, suuna standardhälbe ja radiaalpinged.

### **3.4 MIKE 21 HD moodul**

MIKE 21 moodul HD on kahemõõtmeline vabapinnaga voolamise mudeli süsteem. MIKE HD 21 abil on võimalik hinnata hüdraulilisi ja keskkonna mõjusid arvestavaid probleeme järvedes, jõgede suudmealadel, rannaaladel ja meredes. Programmi võib rakendada kõikjal, kus stratifikatsioonist võib loobuda.

MIKE HD 21 mudelil on lai rakendusala hüdraulikas ja sellega kaasnevate probleemide lahendamisel:

- Tormiga kaasnev veepinna tõus;

- Hoovuste teke;
- Soojus ja retsirkulatsioon;
- Vee kvaliteet.

Hüdrodünaamiline moodul HD on MIKE 21 mudeli põhimoodul. See mudel moodustab hüdrodünaamilise baasi selleks, et kasutada keskkonna mõjusid arvestavat moodulit.

Hüdrodünaamiline moodul simuleerib veepinna muutusi ja voolamist järvedes, jõe suudmealadel ja rannajoone lähedal meres sõltuvalt erinevatest voolamist tekitavatest jõududest. Üldmainitud jõudude hulka kuuluvad:

- Hõõrdepinge põhjal;
- Tuulest tekkinud hõõrdepinge vabapinnal;
- Baromeetriline rõhugradient;
- Coriolise jõud;
- Liikumishulga dispersioon;
- Alale lisanduvad sisse- ja väljavoolud mudeliga haaratud alalt;
- Aurustumine;
- Üleujutus ja kuivendus;
- Lainetuse radiaalpinged.

### **3.5 MIKE 21 ST moodul**

MIKE 21 ST moodul on üks osa MIKE 21 matemaatilise modelleerimise süsteemist, mis võimaldab arvutada mitte kohesiivse uhtaine (liiva) transpordi hulka mis tekib kas ainult hoovuste või ka lainetuse ja hoovuste koosmõju tagajärjel. Lisaks sellele võimaldab MIKE 21 ST määrata ajas keskendatud põhja kõrgusmärkide muutumist kasutaja poolt defineeritud ajavahemiku jooksul.

Mooduli kasutamise eelduseks on see, et eelnevalt MIKE 21 HD lahend oleks sisestatud lähteandmetena. Juhul kui soovitakse lainetuse ja hoovuste koosmõjul tekkivat uhtaine transpordi arvutusi, siis peavad olema sisestatud ka lainevälja parameetrid kasutades MIKE 21 NSW mooduli arvutustulemusi.

MIKE 21 ST kasutusala on lai ja haarab kõiki kahemõõtmelise uhtaine transpordiga seotud probleeme:

- litoraalsed uhtaine transpordi küsimused;
  - uhtumisi rannajoonele püstitatud ehitiste ümbruses;
  - jõgede suudmealadel;
  - kombineeritud mõjurite juhtudel, kus esinevad tuule poolt genereeritud
  - lainetus, hoovused ning tõusu-mõõna nähtus.
-



---

### 3.6 MIKE 21/ 3 Particle Analysis moodul

MIKE 21 PA moodulit kasutatakse vees lahustunud ja suspensioonis oleva heljumi leviku modelleerimiseks. PA moodul on suuteline modelleerima suspensiooni voolamist järvedes, jõgedes, rannajoonel ja avameres..

PA moodulit kasutatakse koos vedelikuga suspensioonis olevate osakeste leviku modelleerimiseks arvestades sellega kaasnevaid dispersiooniprotsesse.

Mõlemad moodulid arvestavad osakeste juhusliku liikumise võimalust ja neis jälgitakse osakeste ansamblite liikumist, mis võimaldab loobuda Euleri adveksiooni-difusiooni võrrandi lahendamisest.

Osakesed liiguvad mõlemal juhul advektiivse hoovuse ja turbulentsete pulsatsioonide tulemusena. Advektiivsed kiirused määratakse tavaliselt hüdrodünaamiliste arvutustega (MIKE 21 HD), samal ajal kui turbulentsi mõju kontrollivad dispersiooni koefitsiendid. Mudel kirjeldab osakeste käitumist läbi settimiskiiruse, mis on kas konstantne või määratakse pinnaseosakeste suuruse jaotuse kaudu. Võimaldab arvutada ka mitte uppivate (veest kergema erikaaluga) osakeste liikumist.

Osakeste pilve mass võib praktiliselt muutuda sõltuvalt settimisest ja resuspensioonist. Lisaks sellele võib esineda lineaarne lagunemisprotsess..

Mudel arvutab välja kontsentratsiooni välja arvestades osakeste arvu igas võrgupunktis. Seejuures määrab arvutusvõrgu tihedus arvutuse välja täpsuse.

### 3.7 Seletusi graafikutel esitatud tulemuste kasutamiseks

Numbrilise lahendamise tulemustena on saadud graafikud, millel on esitatud uuritavate suuruste - olulise lainekõrguse  $H_{mo}$ , hoovuse kiiruse ja settetranspordi väljasid. Siinkohal on vajalik arvestada, et graafikutel esitatud kvalitatiivsed arvnäidud esinevad ainult lähteandmetena sisestatud arvutusliku tuule korral, kui tormi poolt põhjustatud hüdrodünaamiline situatsioon on välja arenenud. See eeldab seda, et tuul on puhunud ühest suunast sõltuvalt laine jooksupikkusest 3-9 tunni jooksul. Töö lõpus graafilise materjalina esitatud joonistel on kujutatud uuritavate suuruste samajooned, vektoritena on näidatud uuritava suuruse liikumissuund ja vektori pikkus on võrdeline uuritava suuruse arvvaärtusena. Lisaks on eri värvidega tähistatud uuritava suuruse väärtus, mille kohta legend on esitatud joonise serval asuval skaalal.

Oluline lainekõrgus  $H_{mo}$  kujutab endast üle keskmise kolmandiku võrra kõrgemate lainete kõrgust. Seega „rusikareegli” kohaselt on üksiklaine kõrguse leidmiseks vajalik oluline lainekõrgus  $H_{mo}$  korrutada 1,7-ga.

---

## **4. Matemaatilise modelleerimise tulemused.**

### **4.1 Lainetuse väljad**

Olulise lainekõrguse leidmiseks tehti esmalt arvutus, mille käigus leiti lainete väärtused arvutusmudeli piiril. Selleks sisestati mudelisse kogu Läänemere põhjaosa alates Botnia mere äärsest Rootsi rannikust ja Soome saarestikust. Arvutuse tulemusel leiti lainete parameetrid ( $H_{m0}$ , periood ja keskmine lainesuund) Pakri lahe esisele merealal. Kogu Läänemerd katva arvutusvõrgu samm oli 30x90 meetrit. Saadud tulemusest tuletati piiritingimused Pakri lahe lainemudelile (mudeli arvutusvõrgu samm 3x3 meetrit), millega arvutati lainetuse parameetrid PHAJ tehissaare ümbruses.

#### **4.1.1 Lainetuse väljad loodetuulega, olemasolev olukord**

Joonisel 1 on toodud tulemused, mis kirjeldavad lainevälju olemasoleva olukorraga Pakri lahes kavandatava PHAJ tehissaare piirkonnas 15 m/s puhuva loodetuule korral. Tuul genereerib kavandatava tehissaare alal olulise lainekõrguse kuni 2,0 m. Põhjasadama akvatooriumi esisel olev veealune seljandik murrab lainet ja seal on oluline lainekõrgus 1,5 m ringis.

#### **4.1.2 Lainetuse väljad loodetuulega, alternatiiv 1**

Joonisel 2 on toodud tulemused, mis kirjeldavad lainevälju väiksema tehissaare lahenduse juures. Tehissaare mõju lainetusele on lokaalne. Kuna tehissaare küljed (nõlvad) on kavandatud rajada kaldpinnalistena, siis ei teki neist märkimisväärset laine tagasipeegeldumist. Seetõttu on lainetuse väärtused avamerel samad, kui olemasoleva olukorra puhul.

Tehissaare tuule poolt varjatud küljel vähenevad lainekõrgused märkimisväärselt. Olemasoleva rannajoone ja tehissaare vahele jääb ala, kus lainetus praktiliselt puudub, kuna tulenevalt merepõhja topograafiast keerab laine end kaldaga risti ja seetõttu ei pääse see tehissaare taha.

#### **4.1.3 Lainetuse väljad loodetuulega, alternatiiv 2**

Joonisel 3 on toodud tulemused, mis kirjeldavad lainevälju suurema tehissaare lahenduse juures. Üldised järeldused lainetuse kohta on samad kui alternatiivi 1 puhul. Samas tuleb märkida, et kuna alternatiivi 2 puhul on saare Põhjasadama poolsele küljele kavandatud kai laevade sildumiseks, siis sel alal võib esineda kuni 1,2 m kõrgust olulist lainetust. Tulenevalt olulise lainekõrguse ja üksiklaine omavahelisest suhtest võib seega üksiklaine kõrgus kai ääres ulatuda kuni 2 meetrini.

Projekteerimise järgmistes staadiumites võiks mõelda kai varjamiseks "nina" projekteerimisele.

---

#### 4.1.4 Lainetuse väljad loodetuulega, 50 aasta torm

Joonisel 4 on toodud tulemused, mis kirjeldavad lainevälju, suurema tehissaare lahenduse juures juhul, kui merel puhub tuul kiirusega 26 m/s. Kiiruse määramisel võeti aluseks, et loodesuunalt kulub lainetuse täielikuks väljakujunemiseks 6-8 tundi. Seega otsiti suurimat tuulekiirust, mis 50 aasta jooksul võib loodesuunalt puhuda 6 tundi järjest. Pakri meteoroloogiajaama tuulendmete statistilise analüüsi tulemusel on selliseks tuulekiiruseks 26 m/s. Järgmise 50 aasta jooksul võib esineda ka suuremaid tuulekiirusi, kuid nende ajaline kestvus ei ole piisav, et sellele tuulele vastav lainetus jõuaks välja areneda.

Arvutuse eesmärk on hinnata lainetust ekstreemsetes oludes ja seekaudu saada sisend edasisteks konstruktiivseteks arvutusteks.

Vastavalt arvutustele jõuab 50 aasta tormi korral tehissaare Väike – Pakri poolsel küljele laine, mille maksimaalne oluline lainekõrgus võib olla kuni 4,2 meetrit ja Põhjasadama poolsel küljel, kuhu on kavandatud võimalik laevade sildumise kai on  $H_{mo}=1,4$  meetrit.

