



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
merehariduskeskus

Luise Kompus

**Hoovuste, vee temperatuuri ja veesamba kihistatuse analüüs
kavandatava tuumaelektrijaama jahutusvee sissevõtu ja
väljalasu võimalikes piirkondades**

Lõputöö

Juhendaja: Prof. Urmas Lips

Tallinn 2023

Olen koostanud töö iseseisvalt.
Töö koostamisel kasutatud kõigile teiste autorite töödele,
olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Luisse Kompus
(*allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas*)
Üliõpilase kood: 193080VDVR
Üliõpilase e-posti aadress: lukomp@ttu.ee

Juhendaja Prof. Urmas Lips:
Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele
(*allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas*)

Kaitsmiskomisjoni esimees Dr. Inga Zaitseva-Pärnaste
Lubatud kaitsmisele
(*allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas*)

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Kasutatud lühendid	6
Sissejuhatus	7
1 Jahutussüsteemid	8
1.1 Vesijahutussüsteemid	8
2 Vesijahutussüsteemi valikukriteeriumid.....	10
2.1 Asukohaspetsiifilised tingimused	10
2.2 Jahutusmeetodid vastavalt protsessi omadustele	11
2.3 Regulatsioonid ja direktiivid	11
2.4 Keskkonnamõjud	12
2.5 Hooajaliste muutuste mõju jahutussüsteemile.....	13
3 Loviisa tuumaelektrijaama näitel.....	14
3.1 Ohutusmeetmed ekstreemsete temperatuuride esinemisel	14
4 Kavandatava tuumaelektrijaama jahutussüsteem	16
5 Soome lahe füüsikaline kirjeldus.....	18
5.1 Vertikaalne struktuur	18
5.1.1 Termokliin	19
5.2 Öhuvoolude mõju veeringe kujundamisel	19
5.2.1 Pealisvee sukeldumine ja süvaveeerge	20
5.2.2 Vastupidine tsirkulatsioon	20
5.2.3 Pinnahoovused.....	21
6 Andmed ja meetodika	22
6.1 Lähteandmed	22
6.2 Metoodika.....	22
7 Narva lahe transekt	23
7.1 Temperatuuri muutlikkuse üldpilti kirjeldav statistika.....	24
7.2 Ekstreemsete temperatuuride esinevuse sagedus põhjalähedases kihis.....	29
7.3 Ekstreemsete temperatuuride esinevuse sagedus piki transekti.....	30
7.4 Ekstreemsete temperatuuride üksikjuhtumite analüüs	33
7.5 Temperatuuri vertikaalprofiilid	34
8 Kunda transekt.....	37
8.1 Hoovuskiiruste muutlikkus.....	38
8.2 Hoovuskiiruste aegread jaamade kaupa.....	39
8.3 Hoovuste polaarhistogrammide jaamade kaupa.....	41
Kokkuvõte	45
Summary.....	48
Viidatud allikad	50
Lisa 1. Keskmise temperatuur pinna- ja põhjakihis aastatel 2010-2021; põhjalähedase kihi maksimaalsed temperatuurid	53
Lisa 2. Mõlema transekti keskmise soolsuse jaotumise ristlõige	55
Lisa 3. Iga jaama üle 15 °C esinevuse sagedus põhjalähedases kihis perioodil 02-04- 2010 kuni 03-09-2021	56
Lisa 4. Kunda lahe transekti keskmise temperatuuri jaotumise ristlõiked	57
Lisa 5. Hoovuskiiruse aegread jaama kaupa	58

Annotatsioon

Töö hõlmas merefüüsikaliste parameetrite analüüsi kavandatava tuumajaama jahutussüsteemi võimalikes suublates. Nendeks olid Kunda ja Narva laht. Uuring viidi läbi, et oleks võimalik teha esialgsed otsused jahutusveetorude optimaalse paigutuse kohta. Analüüsi jaoks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi GETM andmeid horisontaalse lahutusega 1 km, perioodil 2010-04 kuni 2021-09. Andmete analüüsimisel kasutati MATLAB-i tarkvara.

Töö esimeses jaos kirjeldati jahutussüsteeme ja nende valikukriteeriumeid. Fokuseeriti just vesijahutussüsteemidele ning näitena kirjeldati Loviisa tuumaelektrijaama. Seejärel selgitati võimaliku jahutussüsteemi lahendust kavandatavas tuumaelektrijaamas. Järgnes ülevaade Soome lahe merefüüsikalistest omadustest. Metoodika osas selgitati analüüsi läbiviimist, järgnes analüüs ja arutelu. Narva lahe puhul uuriti merevee temperatuuri varieeruvust veesamba alumises kihis, Kunda lahes keskenduti pinnahoovustele.

Uurimistöö tulemused näitasid, et Narva lahes esines harva temperatuure üle 20 °C, samas kui temperatuurid üle 15 °C esinesid kogu transekti ulatuses. Need ekstreemsemad temperatuurid olid tüüpilised suveperioodidel. Leiti, et mõningatel juhtudel võivad temperatuurid 30 meetri sügavustel ületada 15 °C lävendit. Järeldati, et see võib viidata pealisvee sukeldumise esinemisele.

Kunda lahes leiti, et kõrgemad voolukiirused esinesid transekti kaugemas osas, rannikule lähemal olid kiirused oluliselt madalamad. Voolukiirused ilmutasid mingil määral perioodilist varieeruvust, kui aeglased hoovuskiirused olid talvise jääkatte perioodil sagedasemad. Samas esineb aeglaseid (5. protsentiil) hoovusi terve aasta vältel mõõdukalt. Hoovuste suund on suuremal määral mõjutatud ranniku kujust, tuulte suunast ning avatusest merega.

Täiendavad uuringud võiksid keskenduda konkreetsemale piirkonnale, olenevalt tellija vajadustest. See võib hõlmata täiendavate mõõtmiste tegemist ja detailsemaid analüüse, mis keskenduvad spetsiifilisematele aspektidele või piirkonnale. Sellised täiendavad uuringud võimaldaksid süvendada arusaamist uuritavast piirkonnast ning anda konkreetsemaid soovitusi või teha täpsemaid otsuseid sõltuvalt projekti nõuetest.

Märksõnad: jahutusvesi, väljalask, sissevõtt, suubumine, vesijahutussüsteem, tuumaelektrijaam, Kunda laht, Narva laht, pinnahoovused, ekstreemsed temperatuurid

Kasutatud lühendid

GETM	<i>General Estuarine Transport Model</i>
IPPC	Saastuse kompleksne vältimine ja kontroll (<i>Integrated Pollution Prevention and Control</i>)
KMH	Keskkonnamõju hindamine
NAO	Põhja-Atlandi ostsillatsioon (<i>North-Atlantic Ocillation</i>)
PVT	Parim võimalik tehnika
TalTech	Tallinna Tehnikaülikool
VRD	Veepoliitika raamdirektiiv

Sissejuhatus

Põlevkivienergeetika alternatiivina kaalutakse Eestis tuumaenergia kasutuselevõttu. Selle elluviimine eeldab põhjalikke ruumianalüüse ja uuringuid. Need on olulised, et oleks võimalik teha esialgseid otsuseid ja vältida hilisemas etapis tehtavaid suuri muudatusi, mis võivad rahaliselt kulukaks osutuda. Arvesse tuleb võtta asukohapõhiseid kriteeriumeid, projekti tasuvust ja teostatavust, tehnoloogilist lahendust ning kõikvõimalikke mõjusid nii majandusele kui ka keskkonnale.

Tuumajaama peamiseks mõjuks keskkonnale on jahutusvee suubumine tagasi merekeskkonda. Keskkonnamõju piiramise ja ka kulude kokkuhoiu eesmärgil on oluline teha kindlaks kõige optimaalsem variant tuumajaama jahutussüsteemi sissevõtu ja väljalasketoru asukoha otsustamisel. Projekteerimisel on oluline arvestada väliskeskkonnast tulenevate eripärasustega, et tagada üldine tuumaohutus ning plaanipärane töö kõikvõimalikes situatsioonides. Analüüsides piirkonnas esinevaid merefüüsikalisi parameetreid, saab ülevaatlilikult kirjeldada vee omadusi uuritava alal.

Antud töö eesmärk on kirjeldada ja analüüsida hoovuste struktuuri, vee temperatuuri muutlikkust ja veesamba stratifikatsiooni ajalist käiku uuringu piirkonnas. Töö koostati Meresüsteemide Instituudi andmete põhjal. Statistilise analüüsi tulemusena saab ülevaate perioodiliste eripärasuste, hajuvuse ja võimalike maksimaalsete temperatuuride esinemise kohta uuringute alal. Lõpptulemuse põhjal on võimalik teha esmaseid otsuseid jahutusvee sissevõtu ja väljalasu asukohtade määramiseks.

Töö esimeses jaos tutvustatakse jahutussüsteeme üldiselt ning selgitatakse, millised tegurid mõjutavad lahenduste valikut. Näitena tuuakse Loviisa tuumaelektrijaama lahendus. Seejärel kirjeldatakse kavandatava tuumaelektrijaama võimalikku jahutussüsteemi. Järgneb Soome lahe merefüüsikaline kirjeldus. Teises jaos tutvustatakse rakendatud meetodikat, järgneb tulemuste analüüs ja kokkuvõte. Lõpus esitatakse kasutatud allikad ning lisamaterjalid.

Käesolev diplomitöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) Meresüsteemide Instituudilt tellitud uuringu raames. Analüüsi tellija on Fermi Energia AS.

1 Jahutussüsteemid

Jahutussüsteeme kasutatakse paljudes elutähtsates tööstusharudes, näiteks energia-, raua-, terase-, rafineerimis- ja keemiatööstustes. Eesmärk on jääsoojuse väljajuhtimine jahutatavast süsteemist ja vältida seeläbi süsteemi ülekuumenemist. Sõltuvalt protsessist ei saa seda soojust alati täielikult taaskasutada ning seetõttu tuleb jahutamise teel protsessist eemaldada. Konkreetse jahutussüsteemi valimisel lähtutakse veel tööstusvaldkonnast, asukohaspetsiifilistest keskkonnatingimustest, jahutusvee kättesaadavusest ja majanduslikest teguritest (Ecofys 2014).

Tööstuslike jahutussüsteeme saab eristada mitmel viisil. Üheks variandiks on jaotada süsteemid sõltuvalt protsessist kuidas soojust keskkonda eraldatakse. Sageli toimub soojusvahetus õhu või vee kaudu. Vesi omab suuremat soojusmahtuvust ning on seetõttu süsteemi jahutamiseks parem variant. Õhkjahutusega süsteeme (*Dry air cooled systems*) kasutatakse enamjaolt veekogu puudumisel ja kõrgemate temperatuuride puhul. Praktikast kasutatakse õhkjahutust sageli temperatuuride puhul, mis on kõrgemad kui 60 °C (IPPC 2001). Õhkjahutusega süsteemi korral kandub õhu kaudu eraldatud soojus atmosfääri. Vesijahutussüsteemide (*Wet cooling systems*) korral kasutatakse jahutamiseks vett või muud vedelikku, soojus vabaneb atmosfääri või veekokku. Soojuse eraldamise käigus võib keskkonna temperatuur märgatavalt tõusta (Ecofys 2014).

1.1 Vesijahutussüsteemid

2001. aasta IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*) direktiivi kohaselt eristatakse nelja peamist jahutussüsteemi tüüpi. IPPC direktiiv on Euroopa Liidu direktiiv, mis sätestab nõuded suurtele tööstusrajatistele saaste vältimiseks ja vähendamiseks.

Vesijahutuse baasil toimiva jahutusena on võimalik eristada avatud- (*direct-cooling*) ja suletud vesijahutussüsteeme (*closed-loop cooling*). Avatud jahutussüsteem eeldab otsest ühendust veekoguga, süsteemis soojenenud vesi suunatakse kõrge temperatuuriga tagasi veekogusse. Liigne soojus kandub veekogus laiali. Suletud vesijahutussüsteemi korral puudub otsene ühendus veekoguga. Jahutamine toimub suletud süsteemis soojusvahetite abil. Jahutustornide abil suunatakse suur hulk soojust atmosfääri ning jahutustiikidesse kandub madalama temperatuuriga vesi. Seejärel läheb jahutunud vesi

uuesti ringlusesse. Jahutustorne kasutatakse ka avatud jahutussüsteemide puhul. Näiteks juhtudel kus vesi juhitakse tagasi sissevõetava jahutusvee piirkonda ja on oht soojenenud vee tsirkuleerimiseks (IPPC 2001).