#### 4.2 Hoovuste väljad

##### 4.2.1 Hoovuste väljad loodetuulega, olemasolev olukord

Loodetuule poolt tekitatud lained genereerivad Pakri poolsaare rannikul hoovuse, mis on liigub piki Pakri poolsaare rannikut lahe sisemuse poole. Paldiski põhjasadama muul on hoovuse teel ees ja seetõttu keerab hoovus muulini jõudes läände ja tekitab pöörise Põhjasadama esisel alal (Joonis 5). 15 m/s puhuva tuule korral on hoovuse kiirus kavandatava tehissaare alal asuvas madalas vees kuni 0,7 m/s.

##### 4.2.2 Hoovuste väljad loodetuulega, alternatiiv 1

Joonisel 6 on näha tehissaare mõju piki Pakri poolsaare rannikut liikuvale hoovusele. Saar asub täpselt hoovuse teel ja seetõttu lahknub piki randa liikuv veemass kaheks. Üks osa satub tehissaare ja ranniku vahele ja voolab sealtkaudu Põhjasadama muulini, kus see ühineb tehissaare läänekülge pidi liikuva veemassiga. Kuna hoovuse struktuur on enne Põhjasadama muulini jõudmist rikutud, siis ei keera hoovus ümber muuli ühtse joana, vaid laiemale frondina, mistõttu Põhjasadama akvatooriumi esine suur pööris jaguneb mitmeks väiksemaks.

Tehissaare serval võib 15 m/s puhuva tuule korral tekkida kiirus kuni 1 m/s.

##### 4.2.3 Hoovuste väljad loodetuulega, alternatiiv 2

Joonisel 7 on näha tehissaare mõju piki Pakri poolsaare rannikut liikuvale hoovusele suurema tehissaare lahenduse korral. Sarnaselt lainetusele ei mõjuta saare suurus oluliselt hüdrodünaamilist pilti Pakri lahes.

Erinevuseks on, et pikema tehissaare külje korral jõuab saare merepoolsel küljel välja areneda pööris, mis hajutab veemassi laiemale alale. Selle tulemusel ei ole ümber Põhjasadama nurga voolav hoovus nii tugev ja keerised Põhjasadama akvatooriumi lähistel on vähem intensiivsed.

---

#### 4.2.4 Hoovuste väljad edelatuulega, olemasolev olukord

Joonisel 13 on toodud hoovuste pilt kui tuul puhub edelast kiirusega 13 m/s. Edelatuuleba liigub veemass Pakri lahest välja. Kuna vahemaa lahe teise kalda ja uuritava ala vahel on lühike, siis hoovuse kiirused jäävad väikesteks. Maksimalne voolamise kiirus kavandatava tehissaare alal 15 m/s puhuva tuule korral on 0,2 m/s.

#### 4.3 Settetransport

Settetranspordi modelleerimisel on olulise tähtsusega merepõhja moodustava pinnase lõimiseline koosseis. Käesolevas töös on kasutatud Eesti Geoloogiakeskuse töös „Paldiski lahe pumphüdroakumulatsioonijaama veehaarderajalise kuntsaare aluse geoloogiliste tingimuste uuring“ toodud pinnase andmeid. Nende alusel on interpoleeritud setteaine levik merepõhjal.

Graafikute (jooniste) uurimisel peab arvestama, et tulemus on arvatatud olukorra jaoks, kui 15 m/s puhuv tuul on puhunud järjest ühest suunast 24 tundi. Lühema perioodi korral on settetranspordi väärtused väiksemad.

##### 4.3.1 Settetransport loodetuulega, olemasolev olukord

Joonisel 8 on näidatud olukord 15 m/s puhuva loodetuulega. Lainetuse ja hoovuste koosmõjul tekib rannanõlva uhtumine ja settimine. Rannalähedasel alal on voolamiskiirused niivõrd väikesed, et seal liiva liikumist ei toimu. Enamus erosioonist on kontsentreerunud järsule rannanõlvale. Rannanõlvast mere pool on sügavused suured ja hoovus ning lainetus ei mõjuta merepõhja.

##### 4.3.2 Settetransport loodetuulega, alternatiiv 1

Väiksem tehissaar (joonis 8) lõhub hoovuse struktuuri ja selle tõttu tekib saare põhjatipu juures väljasettimine. Samuti viib hoovus teatud koguse pinnast tehissaare ja ranna vahele. Ajapikku võib saare ja ranna vaheline kitsas veeriba täis settida.

##### 4.3.3 Settetransport loodetuulega, alternatiiv 2

Suurema tehissaare põhjatipp asub sügavamas vees, mistõttu hoovus ja settevoog jaotuvad ühtlasemalt mõlema saare külje vahel. Ajapikku settib ka suurema saare korral saare ja ranna vaheline kitsas veeriba täis. Kuna veemass, mis veab endaga setet kaasa, on selle alternatiivi korral suurem, siis väljasettimine toimub, nagu joonisel 8 näidatud, saare lõunatipu ja ranna vahel.

#### 4.4 Heljumi leviku modelleerimine

Heljum leviku arvutamisel on võetud arvesse kavandatud ehitustehnikat. Tehissaare ehitamine toimub kahes etapis. Esmalt rajatakse piki saare perimeetrit karjäärimurrust kehand, mille väliskülg kindlustatakse. Teises etapis täidetakse saare sisemine osa peenema täitematerjaliga (näiteks liivaga). Heljumi leviku seisukohalt ei oma teise etapi täitmistööd olulist rolli, kuna esimeses etapis rajatud kehand ümber perimeetri piirab setteaine levikut. Modelleerimine tehti

seega ainult kehandi rajamisel tekkiva heljumi määramiseks. Vastavalt kavandatavale rajatakse kehand sorteerimata karjäärimurrust, milles on kuni 500 mm kive. Peene fraktsiooni hulk merre uputatavas materjalis on alla 15 %.

#### 4.4.1 Heljumi levik loodetuulega

Joonisel 11 on toodud heljumi pilv juhul, kui tehissaare ehitamise käigus puistatakse merre täitepinnast. Arvutus on tehtud merel puhuva tuule 15 m/s puhul. Jooniselt nähtub, et vahetult tehissaare alal on pinnase uputamise ajal heljumi kontsentratsioon väga kõrge ja võib ulatuda kuni  $0,3 \text{ kg/m}^3$  ehk 300 mg/l. Samas settib enamus pinnases olevat heljumit mere põhja kohe tehissaare alal. Tänu Põhjasadama muuli poolt tekitatud takistusele on enamus heljumist muuli otsa juures välja settinud. Võttes aluseks eelneva arutelu heljumi loodusliku taseme kohta (punkt 2.4) saab väita, et 15 m/s puhuva tuule korral on Pakri lahe loodusliku heljumi tase umbes 5 mg/l ehk  $0,005 \text{ kg/m}^3$ . See tähendab, et ala kus täitetöödel tekkiva heljumi kontsentratsioon on kõrgem kui looduslik tase, jääb tehissaare ja Põhjasadama muuli vahelisele alale. Väiksema tuulekiiruse juures jääb heljumi levik väiksemaks.

#### 4.4.2 Heljumi levik edelatuulega

Joonisel 12 on toodud heljumi pilv juhul, kui 15 m/s puhuva edelatuulega puistatakse merre täitepinnast.

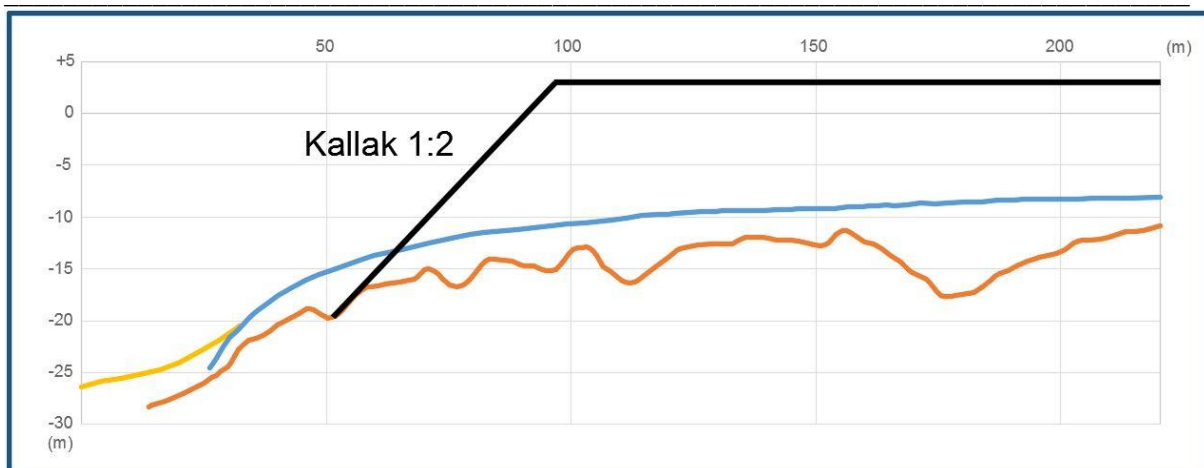
Tekkiva heljumipilve mõõt enne, kui selle kontsentratsioon läheb allapoole loodusliku taset, on 100 x 50 meetrit.

## 5. Tehissaare nõlva stabiilsus

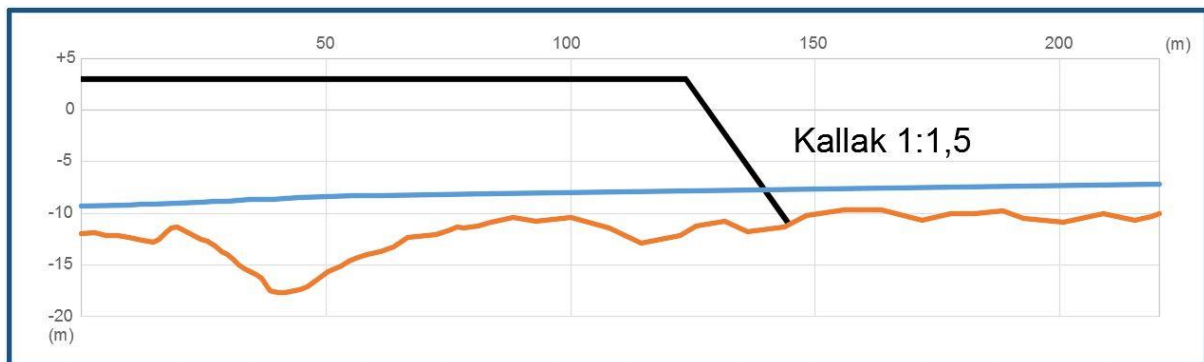
Tehissaare välimine külg on kavandatud nõlvusega 1:2. Nõlv toetatakse aluspõhja moodustavale lubjakivikihile. Saare pealispinna kasutuskooormuse leidmisel on lähtutud arvestusest, et saarel ladustatakse maksimaalselt 17 000 tonni kive. Maksimaalne ladustuskõrgus on 5 meetrit. Sellisel juhul on kivi vaalu all maksimaalne kasuskoormus  $75 \text{ kN/m}^2$ .