2 Vesijahutussüsteemi valikukriteeriumid

2014. aastal konsultatsioonifirma Ecofys-i poolt teostatud „*Pilot project on availability, use and sustainability of water production of nuclear and fossil energy – Geo-localised inventory of water use in cooling processes, assessment of vulnerability and of water use management measures*“ kohaselt peab jahutussüsteemi valikul arvestama järgmiste faktoritega:

- soojenenud vee temperatuur;
- väljajuhitava vee hulk;
- ligipääs jahutusveele;
- jahutuseks sobiv veetemperatuur;
- asukohaspetsiifilised tingimused;
- tööstusele spetsiifilised jahutamiseks ettenähtud nõuded;
- asukohapõhised regulatsioonid ja piirangud;
- asukohast tingitud lühiajalised välismõjud;
- võimalikud keskkonnamõjud;
- majanduslikud tegurid;

Nende faktorite koosmõju väljendub jahutusvee tarbimishulgas. Vee tarbimine varieerub vahemikus $0.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ (jahutustornide olemasolul) kuni $86 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ (avatud jahutussüsteemi korral). Tavaliselt jääb soojenenud jahutusvee temperatuuritõus tuumaelektrijaamade puhul vahemikku 10 kuni 25 °C. Jahutusvee lõpptemperatuur sõltub suuresti algtemperatuurist ja kasutatava jahutussüsteemi eripäradest. Sellise temperatuurivahemiku puhul on piisavaks lahenduseks avatud jahutussüsteemi ja/või jahutustornide kasutus (Ecofys 2014).

2.1 Asukohaspetsiifilised tingimused

Jahutusvedelikuna kasutatakse nii merevett kui ka magedat jõevett. Ulatuslikku jahutust eeldavate tööstuste asukoha valimisel võib üheks kriteeriumiks olla veekogu lähedus (Ecofys 2014). Suurtes kogustes madalal temperatuuril tekkiva jääksoojuse tõhusaks käitlemiseks (10 kuni 25 °C) on parim lahendus avatud süsteemi kasutamine, kus

jahutusvesi läbib süsteemi vaid ühel korral. Seetõttu on eelistatud asukoha valikul rannikulähedased piirkonnad (IPPC 2001).

2.2 Jahutusmeetodid vastavalt protsessi omadustele

Erinevat tüüpi tööstusprotsessid tekitavad erineval määral soojusenergiat, mida tuleb jahutussüsteemi abil eemaldada. Jahutusmeetodid sõltuvad omakorda sellest, millist tüüpi protsessist soojusenergia pärineb. Näiteks gaasi kokkusurumisel tekib suhteliselt kõrge temperatuuriga soojusenergia, mis nõuab jahutamiseks spetsiaalseid jahutusmeetodeid. Soojusenergia võib olla ka põlemisel või muudest eksotermilistest protsessidest kasutamata jäänud energia. Samamoodi tekitavad auru kondenseerimine ning ka hõõrdumisel kujunev soojus erineva tasemega soojusenergiat, mis vajavad spetsiifilist lahendust. Seega on oluline valida õige jahutussüsteem vastavalt protsessi omadustele ja soojusenergia tasemele (IPPC 2001).

2.3 Regulatsioonid ja direktiivid

Euroopa Liidus reguleeritakse tuumaelektrijaamade vesijahutusega seotud keskkonnamõjusid KMH direktiivi ja veepoliitika raamdirektiivi (VRD) kaudu. KMH direktiivi kohaselt on tuumaelektrijaamadel enne ehitamist või käitamist kohustus teostada keskkonnamõju hindamine. Hindamise käigus määratakse veekvaliteedi võimalikke mõjusid, sealhulgas jahutusvee heitmeid vastuvõtvale veekogule. Veepoliitika raamdirektiiv seab EL-is veevarude kaitse ja haldamise miinimumnõuded. See sisaldab sätteid veesüsteemide kaitseks ja kehtestab keskkonna kvaliteedi standardid.

Lisaks on IPPC direktiivi all määratletud PVT nõuded. PVT on mõiste, mis viitab kõige tõhusamatele tehnikatele, mida on võimalik konkreetse tööstussektori tegevuse jaoks kasutada. Sätestades tööstustele meetodite rakendamist nende tegevusest pärineva saastuse ennetamiseks või vähendamiseks. Seega võetakse direktiivis arvesse ka jahutamise mõju keskkonnale ja püütakse leida parimad võimalikud meetodid jahutamiseks (IPPC 2001).

Sobiliku jahutussüsteemi lahenduse leidmisel peab arvesse võtma ka riigipõhiseid regulatsioone ja piiranguid. Eestis reguleerib jahutusvee suublasse juhtimist Veeseaduse

§ 130 lõigete 2 ja 4 alusel kehtestatud määrus „Nõuded reovee puhastamise ning heit-, sademe-, kaevandus-, karjääri- ja jahutusvee suublasse juhtimise kohta, nõuetele vastavuse hindamise meetmed ning saasteainesisalduse piirväärtused“. Määruse § 2 lõige 3 alusel on jahutusvesi üksnes jahutamiseks kasutatud vesi, kuhu kasutamise käigus ei lisandu saasteaineid ning mis juhitakse pärast kasutamist suublasse (Veeseadus 2019).

2.4 Keskkonnamõjud

Jahutusvee temperatuuritõus võib põhjustada keskkonnas soojuslikku reostust. See tähendab, et veekogu loomulik tasakaal on häiritud. Kõrgenenud jahutusvee temperatuur võib omakorda mõjutada merekeskkonda ja seal elavate organismide elu.

Mõju keskkonnale sõltub veekogust kuhu soojenenud jahutusvesi suunatakse. Kui jahutusvesi juhitakse jõgedesse või järvedesse, võib see suurendada ohtu mereorganismidele, kuna kõrgema temperatuuriga vesi puutub kokku suhteliselt väikese veealaga. Näiteks jõgede puhul võib jahutusvesi ulatuda ka jõe vastaskaldale, takistades kalade rännet ja liikumist. See võib häirida kalade elutsüklit ja vähendada nende arvukust.

Soojenenud vesi võib soodustada ka eutrofeerumise teket. Kõrged temperatuurid soosivad vetikate ja teiste taimede kasvu ning kiirendavad nende vohamist.

Lisaks temperatuurimuutustele võib jahutusvesi mõjutada ka vees lahustunud hapniku taset. Kõrge temperatuur võib vähendada hapniku hulka vees, mis omakorda mõjutab mereorganismide elutegevust. Kui hapniku kontsentratsioon vees langeb, võib see põhjustada hapnikupuudust, mõjudes negatiivselt kaladele, taimedele ja teistele veeorganismidele.

Lisaks võib esineda ka probleeme seoses kalade ja teiste organismide sattumisega jahutussüsteemi. Selle vältimiseks võetakse kasutusele erinevaid meetmeid, näiteks paigaldatakse võred ja tõkked veekogusse suubuvatele torudele (IPPC 2001).

2.5 Hooajaliste muutuste mõju jahutussüsteemile

Jahutusprotsessi efektiivsust mõjutab oluliselt jahutusvee temperatuur. Selleks, et jahutus oleks efektiivne, tuleb valida tõhus jahutusallikas. Geograafilisest asukohast tingitud madal veetemperatuur võimaldab jahutamiseks tõhusalt kasutada merevett.

Üldjuhul on korrelatsioon lähteallika madalamate temperatuuride ja jahutusprotsessi suurema efektiivsuse vahel: jahutusvee algtemperatuur mõjutab otseselt tootmisvõimekust, mida madalam on jahutusvee algtemperatuur, seda suurem on auruturbiini võimsus. Muutused väliskeskkonnas mõjutavad oluliselt vajalikku jahutusvee mahtu. Näiteks, kui väliskeskkonna temperatuur tõuseb, siis võib tekkida suurem vajadus jahutusvee järele. Sellises olukorras vähendatakse tuumaelektrijaama töövõimsust. Samaväärselt, kui temperatuurid langevad, siis võib jahutusvee vajadus väheneda. Erinevate kliimatingimuste juures aastaringselt töötavate protsesside jaoks võib olla vajalik kasutada jahutussüsteemide kombinatsioone (IPPC 2001).

Sissevõetava vee temperatuur varieerub hooajaliselt. Tuleb arvestada, et suveperioodil, eriti liialt madalates rannikuvetes võib veetemperatuur märkimisväärselt tõusta ning sel juhul ei pruugi merevesi täita jahutamise eesmärki (Ecofys 2014). Üldiselt on jahutussüsteemid projekteeritud täitma jahutusnõudeid isegi kõige ebasoodsamal võimalikul tingimusel antud piirkonnas (IPPC 2001).

3 Loviisa tuumaelektrijaama näitel

Eestile lähim tuumaelektrijaam asub Soomes, Helsingist 90-kilomeetrit ida suunas Hästholmeni saarel. Loviisa tuumaelektrijaam kuulub Soome energeetikaettevõttele Fortum. Jaam on käigus olnud alates 1977. aastast ning selle toodetud elektrivõimsus moodustab keskmiselt 10% Soome kogu elektritootmisest (Fortum 2021).

Kõik Soome tuumaelektrijaamad asuvad rannikul ning saavad oma jahutusvee merest. 2021. aastal kasutas elektrijaam jahutamiseks kokku umbes 1394 miljonit m³ merevett ning mere soojuskoormus oli kokku 57 337 teradžauli. Et jahutus oleks efektiivne, võetakse jahutusvesi 6 kuni 8 meetri sügavuselt. Tagasi merre juhitava vee temperatuur on ligikaudselt 10 °C soojem algtemperatuurist (Fortum 2021).

Praktikas jõuab kaks kolmandikku reaktoris toodetud soojusenergiast jahutusveega merre. Väljalaske piirkonna temperatuurimõõtmiste kohaselt tõstab soojenenud jahutusvesi väljavoolukohast 1-2 kilomeetri raadiuse ulatuses merevee temperatuuri 1-2.5 °C võrra. Kuna väljalaskeala merevee temperatuur on kohati kõrgem, siis talvel see ala kinni ei külmu. Veesamba pealmisele kihile võib tekkida õhuke jääkiht, sõltuvalt atmosfääri temperatuuridest (Fortum 2021).

3.1 Ohutusmeetmed ekstreemsete temperatuuride esinemisel

Loviisa tuumaelektrijaama tootmisvõime talve- ja suvehooajal erineb merevee temperatuuri mõju tõttu kuni kümneid megavatte. Jahutusvee temperatuur jääb suviti suuresti alla 20 °C. Ekstreemsematel juhtumitel, hooajaliste eripärasuste, nagu atmosfääri soojemate temperatuuride ja tuulepinge tõttu võivad temperatuurid ületada ka 20 °C. Sellisel juhul vähendatakse jaama töövõimet, et temperatuurid jääks lubatud normide piiresse. Tuumaelektrijaama võimsuse vähendamine on kontrollitud ja etteplaneeritud ohutusmeede (Fortum 2021).

Juhul kui sissevõetava merevee temperatuur on üle 20 °C, algab kõrgendatud järelvalve ja testimine, selgitamaks välja maksimaalne lubatud meretemperatuur jahutusveeks. Sarnaselt ka merre tagasi suubuva jahutusvee puhul. Kui temperatuur ületab 32 °C ning võib küündida kuni 34 °C, mis on Soome seaduste kohaselt maksimaalne lubatud

temperatuur, siis taandatakse jaama töövõimsus ennetavalt. Seda eesmärgiga säilitada lubatud limiidid vastava ametiasutuse nõuetele (Fortum 2021).