Geotehnilises arvutuses on lähtutud sellest, et kivivaalud asuvad saare servast vähemalt 10 meetri kaugusel ja kivivaalude nõlva varisemisnurk on 35 kraadi.

Stabiilsusarvutused tehti arvutusprogrammiga GEO 5. Arvutustes uuriti saare välimise nõlva erinevaid avariiskeeme. Kuna saare nõlv toetub aluspinnale, siis lihet lubjakivis ei teki. Kõige tõenäolisem avariiskeem on lihe nõlva moodustavas täitematerjali kihis. Vastavalt arvutustele, on stabiilsus tagatud piisava varuteguriga.



Joonis 1. Tehissaare välisnõlva paiknemine geoloogilisel ristlõikel. Oranž joon – liivakivi, sinine joon – liiv ja aleuriit, kollane joon – muda.

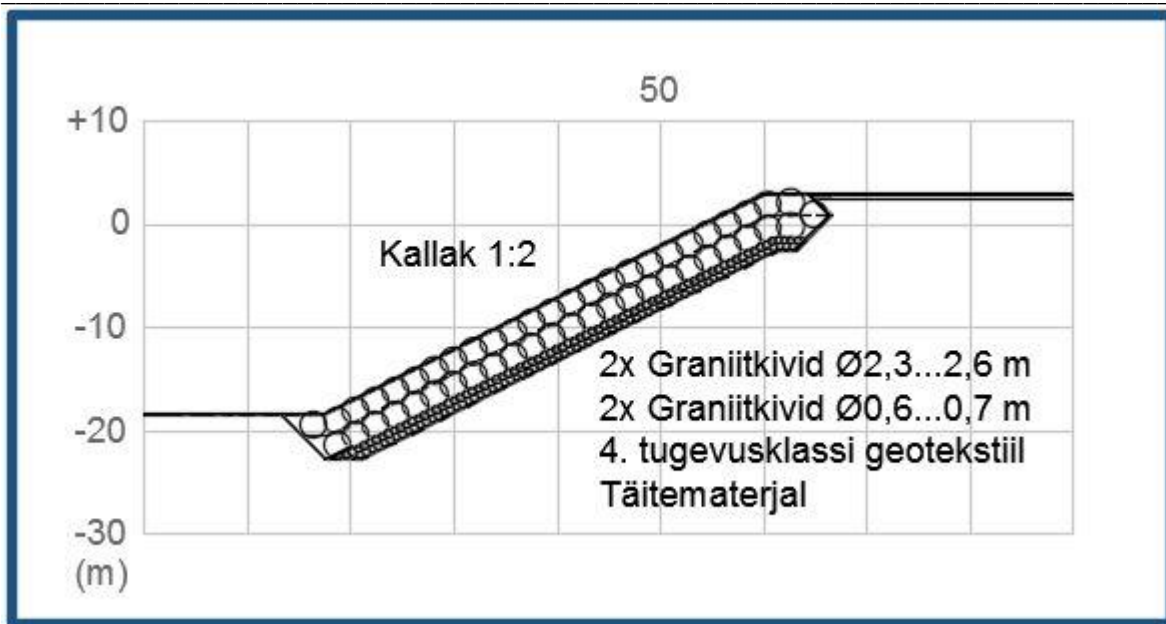


Joonis 2. Tehissaare rannapoolse nõlva paiknemine geoloogilisel ristlõikel. Oranž joon – liivakivi, sinine joon – liiv ja aleuriit

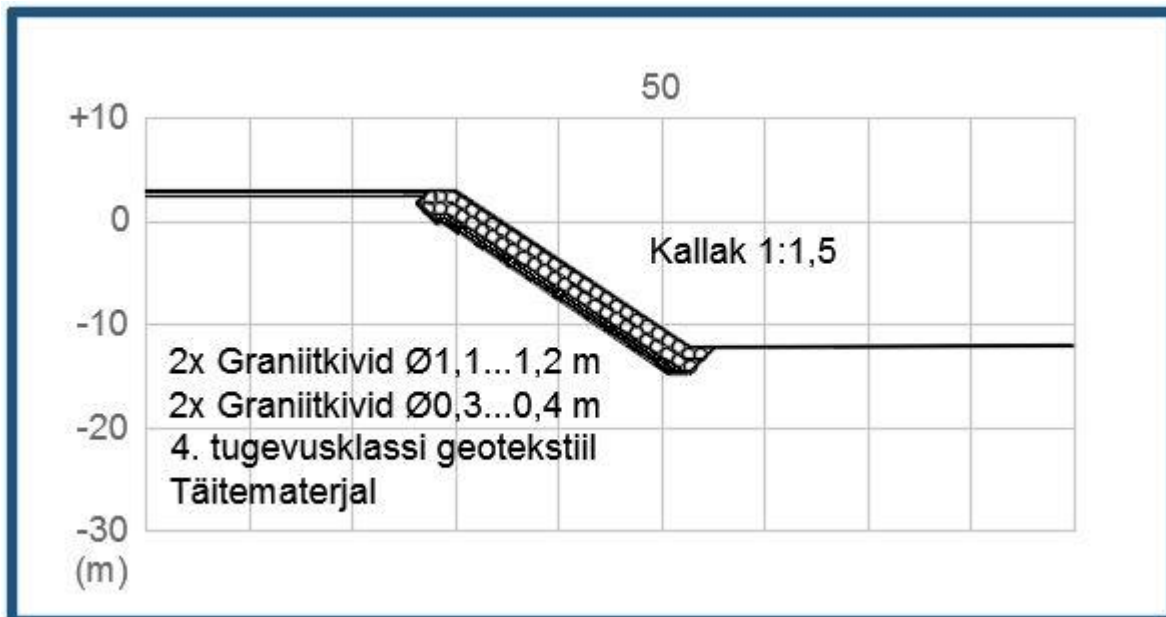
Kivi suuruse leidmine teostatakse valemite ja tabelite abil, mis on saadud paljude mudelkatsete analüüsimise tulemusel. Kaitselemendi kivi võib lainest tulenevate jõudude mõjul rappuda, paigutada ümber, libiseda mööda nõlva või osaliselt settida. Kahe graniitkivi kihiga kaetud lainemurdja lainepoolse mõõtude arvutamisel kasutatakse Hudsoni valemit (*Coastal Engineering Manual*), mida võib kasutada, kui laine ületipnemine on piiratud või vähene. Lainete ületipnemine on nähtus, kui laine jookseb piki kaldakindlustuse nõlva kõrgemale kui konstruktsiooni hari.

Lähteandmetena kasutati Eesti Geoloogiakeskuse töö andmeid, mida kõrvutati Paldiski Põhjasadamas tehtud geotehniliste uuringutega, et leida pinnasekihtidele sobivad geotehnilised omadused.

Arvutuste tulemusel on leitud tehissaare välimise ja rannapoolse nõlvakindlustuse lahendused.



Joonis 3. Tehissaare välimise nõlva kaitsekiht.



Joonis 4. Tehissaare rannapoolse nõlva kaitsekiht.

## 6. Väljavoolutoru hüdrauliline arvutus

Selleks, et tagada veehaarde tõrgeteta töö, tuleb kindlustada, et veehaare ei tekitaks merepõhjal erosiooni. Selleks peab tagama, et toru otstest välja voolava vee kiirus oleks piisavalt väike.

Arvutuse aluseks on võetud maksimaalne kavandatud vooluhulk  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ . See vooluhulk jaguneb kuue 3-meetrise läbimõõduga toru vahel. Seega on ühe toru vooluhulk maksimaalselt  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sellise vooluhulgaga on keskmine väljavoolukiirus toru otsas  $2,8 \text{ m/s}$ .

Järgnevas tabelis on toodud maksimaalsed kiirused joa teljel erinevatel kaugustel toru otsast. Tabelis on toodud ka joa läbimõõt vastaval kaugusel ning vee liikumise kiirus joa välispiiril.

Jrk nr	Kaugus otsast m	toru Joa diameeter m	Kiirus joa teljel $u_{\max}$ m/s	Kiirus joa välispiiril $u_{x,r}$ m/s
1	5	5.09	4,40	0.95
2	10	7.17	3,20	0.73
3	15	9.27	2,80	0.38
4	20	11.36	2,10	0.28
5	25	13.45	1,68	0.23
6	30	15.53	1,40	0.19
7	35	17.62	1,20	0.16

Vastavalt uuringutele on vee voolamise kiirus, mille juures mudased pinnased merepõhjal ei sattu suspensiooni, orienteeruvalt  $0,2\text{--}0,3 \text{ m/s}$ . Selline kiirus saavutatakse 25 meetri kaugusel toru otsast. Sellisel juhul on joa läbimõõt  $13,45$  meetrit ja raadius  $6,75$  meetrit, mis tähendab, et toru telg peaks olema  $6,75$  meetri kõrgusel mere põhjast.

Samas peab arvestama, et voolamise keskmise kiiruse ( $2,8 \text{ m/s}$ ) juures muutuvad rõhukaod liiga suureks ja seetõttu jaama kasutegur langeb. Lisades süsteemi veel kaks toru, langeb voolamise keskmine kiirus torus  $2,1 \text{ m/s}$ . Sellisel juhul langeb voolamise kiirus joa perimeetril 20 meetri kaugusel toru otsast alla  $0,2 \text{ m/s}$  ja toru telg võib olla  $5,7$  meetri kõrgusel merepõhjast.

Selleks, et saavutada toru otsas voolamise keskmist kiirust  $1,5 \text{ m/s}$ , peaks torude arv olema 11 tk. Sellisel juhul langeb joa perimeetril voolamise kiirus 15 meetri kaugusel toru otsast alla  $0,2 \text{ m/s}$  ja toru telg võib olla  $4,7$  meetri kõrgusel merepõhjast.

Kuna valdav vee voolamise suund alal, kuhu väljavoolutorud on kavandatud on loodesse lahest välja, siis PHAJ-st välja pumbatav vee mass liigub hoovusega kaasa ja kantakse pikkamisi lahest välja.



## **7. Kasutatud materjalid**

Mike 21 User Guide August 2013

Eurokoodeks: Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused: EVS-EN 1990. Tallinn: Standardiamet 2002

Coastal engineering manual U.S. Army Corps of Engineers Chapter 2-Types and Functions of Coastal Structures 28 september 2011

Eurokoodeks 7: Geotehniline projekteerimine: EVS-EN 1997-1. Tabel A.2 Tallinn: Standardiamet 2006

Thoresen, C., A., Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines. London: Thomas Telford Ltd 2010

TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2011, Paldiski Lõunasadamasse kai 6a rajamise keskkonnamõjude hindamise aruanne

## 8. Lisad

Joonis 1. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega. Olemasolev olukord.

Joonis 2. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega. Alternatiiv 1.

Joonis 3. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega. Alternatiiv 2.

Joonis 4. Olulised lainekõrgused 26 m/s puhuva loodetuulega.

Joonis 5. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega Olemasolev olukord.

Joonis 6. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega. Alternatiiv 1.

Joonis 7. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega. Alternatiiv 2.

Joonis 8. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Olemasolev olukord.

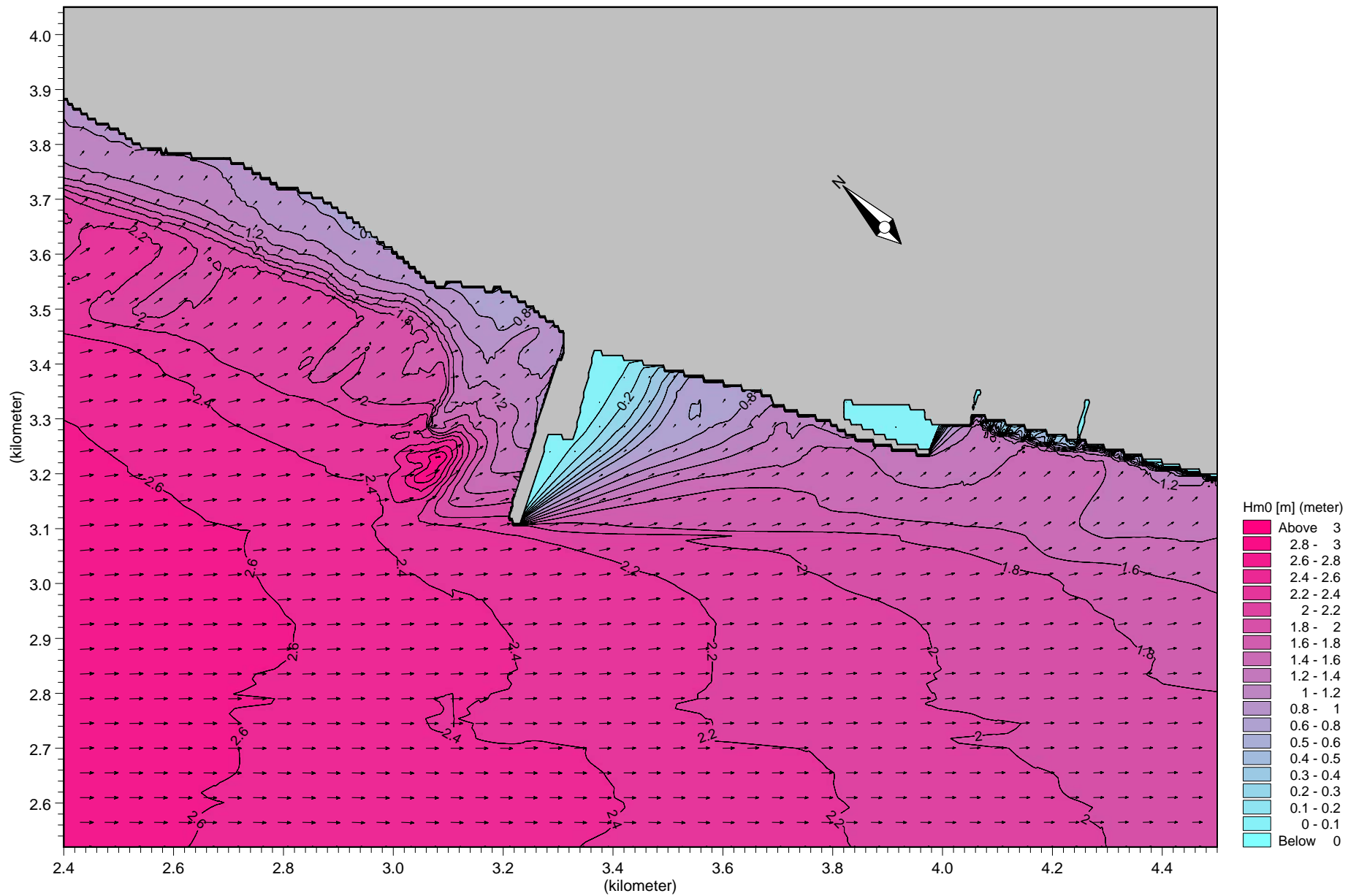
Joonis 9. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Alternatiiv 1.

Joonis 10. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Alternatiiv 2.

Joonis 11. Heljumi levik 15 m/s loodetuulega.

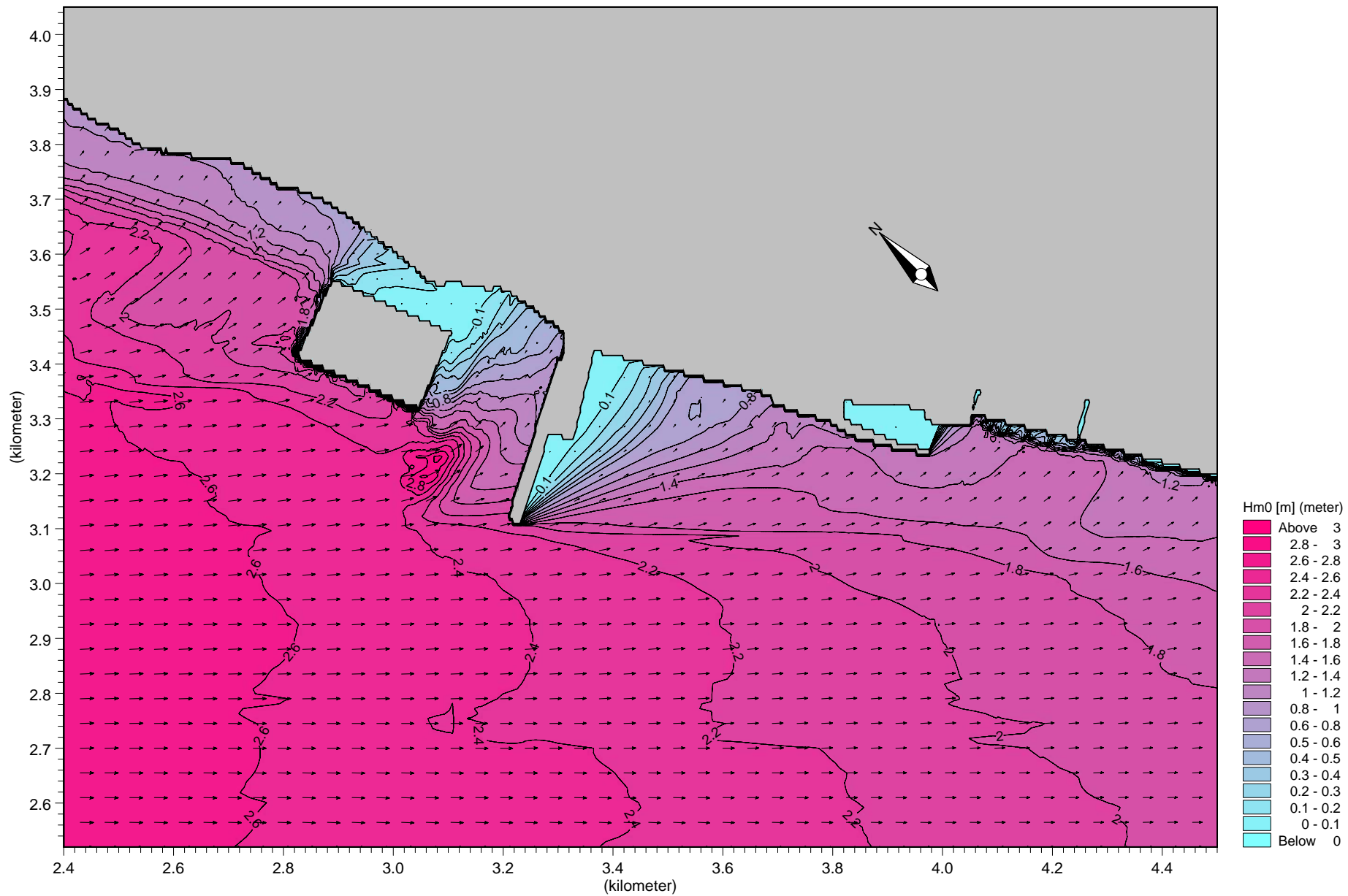
Joonis 12. Heljumi levik 15 m/s edelatuulega.

Joonis 13. Hoovused 15 m/s puhuva edelatuulega. Olemasolev olukord.