2021. aastal oli suvi erakordselt soe ning merevee temperatuur oli tavalisest kõrgem. Perioodil 11. juuli kuni 18. juuli 2021 vähendati ajutiselt Loviisa tuumaelektrijaama 1. energiabloki võimsust, et ennetada väljalaske veetemperatuuride ületamist lubatud piirnormidest. Fortumi hinnangu kohaselt oli maksimaalne võimsuse vähenemine umbes 50 megavatti. Sarnane olukord esines Loviisa tuumaelektrijaamas viimati ka 2018. ja 2010. suvel (Fortum 2021).

2015. aastal paigaldati ekstreemsemate olude ennetamiseks avarii-õhkjahutussüsteem. Süsteemi kuulub üksuse kohta kaks jahutustorni, mida kasutatakse reaktorist soojuse eemaldamiseks ning ka muude tuumaohutuse seisukohalt oluliste seadmete jahutamiseks. See tagab jahutusvõimaluse ka ekstreemsetes tingimustes, näiteks kui merevee temperatuur muutub jahutuseks ebaefektiivseks või kui keskkonnakatastroofi korral pole merevesi jahutusveeks kasutuskõlblik (Nuclear Engineering International 2014).

Täpsemat teavet tuumaelektrijaamade jahutusvee kasutuse kohta hoitakse tavaliselt konfidentsiaalsena. Jahutusvee kasutus on otseselt seotud jaama tootmise efektiivsuse ja maksimaalse võimsusega ning seetõttu loetakse seda avalikkusele tundlikuks teabeks (Ecofys 2014).

4 Kavandatava tuumaelektrijaama jahutussüsteem

Fermi Energia AS-i planeeritava väikese moodulreaktoriga tuumajaama võimalikuks piirkonnaks on Kunda rannikuala Põhja-Eestis. Teostamise puhul on tagatud hea ligipääs mereveele, seetõttu on kondensaatori jahutamiseks eelistatud kasutada avatud jahutussüsteemi varianti. Võimalusena kaalutakse ka suletud vesijahutussüsteemi jahutustornidega.

Tractebel Engineering S.A asukohaspetsiifilise aruandele tuginedes saab teha ülevaate kavandatava tuumajaama võimalikust jahutussüsteemist. Tuumareaktsioonides eralduva soojuse tõttu tekib veeaur, mis paneb auruturbiinid liikuma. Auru jahutamiseks kasutatakse vesijahutust. Põhistsenaariumina saadakse jahutusvesi Narva lahest. Et vältida jahutusvee tsirkuleerimist, suunatakse soojenenud jahutusvesi potentsiaalselt Kunda lahte. Sissevõtu ja väljalaske ala eraldab Letipea neem. Kunda laht asub neeme läänekaldal. Idas külgneb Letipea neem Narva lahega, mis on suhteliselt sirge rannajoonega avalaht. Kaalutakse ka teisi variante. Et võimalikult vähe häirida Kunda lahe laevaliiklust ja minimeerida kulusid, juhitakse alternatiivse lahendusena soojenenud vesi tagasi Narva lahte. Antud analüüsi puhul tuginetakse esimesele lahendusele.

Nagu eelpool mainitud, tuleb ühe võimaliku lahendusena jahutusvesi tuumajaama Narva lahest. Kavandatavalt jääb toru sisselaskeava Letipea neemest kirdesse. Alternatiivina kaalutakse torude asemel ka tunnelite ehitust, kuid on märgitud, et madalates rannikualades ei ole see soovitatav lahendus. Et torust sissevoolava vee kiirus ei ületaks 0.3 m/s väärtust, kavandatakse sissevõtutoru merepõhjast ligikaudselt 1.5 m kõrgusele. Aruande kohaselt tuleks sisselaskeava projekteerida piirkonda, kus merepõhi jääb keskmiselt 10 m sügavusele. Sisselasketoru ühendatakse kaldal asuva pumbajaamaga. Pumpla ehitatakse merepinnast mõne meetri sügavusele. Pumbajaam on varustatud peaja lisajahutusvee pumpadega, mehaaniliste võrede ja trummelsõeluritega, et hoida ära ujuvprahi ja jämeheljumi sattumist jahutussüsteemi. Edasiselt liigub jahutusvesi mööda jahutusveetorusid pumbajaamast kondensaatorisse. Soojusvõimsus mis eraldatakse on 860 MW_{th}. Seal edasi suunatakse jahutusvesi väljalaskesüsteemi. Väljalaskesüsteemist suubub Kunda lahte väljalasketoru. Jahutusvee soojus kandub üle merevette. Jahutusvee temperatuuri tõus läbi kondensaatori on keskmiselt 10 °C.

Lubatud maksimaalne väljalaske veetemperatuur sõltub riigi poolt etteantud piirväärtustest. Kui vastavad ametiasutused kehtestavad rangemad nõuded, tuleb temperatuuritõusu vähendamiseks kasutada täiendavaid meetmeid. See omakorda suurendab vesijahutussüsteemiga kaasnevaid kulutusi.

5 Soome lahe füüsikaline kirjeldus

Mõistmaks kuidas toimub veeringlus uuringu piirkonnas, peame kõigepealt vaatama Soome lahte tervikuna. Üldiselt võib Soome lahes valitsevat pikaajalist horisontaalset veeringet iseloomustada tsükloonaalsena. Lihtsustades on Soome laht kui stratifitseeritud estuaar¹ (Alenius *et al.* 1998). Lahel on vaba ühendus Ava-Läänemerega ning piki Eesti põhjarannikut voolab süvakihtides lahte soolasem vesi, lääneosas on pinnakihi soolsus vahemikus 5-6.5 PSU (*Practical Salinity Unit*). Vastukaaluliselt suubub idaosas sisse ulatusliku vooluhulgaga mageveeline Neeva jõgi (vooluhulk keskmiselt 2500 m³/s), lahe idapoolsemas osas on soolsus 0-3 PSU (Soomere *et al.* 2008).

5.1 Vertikaalne struktuur

Veesambas võivad füüsikalised parameetrid erinevates kihtides varieeruda. Tihedus kasvab temperatuuri langedes ja soolsuse suurenedes. Soome lahes on maksimaalne tihedus 2.5 °C juures. Matemaatilisel kujul esitatakse merevee tiheduse funktsiooni temperatuuri, soolsuse ja rõhu suhtena. Suurema soolsusega veemassid liiguvad veesamba sügavamates kihtides, väiksema soolsusega veemassid paiknevad veesamba ülemistes kihtides. Sama kehtib ka temperatuuri kohta. Temperatuuri ja soolsuse erinevused tekitavad veesamba stratifikatsiooni ehk vertikaalse kihistatuse. Stratifikatsiooni esinemise korral veekihid omavahel ei segune, veemasse eraldavad üksteisest püknokliinid ehk tiheduse hüppekihid. Kui stratifikatsioon on põhjustatud temperatuurierinevusest, nimetatakse seda hüppekihti termokliiniks, soolsuse puhul halokliiniks (Alenius *et al.* 1998). Kihistumine on märgatav ka kiiruste erinevuses. Ülemises kihis toimuv transport on mastaapsem, kuna tuulte mõjutusel on kiirused suuremad. Tagajärjel tekib hüppeline kiiruse muutus ülemiste ja halokliinist allpool jäävate kihtide vahel (Andrejev *et al.* 2004).

¹ Stratifitseeritud estuaar tähendab, et lahes toimub veesamba vertikaalne jaotumine kihtideks. Erinevad kihid omavad erinevaid füüsikalisi omadusi (temperatuur, soolsus ja tihedus). See on tingitud soolasema vee sissevoolust ja mageda jõevee väljavoolust Soome lahte.

5.1.1 Termokliin

Temperatuur varieerub nii ruumis kui ka ajas. Pinnakihi temperatuur sõltub päikesekiirguse intensiivsusest, mis on suvisel perioodil tuntavalt tugevam. Suviti esineb sesoonne termokliin ehk temperatuuri hüppekiht (sügavustel 10-20 m), ülemise soojenenud veekihi ja alumise veekihi temperatuurierinevus kasvab, takistades vertikaalset segunemist. Samas veesamba ülemine osa termokliini kohal seguneb tuulte mõjutusel läbinisti. Tekib suur temperatuurist tingitud stratifikatsioon. Nähtus kaob sügiseti kui pinnakiht hakkab jahtuma, tihedus suureneb ja tekib konvektsioon² – veekihid segunevad omavahel halokliinini (selle olemasolu korral) või täielikult, põhjustades ühekihilise veesamba struktuuri. Talvisel perioodil kõigub pinnakihi temperatuur külmumispiiril (Alenius *et al.* 1998).

5.2 Õhuvoolude mõju veeringe kujundamisel

Soome lahe horisontaalne veeringe on võrdlemisi ebastabiilne. Geograafilisest asukohast tingituna esineb tsirkulatsioonis intensiivseid muutusi. Eraldi tuleb vaadelda pinnakihi ja püknokliinist allpool toimuvat tsirkulatsiooni. Pinnakihis mõjutab vee liikumist sesoonne tuulte muutlikkus, mis kutsub esile mitmeid protsesse (The Gulf of Finland Assessment 2016).

Soome lahes valitsevad lääne-edela tuuled, mille peamiseks ajendiks on Maa pöörlemisest tingitud Coriolis-i jõud, mis on põhjapoolkeral suunatud paremale. Domineerivate läänetuulte tugevus sõltub NAO (*North-Atlantic Oscillation*) indeksi muutlikkusest. Positiivse NAO indeksi korral on läänest puhuvate tuulte osakaal suurem, negatiivse arväärtuse korral valitseb piirkonnas mandriline kliima ning puhuvad idatuuled (Soomere *et al.* 2008).

Varasemalt on tuulte muutlikkus Soome lahes aastalõikes jaotatud neljaks perioodiks: tuulevaikne (mai-august), üleminekuperiood (august-oktoober) tuuline periood (oktoober-märts) ning üleminek tuulisest tuulevaikseks (märts- mai) (Soomere *et al.* 2011).

² Konvektsioon- soojusülekanne viis vedelikes või gaasides, tingitud raskusjõu mõjust.

5.2.1 Pealisvee sukeldumine ja süvaveekerge

Tugevate, piki rannikut puhuvate idatuulte puhul tekib mööda Eesti põhjarannikut apvelling e. süvaveekerge (*upwelling*), Soome rannikul esineb nähtus vastupidiselt läänesuunaliste tuulte korral. Apvellingu puhul kannab Ekmani transport pinnakihi avamerele, külm ja toitaineterikas süvaveekiht kompenseerib ära uhtunud ülemist kihti. Nähtusega kaasneb ka piki rannikut liikuv hoovus (Zhurbas *et al.* 2008). Apvellingutega esinevad rannikuhoovused võivad olla oluliseks teguriks keskmise hoovuste tsirkulatsiooni kujundamisel (Suhhova *et al.* 2015). Kuna valdavad tuuled puhuvad edelakaarest esineb Soome rannajoonel apvellingut tihedamini kui Eesti rannikul. Apvellingu tekkimiseks peab tuul puhuma rannajoonega paralleelselt vähemalt 50 tundi, Süvaveekerge võib langetada piirkonnas temperatuuri mitme kraadi võrra. Apvellingule vastupidine nähtus on daunvelling (*downwelling*) ehk pealisvee sukeldumine, Eesti põhjarannikul esineb läänesuunaliste õhuvoolude korral (Haapala 1994). Pealisvee sukeldumise puhul kuhjub vesi rannajoonele. Toitainevaene vesi liigub seejärel sügavamate kihtide suunas. Pealmine veemass, mis nüüd lükati alumistesse kihtidesse on väiksema tihedusega. Toimub veemassi vertikaalne segunemine (Soomere *et al.* 2008).

5.2.2 Vastupidine tsirkulatsioon

Ajutiselt tugevamad tuuled võivad ulatuslikult mõjutada üldist tsükloonaalset veeringet. Lühiajaliste hoovuste keskmine kiirus võib küündida 20-30 cm/s, võrdluseks – üldise veeringe keskmiseks kiiruseks on varasemalt hinnatud paar sentimeetrit sekundis. Need hoovused võivad olla väga muutlikud nii kiiruse kui ka suuna poolest (Soomere *et al.* 2008).

Stratifitseeritud estuaarile vastupidise tsirkulatsiooni võib põhjustada tugevate lääne-edela tuulte korral kujunev intensiivsem Ekmani transport. Tuulte ja veepinna vahelisel hõõrdejõu toimele liigub pinnakihis suur hulk vett Ava-Läänemerest piki Soome lahe põhjaosa idasse. Üldjuhul on pinnahoovuste kiirus tavaliselt umbes 1.4% tuule kiirusest (Alenius *et al.* 1998). Coriolise jõust mõjutatuna on pinnakihist alumistes kihtides veetransport suunatud esialgselt liikumissuunast ligikaudselt 45 kraadi paremale ning põhjakihis on tegu vastuvooluga Läänemere avaosa suunas (Andrejev *et al.* 2004). Elken *et al.* 2003 on varasemalt järeldanud, et vastupidine tsirkulatsioon võib tekkida kui

läänetuulte keskmine kiirus ületab vahemikku 4-5.5 m/s (Elken *et al.* 2003). Westerlund *et al.* uurimistöös leiti, et tsükloonaalne ning antitsükloonaale veeringlus esineb ligikaudselt võrdselt (Westerlund *et al.* 2018).

5.2.3 Pinnahoovused

Eesti põhjarannikul esinevad idatuulte korral tugevamad läänesuunalised triivhoovused (Andrejev *et al.* 2004). Hiljem on Westerlund *et. al* 2018 uurinud pinnalähedaste hoovuste kujunemist Narva lahes, põhinedes piirkonnas tehtud temperatuurimõõdistustel aastatel 2012-2014. Selle põhjal kirjeldati hinnanguliselt kuidas mõjutab Narva lahes apvellingu esinemine hoovuste keskmisi kiirusi aastalõikes. Süvaveekerke esinemine Soome lahe lõunarannikul ei ole tavapärane olukord, kuid võttes aluseks 2013. septembris esinenud 15-päevalise tugevama hoovuste perioodi (keskmisel hoovusekiirusel 10 cm/s), leiti, et ainuüksi ühe suuremate kiirustega hoovuste perioodi esinemine muudab aasta keskmist hoovuste kiirust 0.7 cm/s võrra (Westerlund *et. al* 2018). Suursaare 2010. aastal läbiviidud uuringus kinnitati 336-päeva andmete põhjal, et rannikuhoovused on piki Narva lahte suuremal määral suunatud läände (58-66%), keskmise kiirusega 5-6 cm/s. Neid läänesuunas domineerivaid rannikuhoovusi on varasemalt palju uuritud, samas erinevad uuringute tulemused märkimisväärselt (Suursaar 2010).

6 Andmed ja meetodika

6.1 Lähteandmed

Statistiline analüüs on läbi viidud tuginedes TalTech Meresüsteemide Instituudis olemasolevatele mudeltulemustele GETM (*General Estuarine Transport Model*). GETM on numbriline kolmemõõtmeline mudel hüdrodünaamiliste parameetrite kirjeldamiseks ja simuleerimiseks. Lähteandmetena kasutati GETM tulemusi horisontaalse lahutusega 1 km, perioodil 2010-04 kuni 2021-09. Andmete analüüsimiseks ja kirjeldamiseks kasutati MATLAB-i tarkvara. Kõik järgnevad graafikud on koostanud autor selle uurimustöö raames.

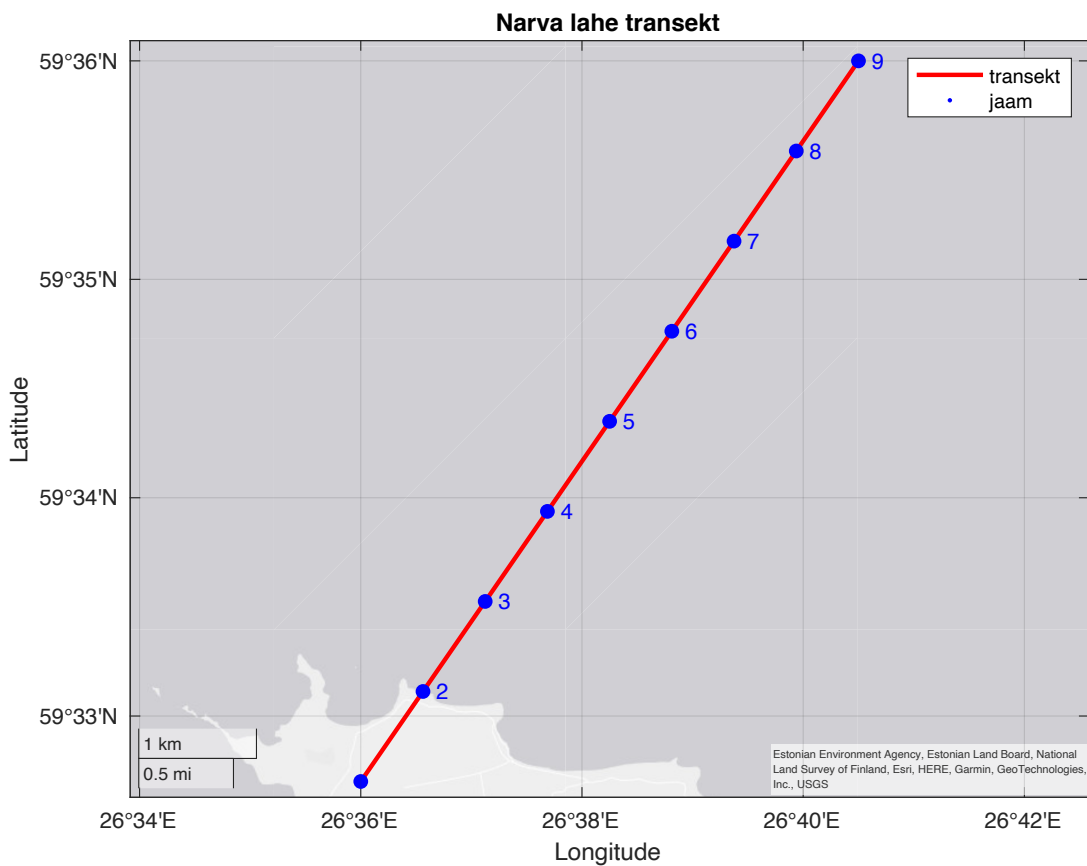
6.2 Metoodika

Uuringu lähteandmete aluseks on võetud trasside tõenäolised asukohad, analüüsimeks stsenaariumi, kus jahutusvesi saadakse Narva lahest ja juhitakse Kunda lahte. Mõlema transekti³ puhul analüüsiti statistiliselt parameetrite ajalist ja ruumilist käiku. Saadud tulemuste põhjal tehti kokkuvõtvad järeldused, millele on võimalik tugineda edaspidiste otsuste tegemisel kavandatava tuumajaama jahutusvee toru suublate määramisel.

³ transekt- geograafiline mõõdistusliin, mis kulgeb läbi konkreetse ala või keskkonna.

7 Narva lahe transekt

Narva lahe transekt kulgeb Letipea neeme tipust kirdesse ning on kokku 7.5 kilomeetrit pikk. Mõõdistusandmed algavad jaamast nr 3 (joonis 1). Narva lahe andmete analüüsimisel keskenduti peamiselt temperatuuri muutlikkusele piki transekti. Oluline on, et sissevõetava merevee temperatuur tagaks jahutamise funktsiooni. Kuna kavandatavalt on sissevõtutoru merepõhjast 1.5 m kõrgusel, vaadeldi veesamba sügavaima, põhjakihi parameetreid. Järgnev analüüs katab perioodi 02-04-2010 kuni 03-09-2021 tulemusi transekti põhjalähedasemas kihis.



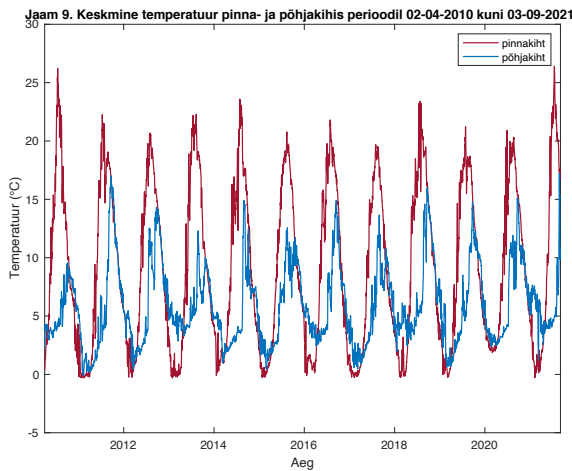
Joonis 1. Narva lahe transekti asendiplaan

7.1 Temperatuuri muutlikkuse üldpildi kirjeldav statistika

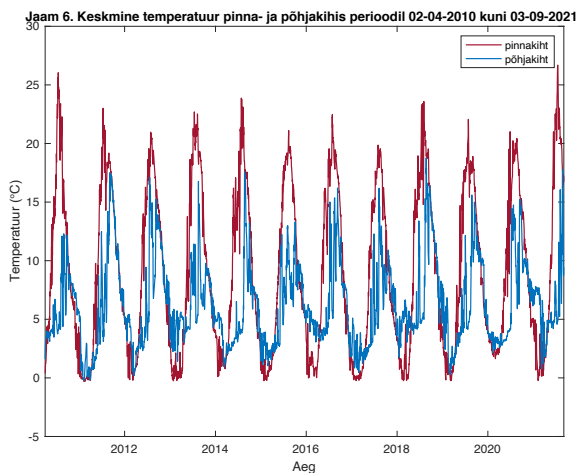
Temperatuuri muutlikkuse üldpildi kirjeldamiseks võeti andmed iga jaama põhjalähedasema kihi kohta perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021 (tabel 1). Andmetest saab järeldada, et põhjakihi temperatuurid langevad järk-järgult merepõhja sügavuse suurenemisega. Jaam 9, mis on transekti alguspunktist 7.5 km kaugusel ja mille põhi asub 31.9 m sügavusel, on keskmine temperatuur 5.9 °C. Jaam 3, mis on suhteliselt ranniku lähedal ja mille sügavus on 8.3 m – on keskmine temperatuuriväärtus 7.7 °C.

Veekihtide sügavuse suurenemisel väheneb päikesekiirguse soojusenergia edasikandumine. Seega on vesi pinnalähedal rohkem mõjutatud päikesekiirgusest ja seetõttu ka soojem. Madalatel sügavustel võib päikesekiirgus veesammast terviklikult mõjutada. Seda toetavad ka allpool esitatud graafikud. Joonis 2 on esitatud jaamade 3, 6 ja 9 pinna- ja põhjakihi temperatuurierinevused ning aegrea põhjalähedasema kihi maksimaalsed temperatuurid. Teiste jaamade graafikud on esitatud lisas 1. Jaam 9 puhul on selgelt näha pinna- ja põhjakihi temperatuuride kontrastsust – ühel ajahetkel võib temperatuurierinevus ületada 10 °C. Rannikul lähedamal, madalamatel sügavustel on näha pinna- ja põhjakihi temperatuuride osalist kattumist. Jaam 3 graafiku puhul on märgatav veesamba täielik segunemine – pinna- ja põhjalähedased temperatuurid ühtivad eelnevalt selgitatud põhjusel.

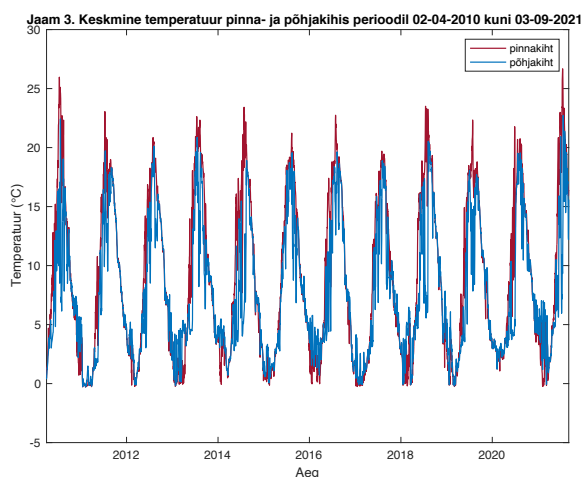
Lisaks näeb graafikutelt, et teatud ajaperioodidel on pinnakihi temperatuurid madalamad kui põhjakihis. Tegemist on talveperioodidega – külma õhumassi mõjutusel pindmine kiht jaheneb. Tiheduse erinevuse tõttu tekib konvektsioon ja veesammas seguneb vertikaalselt läbi. Soome lahe merevee tihedus on suurim 2.5 °C juures. Tekib olukord kus soojemate ja tihedamate kihtide peal on külmemad ja vähemtihedad kihid.