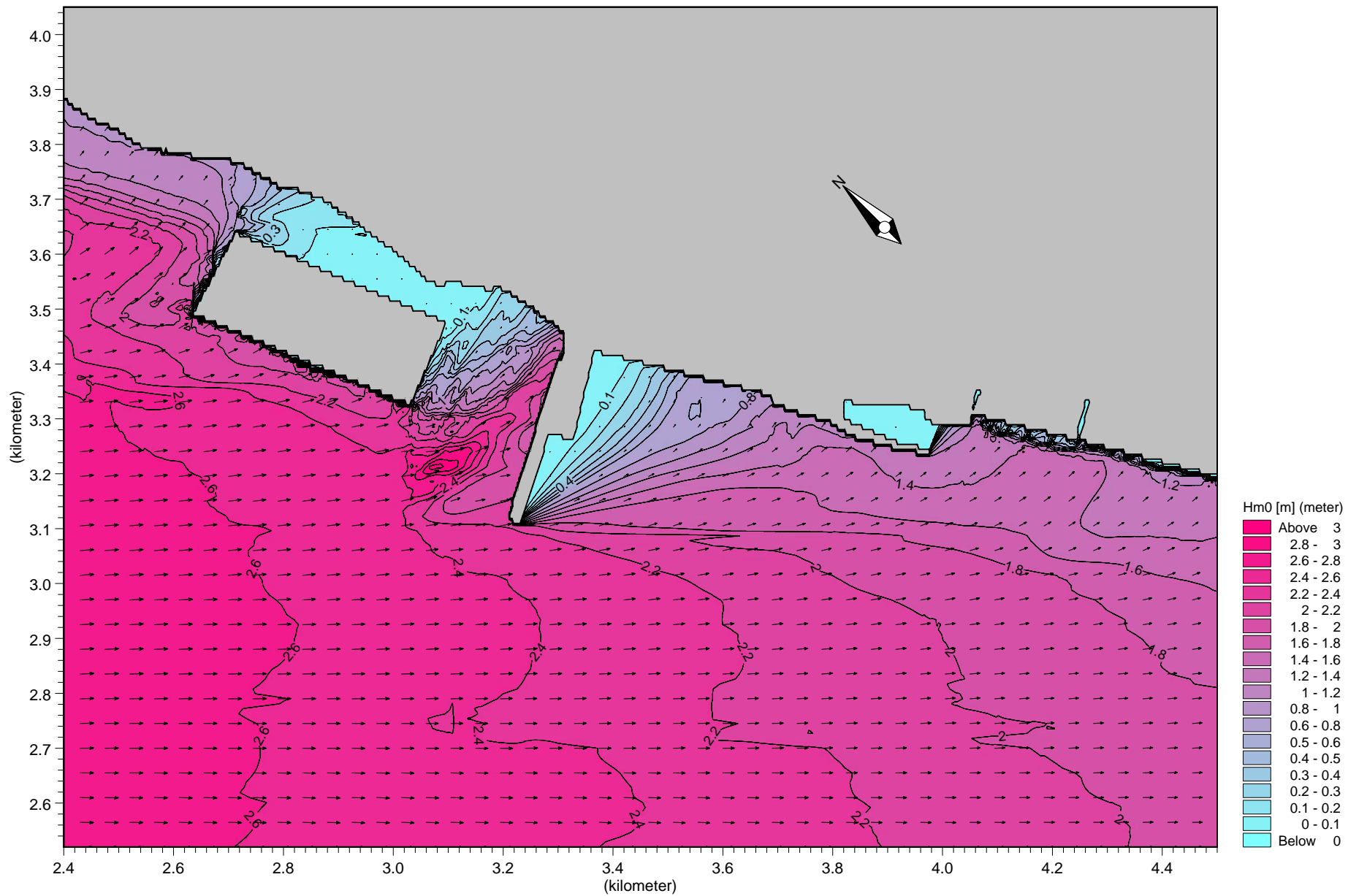
Scale 1:10000

Joonis 1. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega. Olemasolev olukord.



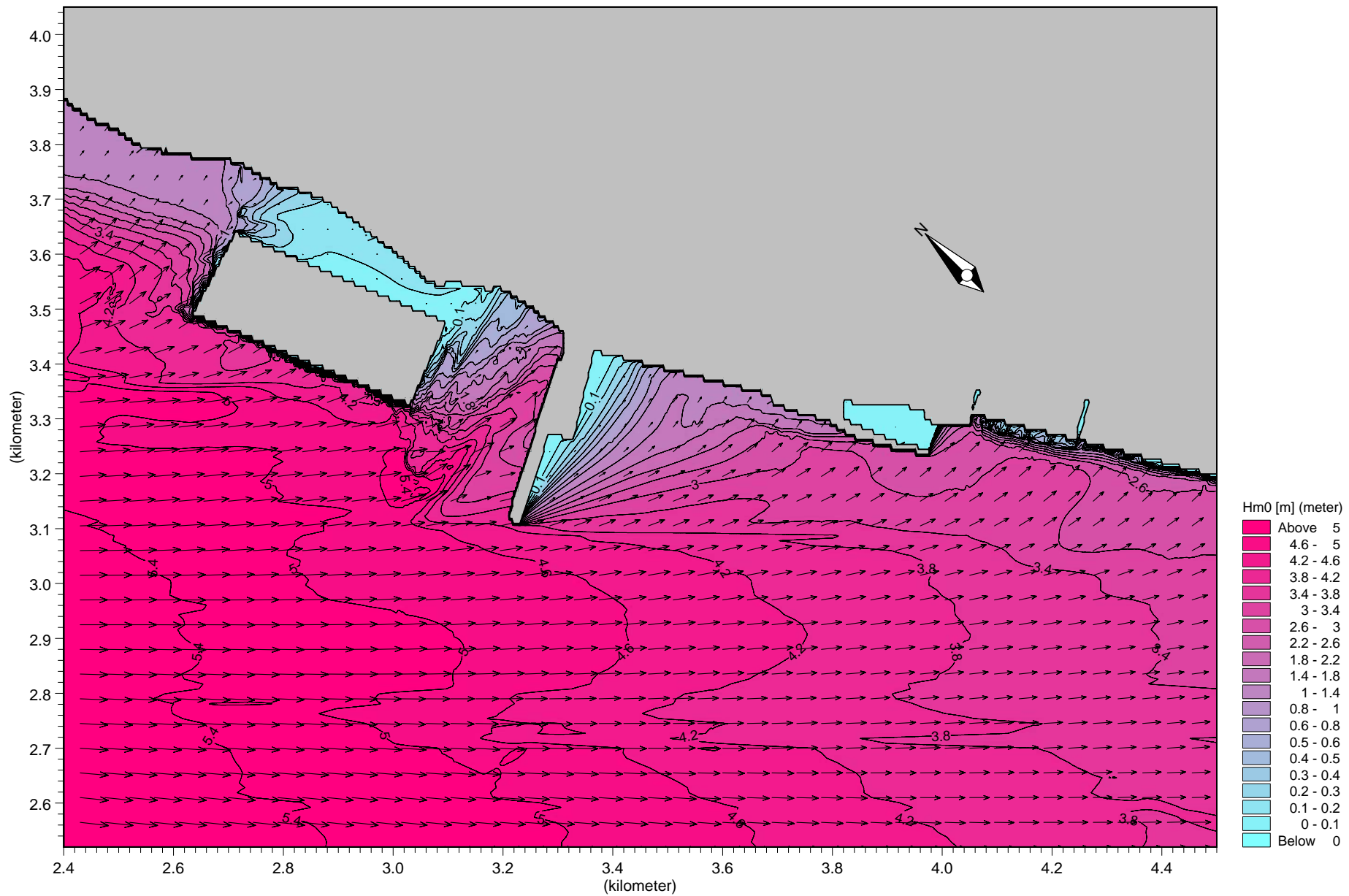
Scale 1:10000

Joonis 2. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega Alternatiiv 1



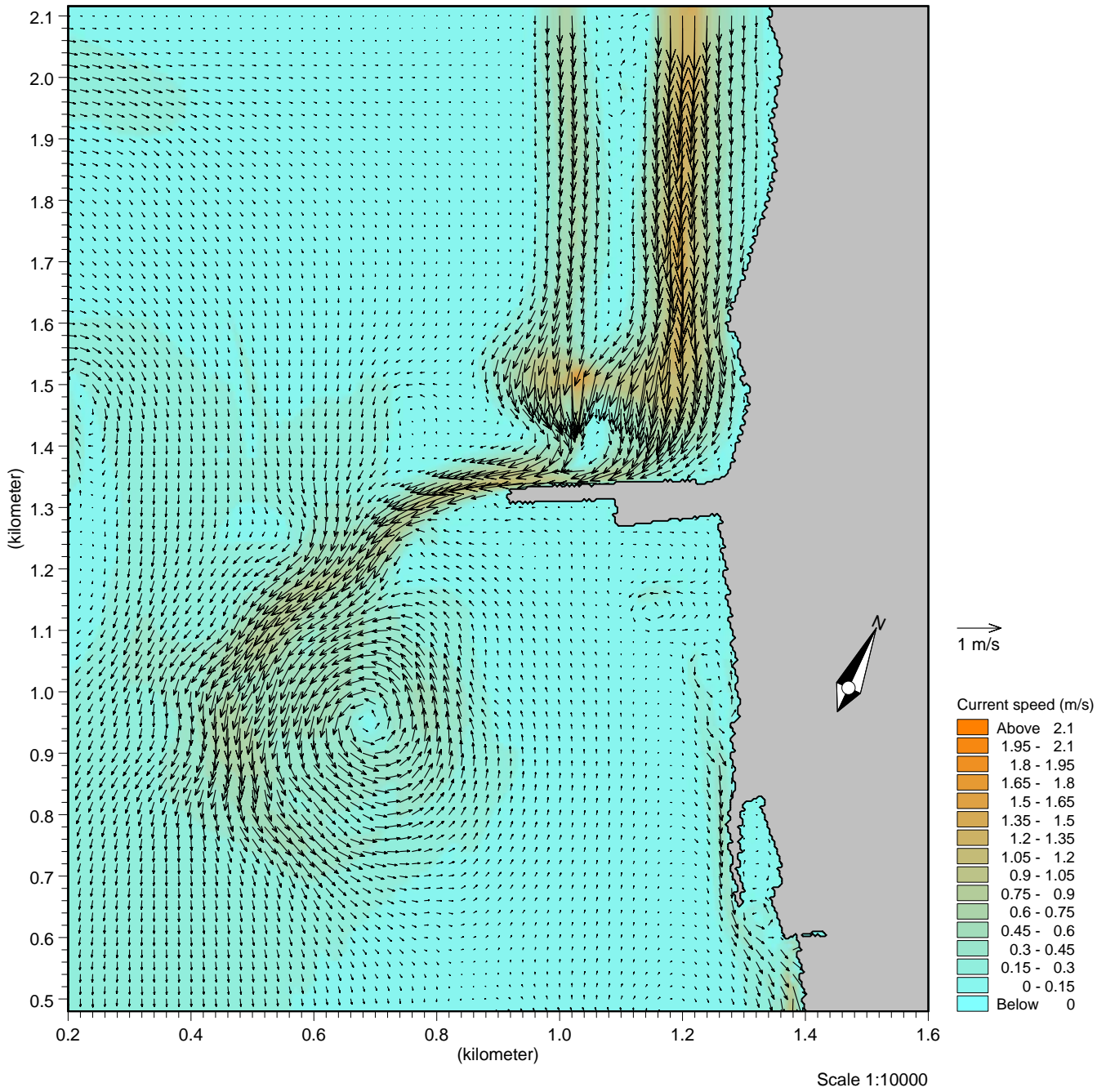
Scale 1:10000

Joonis 3. Olulised lainekõrgused 15 m/s puhuva loodetuulega. Alternatiiv 2.