Jaam 9		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	05-Okt-2010	9,6
2011	18-Sep-2011	17,0
2012	22-Sep-2012	14,3
2013	24-Aug-2013	12,3
2014	31-Aug-2014	14,9
2015	17-Aug-2015	12,6
2016	15-Sep-2016	14,9
2017	29-Aug-2017	13,7
2018	20-Sep-2018	16,0
2019	23-Sep-2019	14,8
2020	19-Sep-2020	15,2
2021	25-Aug-2021	17,2



Jaam 6		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	29-Aug-2010	12,3
2011	05-Sep-2011	17,5
2012	21-Jul-2012	17,1
2013	17-Aug-2013	16,8
2014	23-Aug-2014	17,6
2015	04-Okt-2015	13,3
2016	09-Sep-2016	16,2
2017	09-Aug-2017	16,2
2018	23-Aug-2018	18,8
2019	25-Aug-2019	15,6
2020	15-Sep-2020	15,2
2021	24-Aug-2021	17,8



Jaam 3		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	22-Jul-2010	22,4
2011	15-Jul-2011	19,7
2012	07-Aug-2012	20,1
2013	18-Jul-2013	20,9
2014	18-Aug-2014	18,9
2015	16-Aug-2015	19,6
2016	09-Aug-2016	19,6
2017	07-Aug-2017	18,9
2018	08-Aug-2018	20,5
2019	03-Jul-2019	18,1
2020	11-Aug-2020	19,6
2021	21-Jul-2021	22,7

Joonis 2. Vasakul: jaamade 3, 6, 9 keskmised temperatuurid (°C) pinna- ja põhjakihis perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021; Paremal: maksimaalsete temperatuuride esinevus põhjakihis aastatel 2010 kuni 2021

Tabel 1. Põhjalähedase kihi temperatuuri muutlikkust iseloomustavad parameetrid Narva lahe transektil mudeli GETM andmetele perioodist 02-04-2010 kuni 03-09-2021

	9	8	7	6	5	4	3
geograafilised koordinaadid	26° 40' 30" 59° 36' 0"	26° 39' 56.25" 59° 35' 35.25"	26° 39' 22.5" 59° 35' 10.5"	26° 38' 48.75" 59° 34' 45.75"	26° 38' 15" 59° 34' 21"	26° 37' 41.25" 59° 33' 56.25"	26° 37' 7.5" 59° 33' 31.5"
kaugus jaam 1-st (km)	7.5	6.5	5.6	4.7	3.7	2.8	1.9
sügavus (m)	31.9	32.4	30.2	25.4	18.9	12.8	8.3
miinimum (°C)	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
maksimum (°C)	17.2	17.7	17.8	18.8	19.1	21.1	22.7
95. protsentiil (°C)	12.8	12.5	12.7	13.5	15.0	16.8	17.8
aritmeetiline keskmine (°C)	5.9	5.1	6.0	6.3	6.7	7.3	7.7
aritmeetiline keskmine (°C) juuni-juuli-august	6.1	6.0	6.5	7.6	9.3	11.4	13.3
mediaan (°C)	5.0	5.1	5.2	5.3	5.7	6.1	6.3

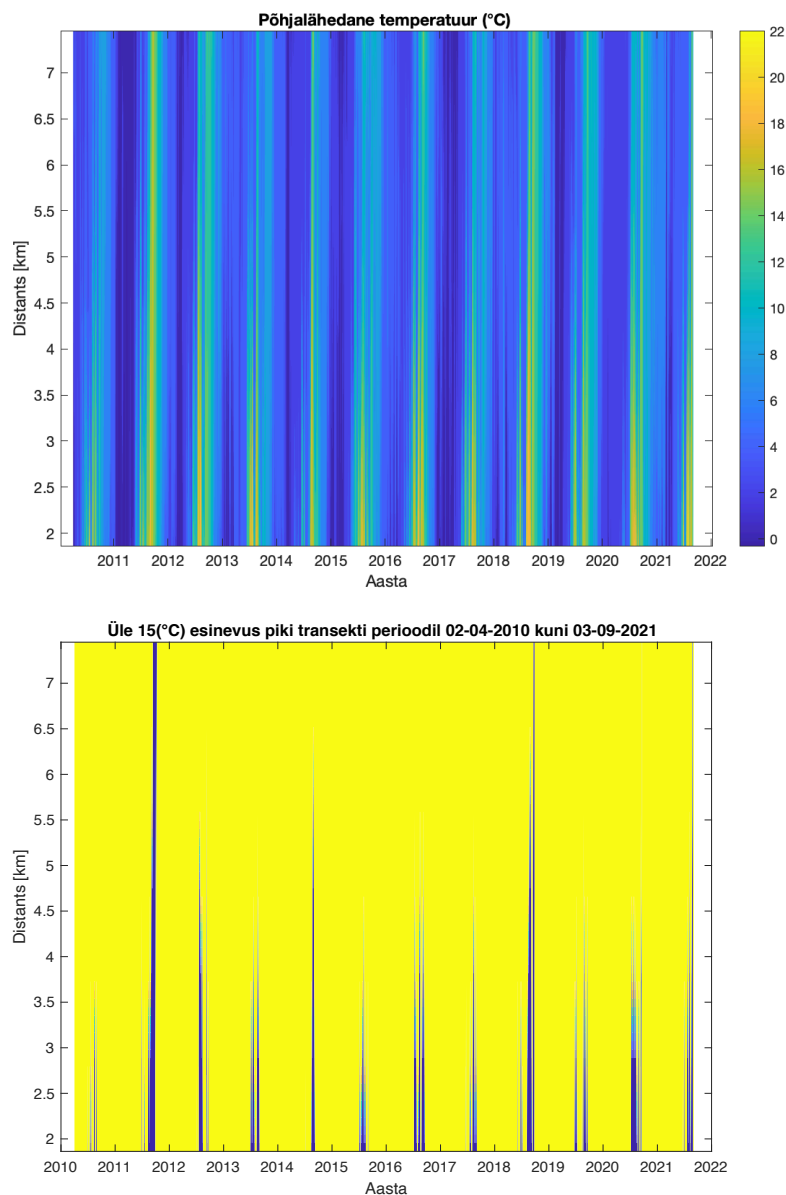
Tabel 1 põhjal võib järeldada, et temperatuurid on piki transekti üsna ühtlaselt muutuvad ja mediaanväärtused erinevad aritmeetilistest keskmistest vähesel määral. Maksimumtemperatuurid jäävad vahemikku 17 °C kuni 23 °C. Aegrea temperatuuristatistika ei pruugi anda piisavalt täpset ülevaadet, sest merevee temperatuurid varieeruvad oluliselt aasta jooksul. Seetõttu tuleb suvekuude temperatuuride hindamiseks vaadata neid eraldi.

95. Protsentiil (°C) eristab ekstreemsemaid temperatuurimuutusi normaalsetest. See näitab temperatuuri, mida ületavad ainult 5% selle jaama mõõtmistulemustest. Näiteks jaama nr 3 puhul on 95. protsentiil 17.8 °C, mis tähendab, et ainult 5% tervikust on temperatuur selles jaamas kõrgem kui 17.8 °C. Alates jaamast nr. 7 95% esinevatest temperatuuridest ei ületa 13 °C väärtust. Selle põhjal võib oletada, et enamjaolt üle 30 meetri sügavusel esinevatest temperatuuridest ei ületa samuti seda väärtust.

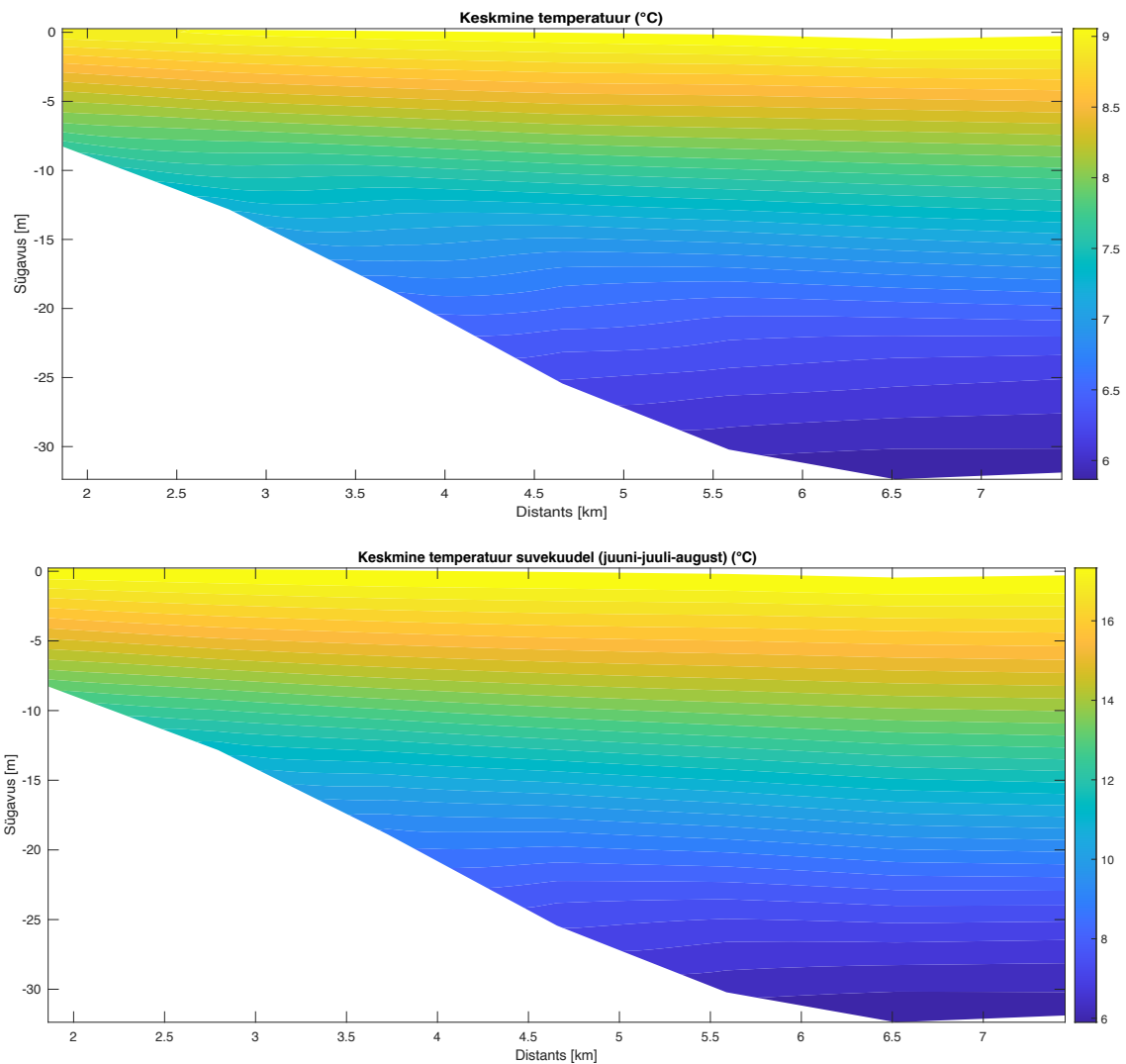
Kõigi jaamade keskmine 95. protsentiil on 14.5 °C. Et hinnata, kui sageli esineb temperatuure üle 15 °C, on kasulik uurida selle 5% andmete jaotust, andes ülevaate ekstreemsemate temperatuuride esinemise sagedusest. Edaspidiselt kirjeldatakse ekstreemsemate temperatuuride mõiste all üle 15 °C juhtumeid.

Joonis 3 näitab põhjalähedase kihi temperatuuri muutlikkust piki transekti perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021. Tuginedes eelnevale tabelile (tabel 1), varieeruvad

temperatuurid selle ajaperioodi jooksul vahemikus 23 °C kuni -0.3 °C. Kollased toonid ülemisel joonisel kujutavad kõrgemaid temperatuure, andes aimu millistel kuudel esineb soojem merevee temperatuur ja eeldavasti ka ekstreemsemad juhtumid. Alumisel joonisel on selgelt näha, et teatud ajaperioodidel on esinenud ekstreemsemaid temperatuure ka sügavamal kui 30 meetrit. Seda näitavad joonisel tumedamad jooned, mis aastatel 2011 ja 2018 ulatusid kaugemale kui 7 kilomeetrit. Neid äärmuslikke juhtumeid käsitletakse põhjalikumalt hilisemas peatükis.



Joonis 3. Põhjalähedase temperatuuri (°C) aegrida piki Narva lahe transekti perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



Joonis 4. Keskmise temperatuuri (°C) jaotus transekti ristlõikes (ülemine); Keskmise temperatuuri (°C) jaotus suvekuudel (juuni-juuli-august) transekti ristlõikes (alumine)

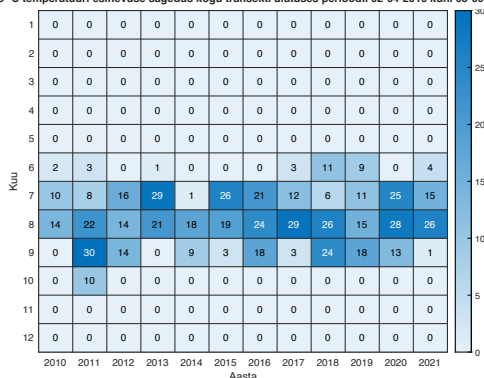
Vaadeldes keskmise temperatuuri muutlikkuse ristlõiget terve perioodi ulatuses ning suvekuudel, on märgatav selge temperatuuride erinevus (joonis 4). Lisas 2 on esitatud ka keskmise soolsuse jaotumise ristlõige terve transekti ulatuses. Ülemisel joonisel varieeruvad keskmised temperatuurid ühtlaselt 6 °C kuni 9 °C. Suviti (alumine joonis) on keskmine temperatuur ligikaudselt vahemikus 6 kuni 18 °C. On nähtav hüppeline temperatuuri muutus veemassi ülemise ja alumise osa vahel. Seda nähtust kirjeldatakse hooajalise stratifikatsiooni ehk kihistumisena. Termokliin esineb suvekuudel, tugevnenud päikesekiirgus soojendab pinnapealsemat vett ja segunemine alumiste kihtidega on kasvava temperatuurierinevuse tõttu piiratud. Soojem vesi on kergem ja jahedam vesi raskem, erineva tihedusega kihid ei segune, neid eraldab termokliin. Pealmine veemass

soojeneb seetõttu veelgi, hoides ära alumiste veemasside soojuse ülekandumist atmosfääri, seetõttu on ka veesamba alumised kihid suviti mõned kraadid soojemad.

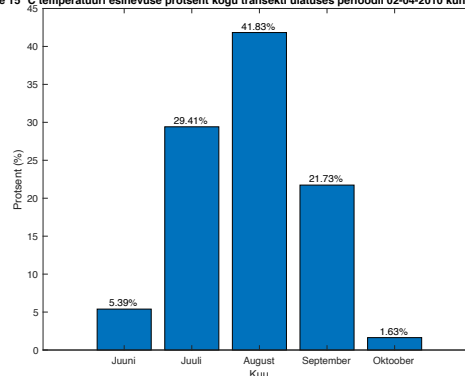
7.2 Ekstreemsete temperatuuride esinevuse sagedus põhjalähedases kihis

Joonis 5 kujutab üle 15 °C ööpäevade esinevuse sagedust kogu transekti põhjalähedases kihis. Üle 15 °C temperatuuride mediaanväärtus on 16.7 °C, keskmine temperatuur 16.9 °C. Nähtavasti esinevad üle 15 °C temperatuurid perioodil juuni-oktoober. Maikuus pole veel soojus merre akumulunud – Päikese soojuskiirgus ei ole nii intensiivne. Merevee temperatuur pole jõudnud tõusta suvekuude tasemele, seetõttu ei pruugi mais üle 15 °C päevi esineda. Suve jooksul merevesi soojeneb, siis esineb enim üle 15 °C päevi. Üldiselt on neid temperatuure enim esinenud augustis. Moodustades üle 41.8% kogujuhtumite arvust, järgnevad juuli- ja septembrikuu. Sügisel hakkab soojus järk-järgult eralduma atmosfääri ning merevee temperatuur taandub.

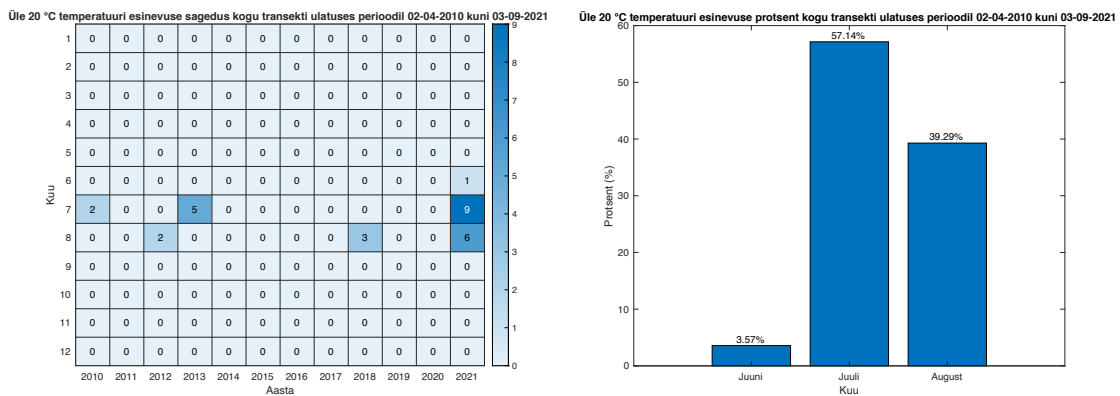
Üle 15 °C temperatuuri esinevuse sagedus kogu transekti ulatuses perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



Üle 15 °C temperatuuri esinevuse protsent kogu transekti ulatuses perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



Joonis 5. Üle 15°C ööpäevade esinevuse sagedus põhjalähedases kihis kogu transekti ulatuses perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



Joonis 6. Üle 20 °C temperatuuriga ööpäevade esinemise sagedus põhjalähedases kihis kogu transekti ulatuses perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

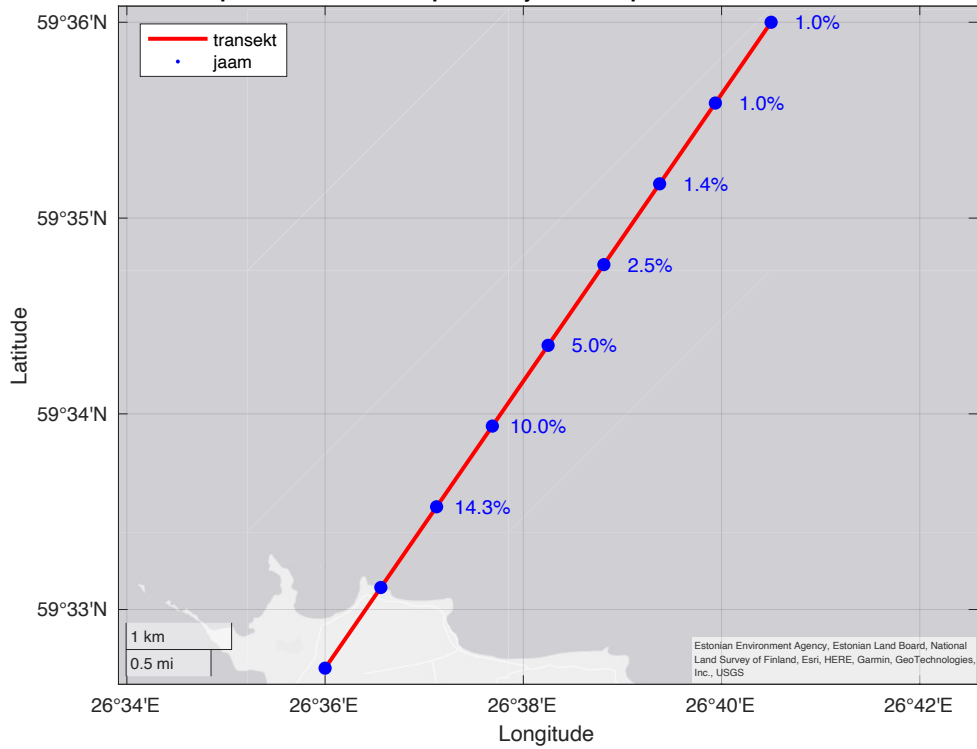
Joonis 6 on välja toodud üle 20 °C temperatuuride esinemise protsents. Võib järeldada, et 20 °C ületavad temperatuurid põhjalähedas kihis on pigem harvaesinevad juhtumid, avaldudes vaid mõningatel aastatel. Seega võib kokkuvõtvalt öelda, et üle 15 °C temperatuure esineb stabiilselt kogu suveperioodi vältel, kuid äärmuslikke (üle 20 °C) juhtumeid mitte.

7.3 Ekstreemsete temperatuuride esinemise sagedus piki transekti

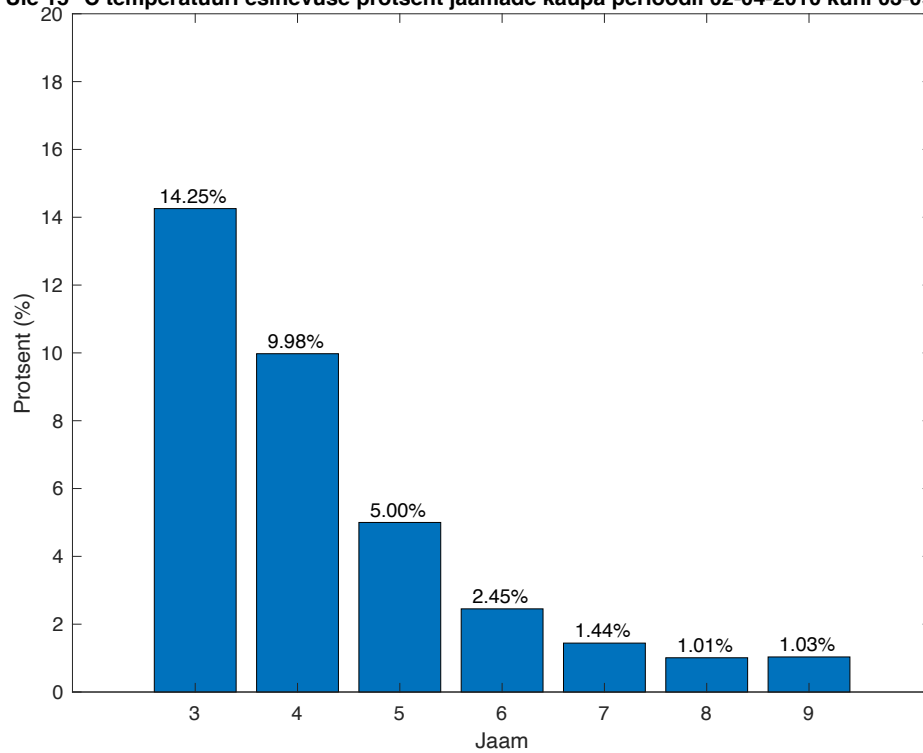
Oletuste kohaselt ilmnevad kõrgemad temperatuurid rannikule lähedamal, madalamates vetes. Selle kinnitamiseks uuriti ekstreemsemate temperatuuride esinemist piki transekti. Järgnevatele joonistele tuginedes võib kinnitada, et sügavuse kasvades väheneb üle 15 °C esinemise protsents (joonis 7). Näiteks jaam 3 puhul on üle 15 °C temperatuure kogu perioodi vältel esinenud 14.3%. Protsent kahaneb järk-järgult, jäädes 5.6 kilomeetri kaugusel, kus esinevad sügavused 30 meetrit, alla 2% piiresse. Sealtmaalt edasi jääb 15 °C esinemine stabiilselt alla 2%.