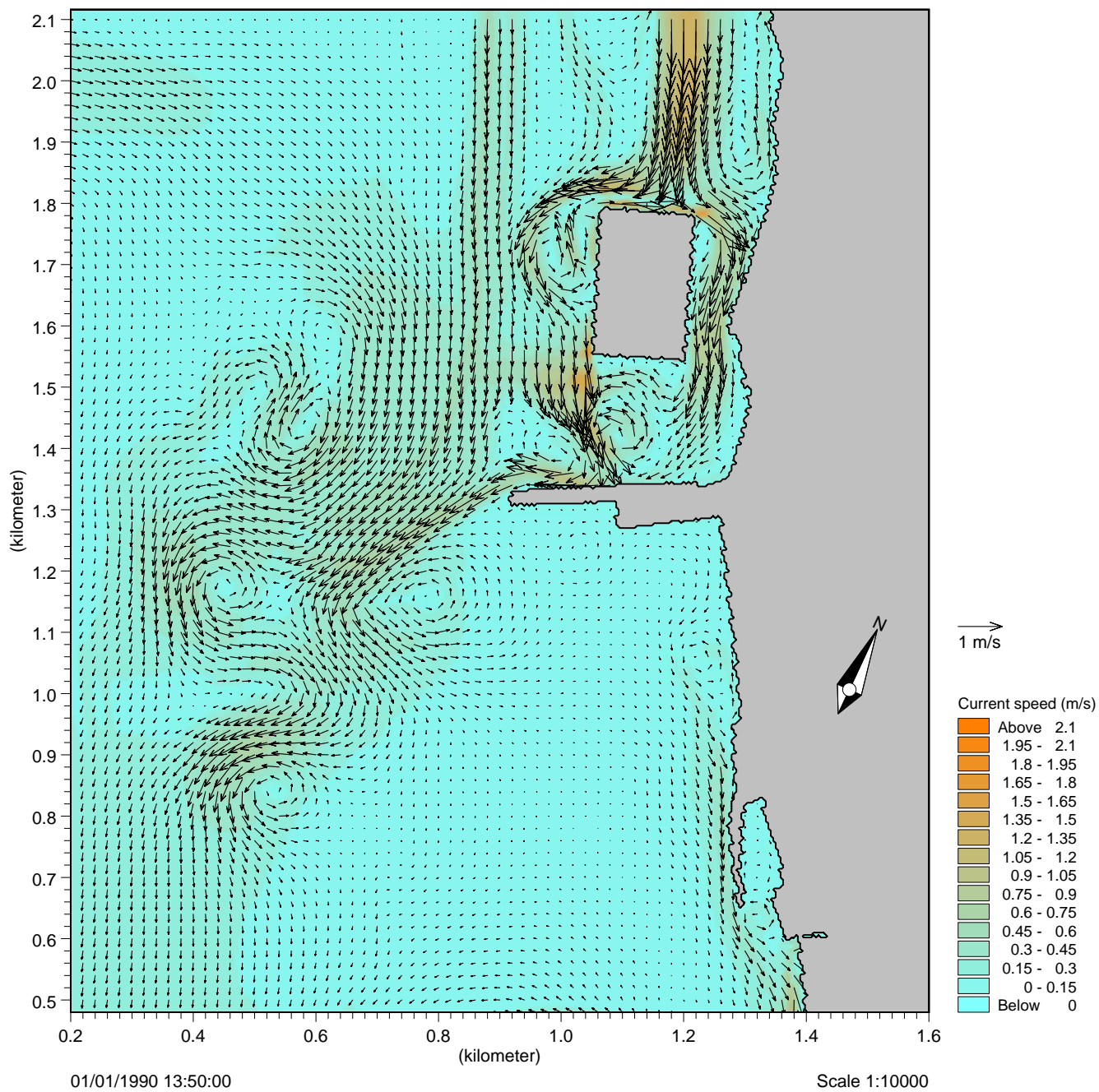


Scale 1:10000

Joonis 4. Olulised lainekõrgused 26 m/s puhuva loodetuulega

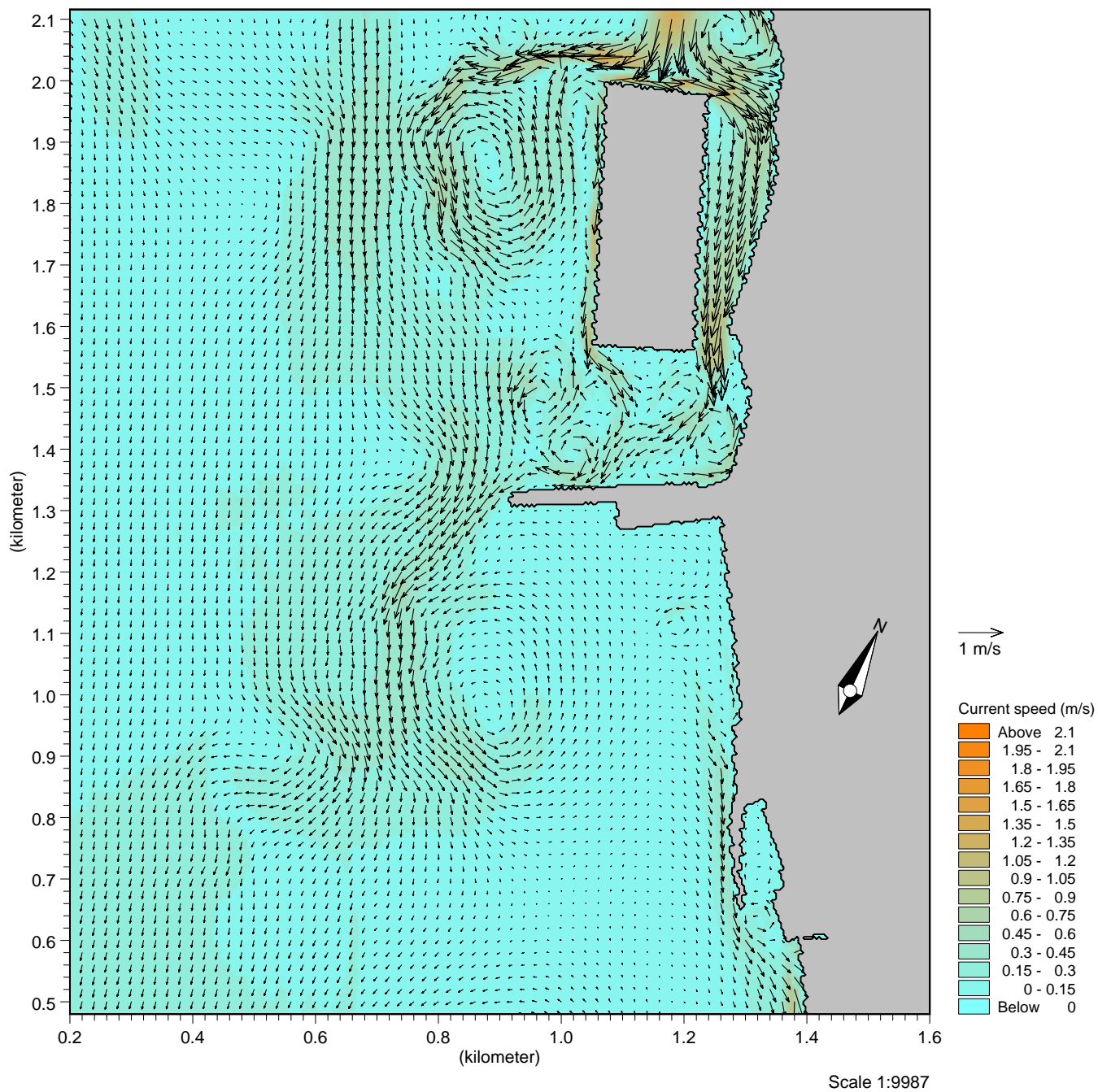


Joonis 5. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega Olemasolev olukord