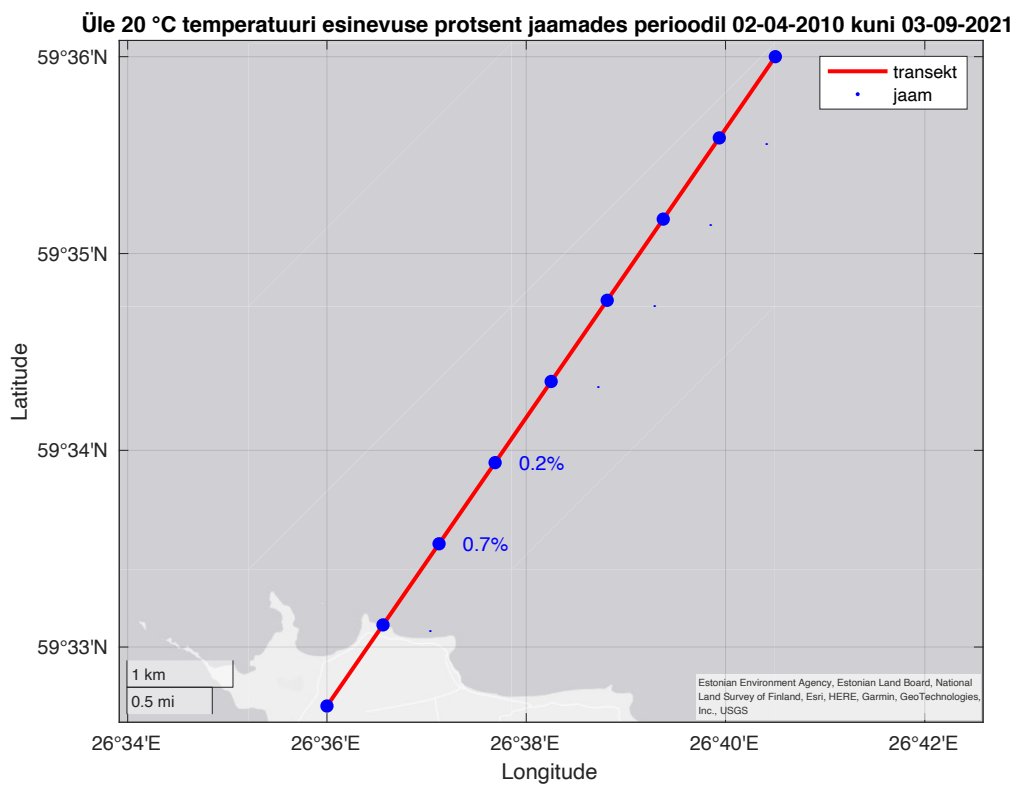
20 °C temperatuuride puhul on samuti tulemused oodatavad. Temperatuurid avalduvad ainult rannikuläheduses, kus sügavused on väikesed (jaam 4 sügavus 12.8 m, jaam 3 8.3 m) ning veesammas on suviti vertikaalselt segunenud. 20 °C temperatuure ei esine põhjalähedases kihis kaugemal kui jaam 4 ning esinemise protsents kogu temperatuuri aegreast on märkimisväärselt väike.

Üle 15 °C temperatuuri esinevuse protsent jaamades perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

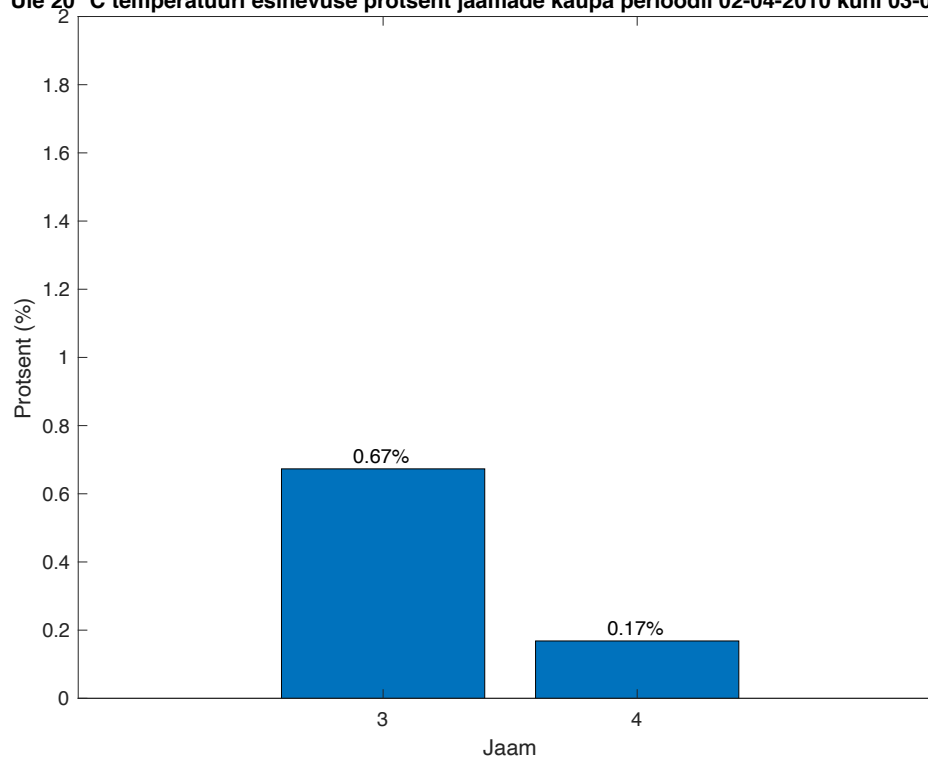


Üle 15 °C temperatuuri esinevuse protsent jaamade kaupa perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021





Üle 20 °C temperatuuri esinevuse protsent jaamade kaupa perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

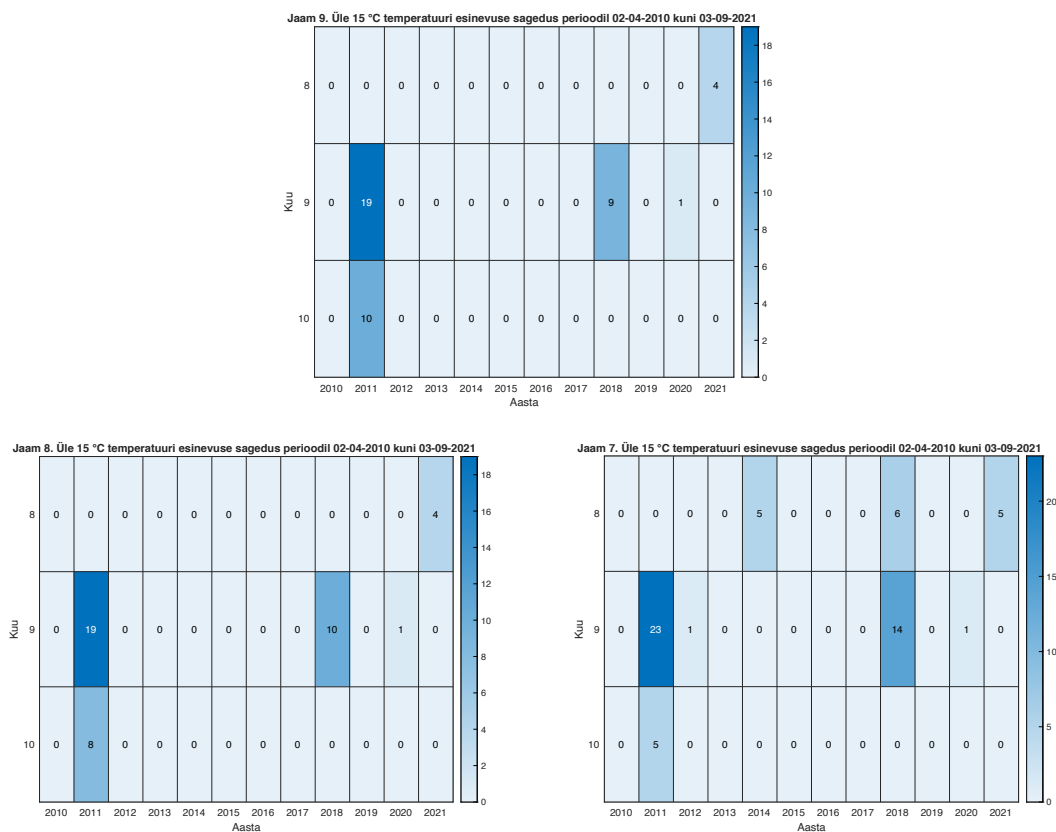


Joonis 7. üle 15 °C ja 20 °C esinevuse protsent jaamades perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

7.4 Ekstreemsete temperatuuride üksikjuhtumite analüüs

Lähtudes joonis 3 kirjeldusele, on teada, et mõningatel juhtudel võib sügavamatel aladel esineda samuti üle 15 °C temperatuure. Eelneva analüüsi põhjal võib järeldada, et need sündmused jäävad seal piirkonnas siiski alla 20 °C. Et paremini mõista neid äärmuslike juhtumeid, on otstarbekas analüüsida ekstreemsemaid temperatuure jaamade kaupa. Eesmärgiks võeti uurida esinevust sügavamal kui 30 meetrit, kus üle 15 °C esinevuse protsent kogu ajaperioodi vältel jääb alla kahe protsendi. Seega on vaatluse all jaamad 7, 8, 9 (joonis 8). Ülejäänud jaamade 15 °C esinevuse sagedus on esitatud lisas 3.

Alumised graafikud kinnitavad ekstreemsemate temperatuuride perioode sügavamal kui 30 meetrit. Jaama 9 puhul, mis asub transekti alguspunktist 7.5 kilomeetri kaugusel, sügavusega 31.9 meetrit, on avaldunud ekstreemsemaid temperatuure nii aastatel 2011, 2018 kui ka 2020, 2021. Sarnast mustrit on näha ka jaamades 7 ja 8.



Joonis 8. Üle 15 °C temperatuuri esinevuse sagedus perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

Aastal 2011 registreeriti jaamas nr. 9 veesamba põhjalähedases kihis 29. järjestikusel päeval üle 15 °C temperatuure. Ajavahemiku 12. september kuni 11. oktoober keskmine temperatuur oli 15.9 °C. Veesamba vertikaalse profiili analüüs konkreetses punktis (jaam 9) võimaldab teha oletusi, mis võib põhjustada kõrgemaid temperatuure põhjalähedases kihis.

7.5 Temperatuuri vertikaalprofiilid

Võetud on jaam 9 vertikaalsed temperatuuriprofiilid 10-päevaste vahedega perioodi algushetkest kuni 15 °C temperatuuride esinemiseni (12.09.2011 – 11.10.2011) (joonis 9 vasak veerg).

12. septembri profiili puhul on näha tavalist temperatuurijaotust – sügavuse kasvades temperatuur langeb. Varieerudes ligikaudselt 15 °C põhjakihis kuni 17 °C-ni pinnapealses kihis. Selgelt on eristatav termokliin ligi 14 m sügavusel. Sellest ülevamal on veesammas läbisegunenud. 22. septembri puhul on samuti tegemist temperatuuri normaalse jaotusega. 2. oktoobri vertikaalprofiili puhul on näha, et veesamba põhjaosas on temperatuurid suuremad kui pinnal, samas on erinevus väike – 14.9 °C kuni 15.2 °C. Veesamba alumises osas on näha temperatuuri kõikumist, mis järgnevalt kahaneb stabiilselt kuni 15 m sügavuseni, pinnakihi jääd temperatuur muutumatult kujul 14.9 °C juurde. 10. oktoobri profiililt on selgelt nähtav suurenenud temperatuurivahemik pinna- ja põhjakihi vahel (2 °C). Jällegi on põhjakihis temperatuurid suuremad. Temperatuur kahaneb järk-järgult kuni veepinnani.