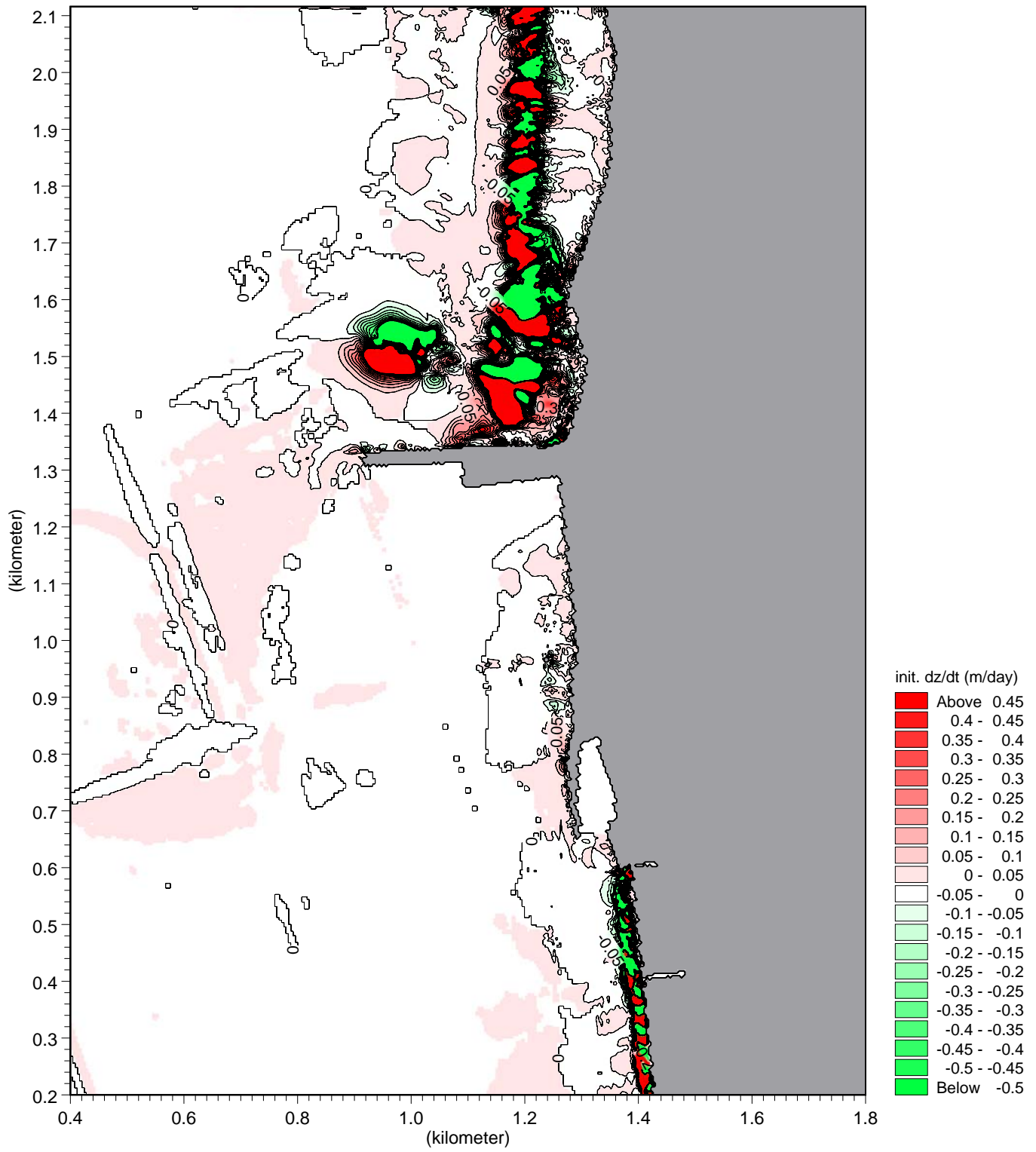


Joonis 6. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega Alternatiiv 1

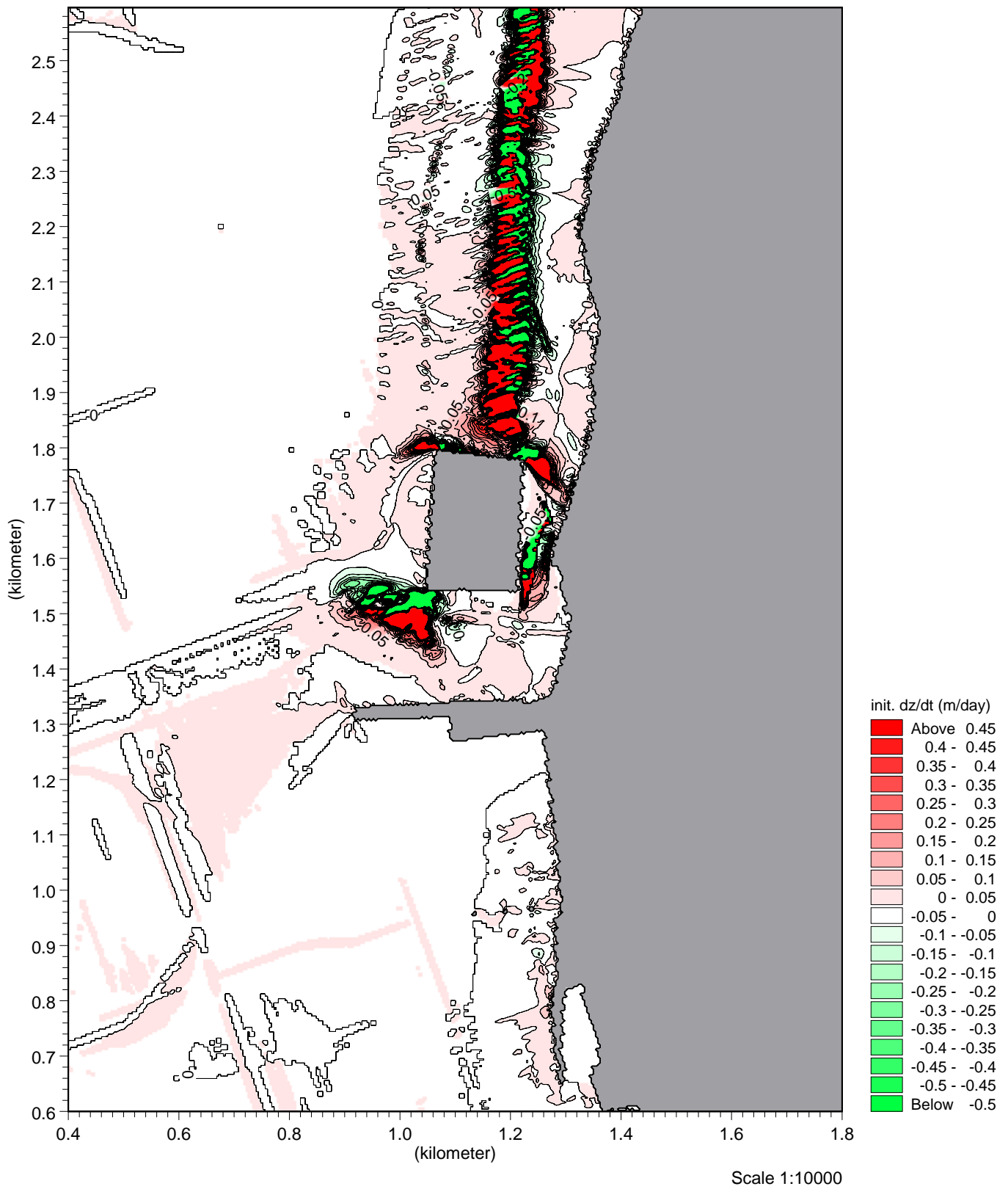




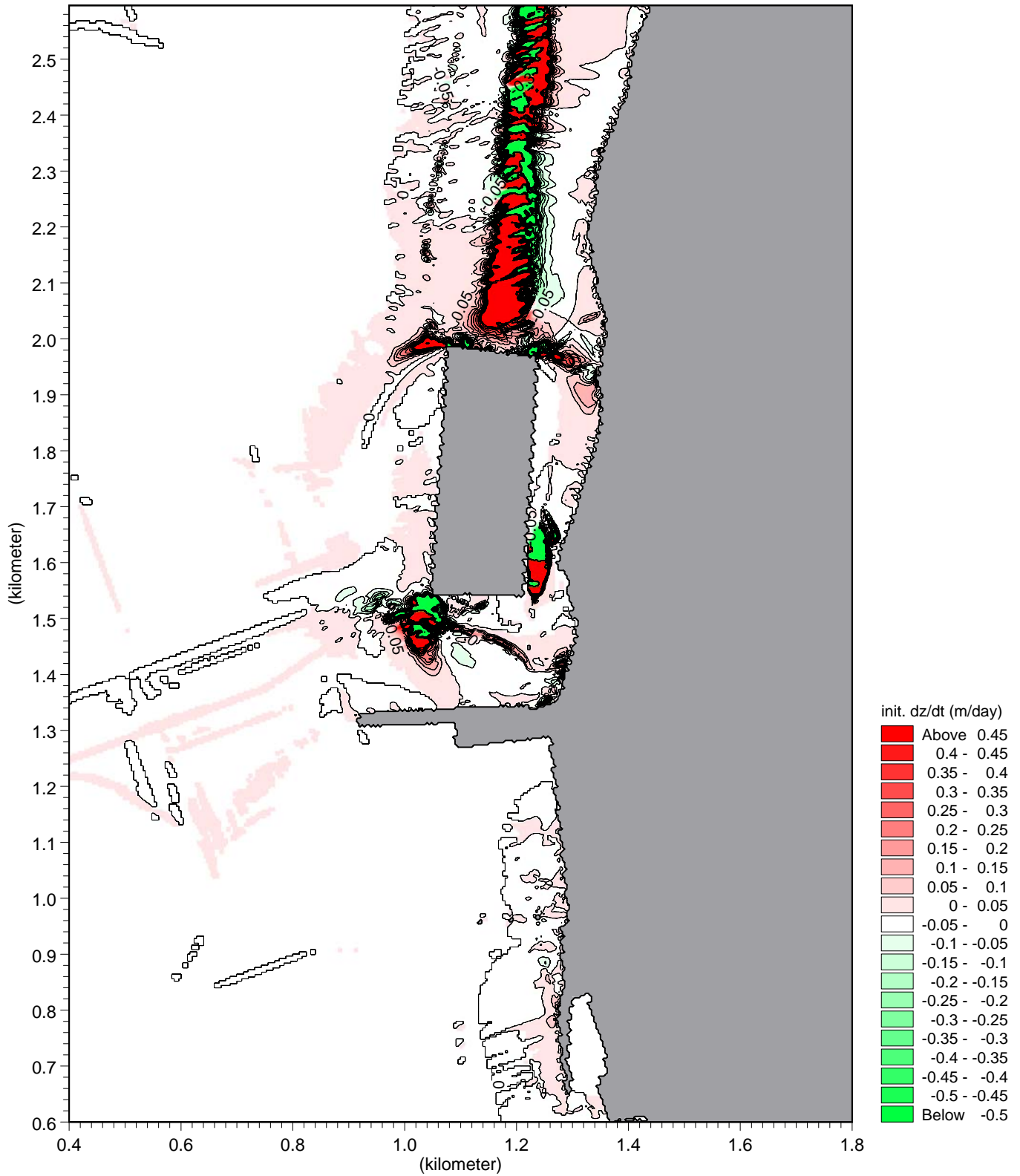
Joonis 7. Hoovused 15 m/s puhuva loodetuulega Alternatiiv 2



Joonis 8. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Olemasolev olukord

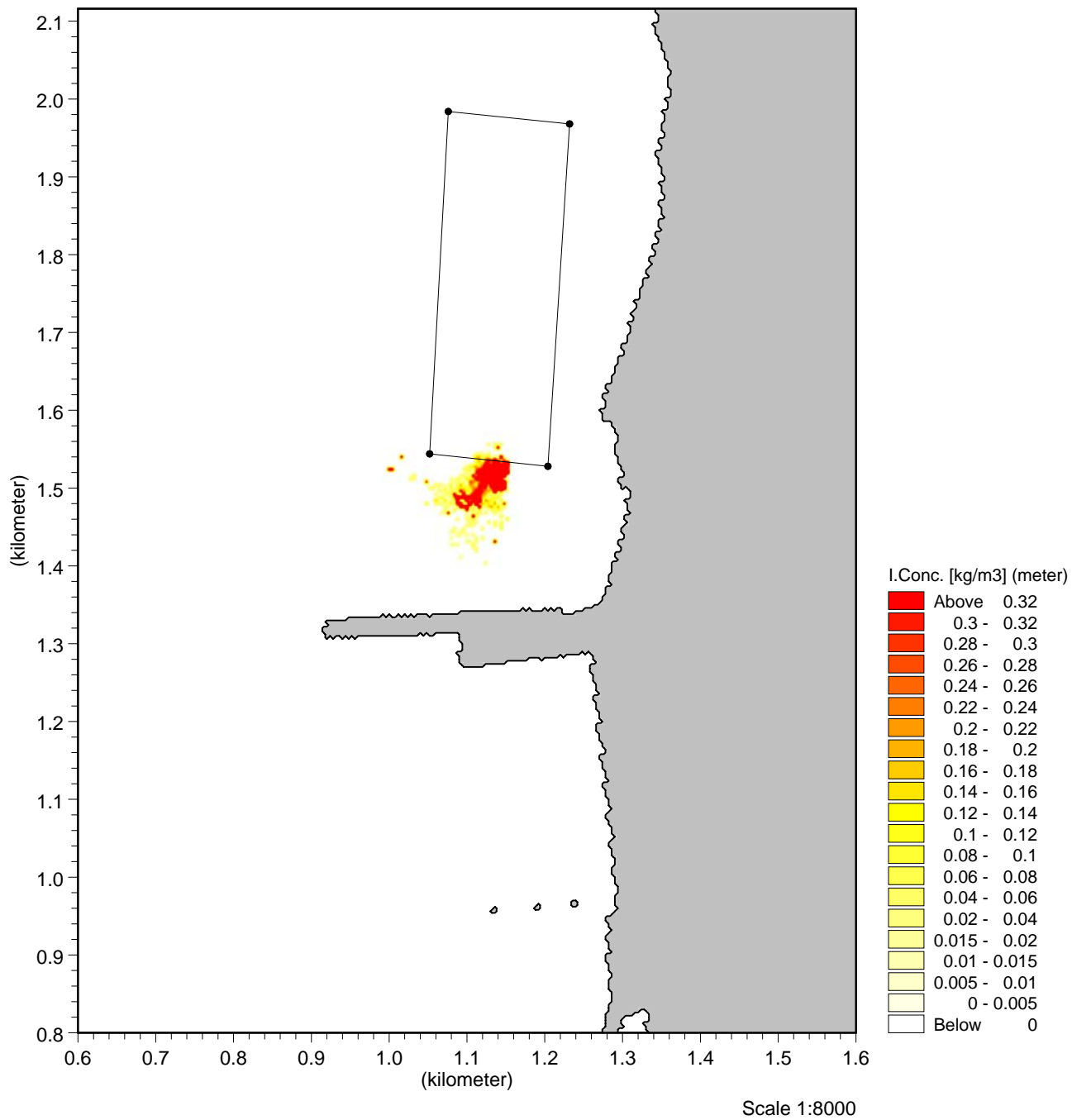


Joonis 9. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Väike saar

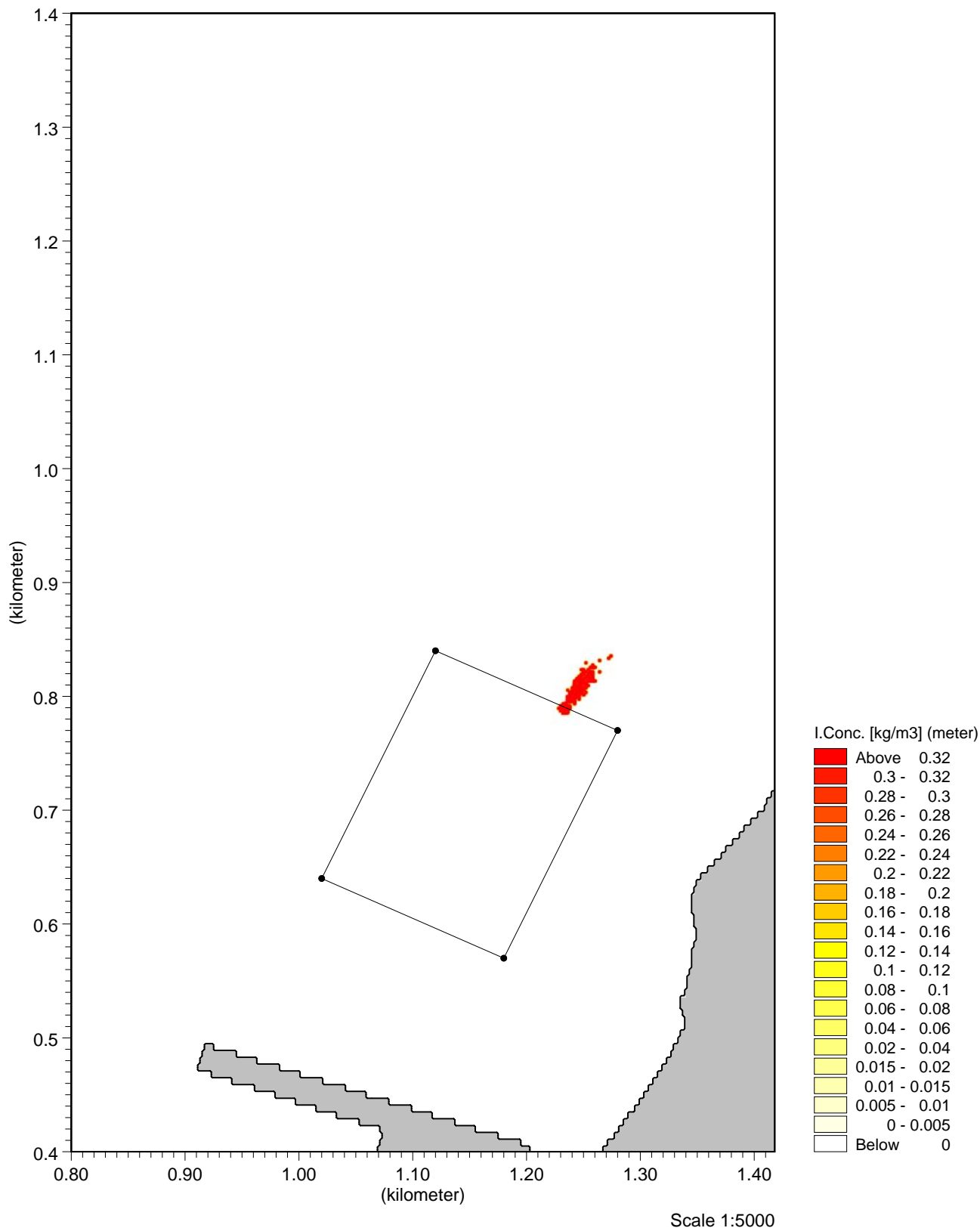


Scale 1:10000

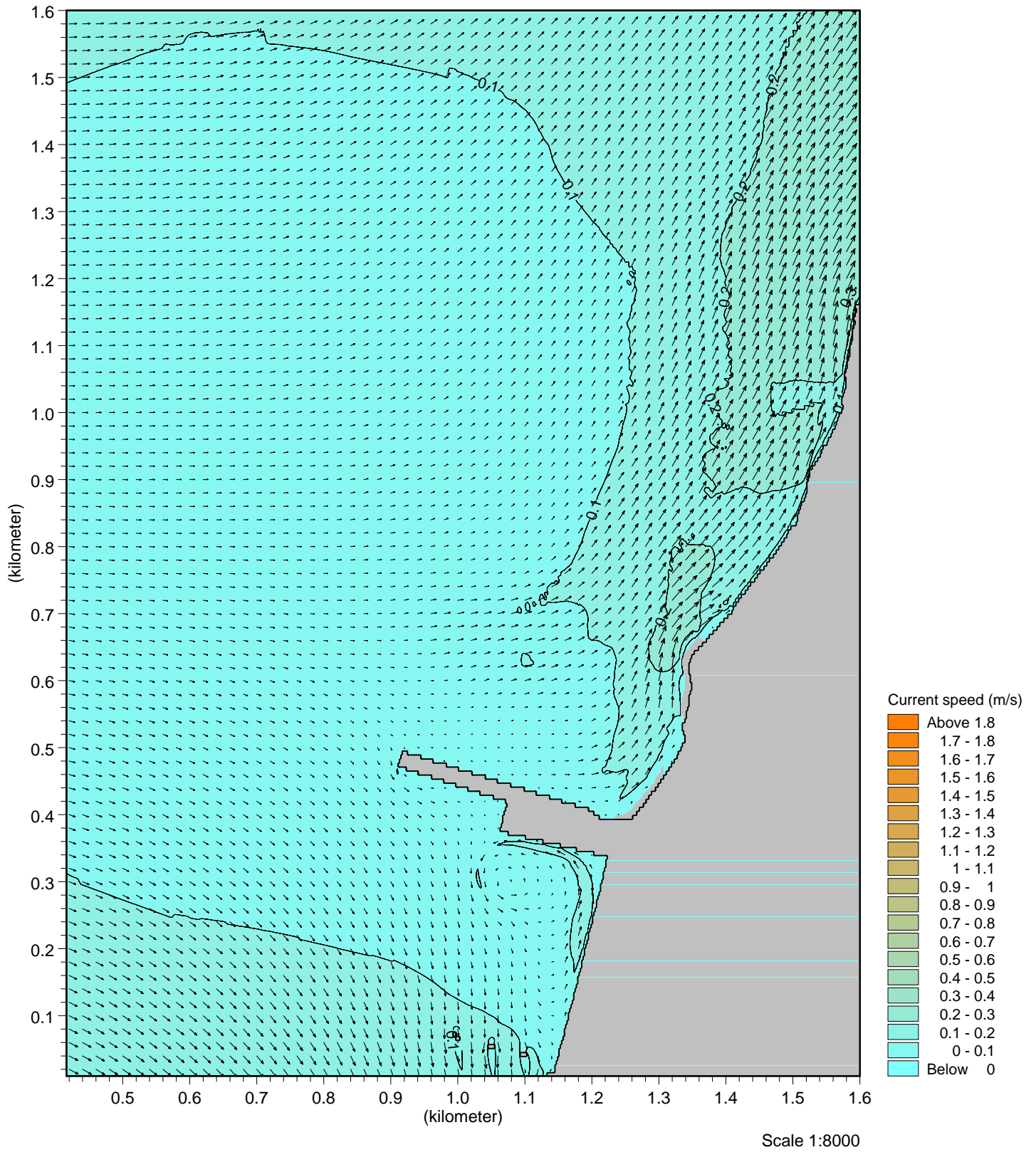
Joonis 10. Erosiooni/settimise suhe loodetuulega. Suur saar



Joonis 11. Heljumi levik 15 m/s lodetuulega



Joonis 12. Heljumi levik 15 m/s edeletuulega



Joonis 13. Hoovus 15 m/s puhuva edelatuulega