Homogeenset veesamba struktuuri, kus põhjakihi temperatuurid ületavad 15 °C lävendit, (nii aastal 2011, kui ka tõenäoliselt aastatel 2018, 2021 ja 2021) on võimalik selgitada tavapärase sügise jahtumisega. Samas võivad need sündmused viidata ka pealisvee sukeldumise esinemisele. Nähtust on pikemalt kirjeldatud peatükis „Soome lahe füüsikaline kirjeldus“.

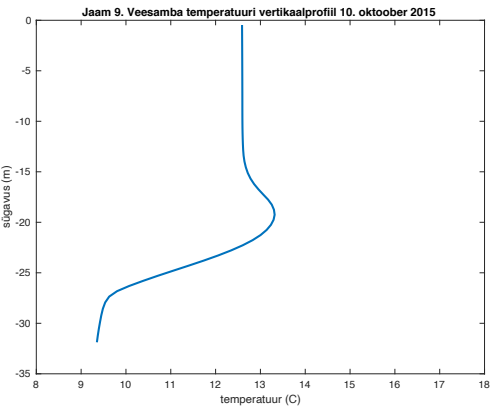
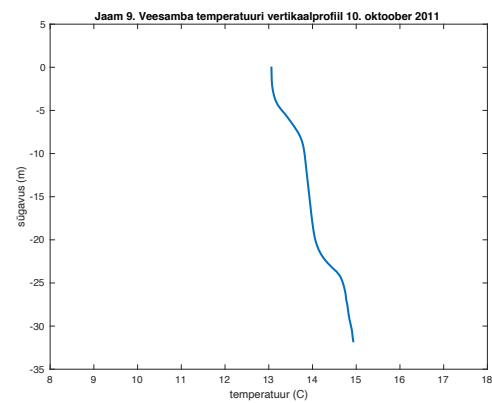
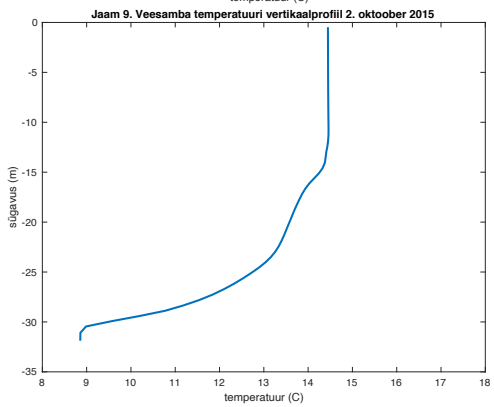
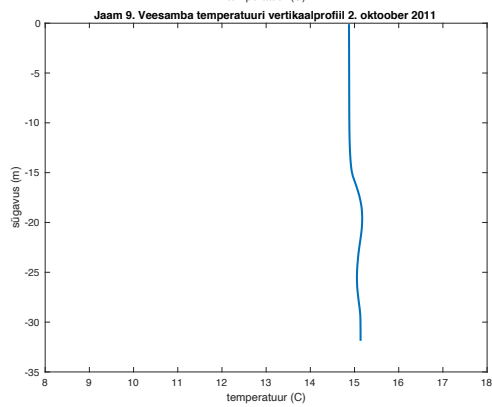
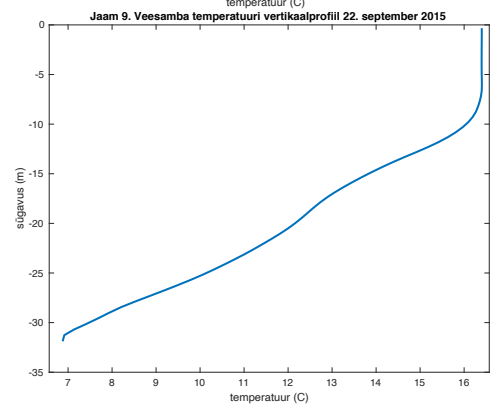
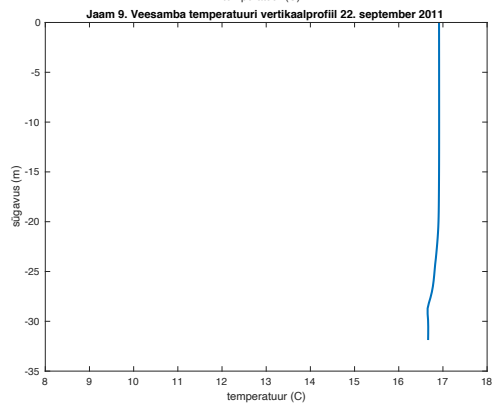
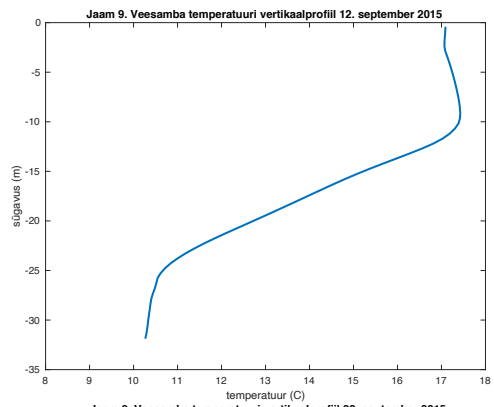
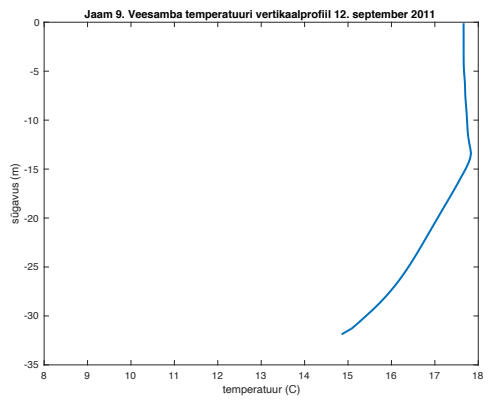
Kokkuvõtvalt tekitab pealisvee sukeldumine kõrgemate temperatuuridega vee liikumist veesamba põhjakihti, mille tagajärjel toimub soojusvahetus ning veesamba struktuur ühtlustub. Soodsate tingimuste korral jõuab põhjakihti veelgi soojemat pinnapealset vett,

seetõttu võib tekkida olukord kus põhjakihis, näiteks 30 meetri sügavusel on paar kraadi soojem vesi kui pinnapealses kihis.

On selgelt näha, et 22. septembriks 2011 oli veesamba temperatuur ühtlustunud. Sügisel, madalamate atmosfääri temperatuuride tõttu hakkavad ka veesamba ülemiste kihtide temperatuurid langema. See on tingitud soojusülekandest merevee ja atmosfääri vahel, põhjustades temperatuurilangust veesamba ülemises osas. Alumises osas on jahtumine aeglasem, kuna puudub otsene kokkupuude atmosfääriga. Järjepidevalt vähenev temperatuur pinnakihi ja soojemate põhjalähedaste kihtide tõttu toimub veesamba vertikaalne segunemine ehk konvektsioon. Seetõttu võib sügiseti olla veesammas ühtlase struktuuriga.

Võrdluseks on toodud sama perioodi 2015. aasta temperatuuri vertikaalprofiilid (joonis 9 parem veerg). Sel perioodil põhjakihis üle 15 °C temperatuure ei esinenud. Kõige suurem erinevus kahe aasta tulemuste vahel on temperatuuri muutlikkus pinna- ja põhjakihi vahel. Kui 2011. aastal muutus temperatuur veesambas enamjaolt paari kümnendiku võrra, siis 2015 puhul varieerus temperatuur 7 °C kuni 17 °C. 2. ja 10. oktoobri profiilidel on näha vastupidist temperatuurijaotust. 2015. aasta puhul on tegemist tavapärase muutlikkusega veesambas.

Võib järeldada, et jahutusvee jaoks ekstreemsemad temperatuurid põhjalähedases kihis võivad esineda eriti hilissuvel või sügisel. Seda võib põhjustada nii sügisene jahtumine kui ka daunvellingu esinemine. Vähene temperatuuritõus põhjalähedases kihis on segunemisel tavapärane nähtus, kuid 2011. aastal esinenud temperatuuritõus on iseäralik juhtum. Selline äärmuslik temperatuuritõus pole tavapäraselt perioodile september-oktoober iseloomulik.

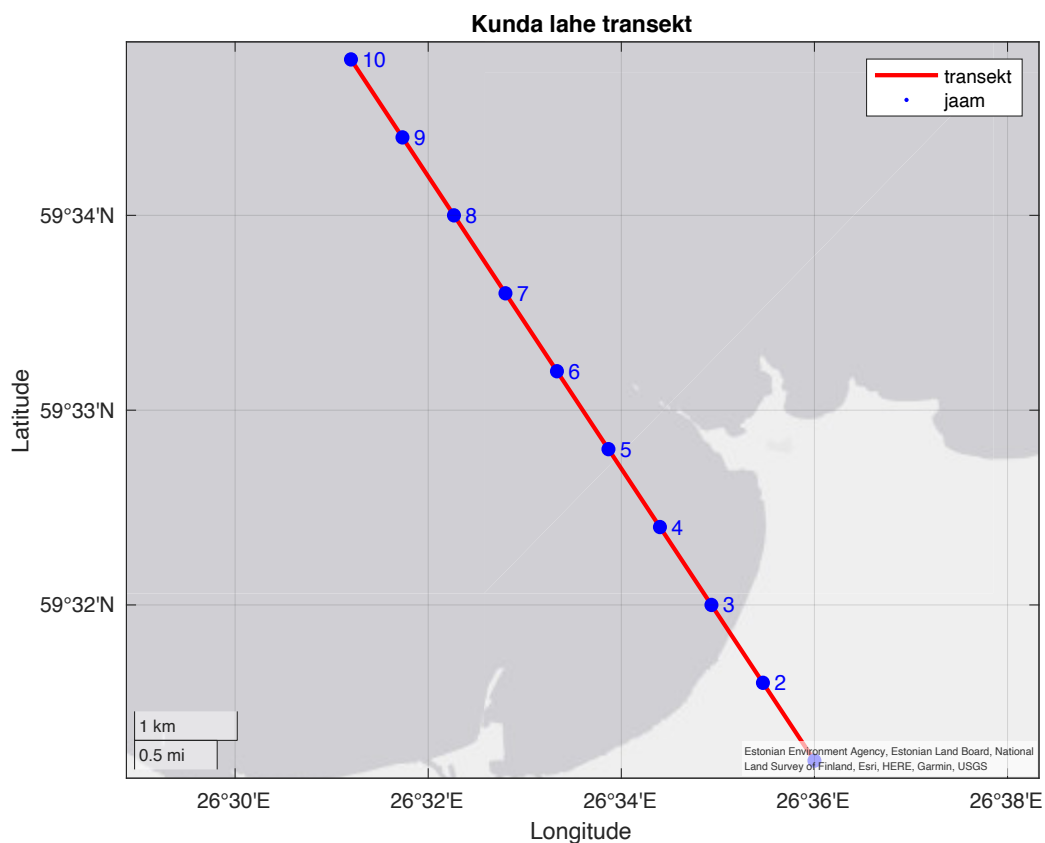


Joonis 9. Jaam 9 veesamba temperatuuri vertikaalprofiilid perioodil 12.09 – 10.10 aastatel 2011 (vasak) ja 2015 (parem)

8 Kunda transekt

Kunda lahe transekt kulgeb 8 kilomeetrit lahesopist loodesse. Mõõdistusandmed algavad jaamast nr 4 (joonis 10). Kunda lahe puhul on oluline, et soojenenud jahutusvesi hajuks efektiivselt merre. Soojenenud jahutusvee tihedus on merevee omast väiksem ning seega liigub eelnevalt kirjeldatud asjaoludel veesamba pinnapealsemasse kihti. Seetõttu keskenduti antud juhul pinnahoovuste uurimisele. Hoovuskiiruste suund ja intensiivsus on olulised tegurid mõistmaks vee liikumist antud piirkonnas.

Järgnev analüüs katab perioodi 02-04-2010 kuni 03-09-2021 tulemusi transekti pinnapealsemas kihis. Lisas 2 ja 4 on esitatud ka Kunda transekti soolsuse- ja temperatuurijaotuse ristlõiked.

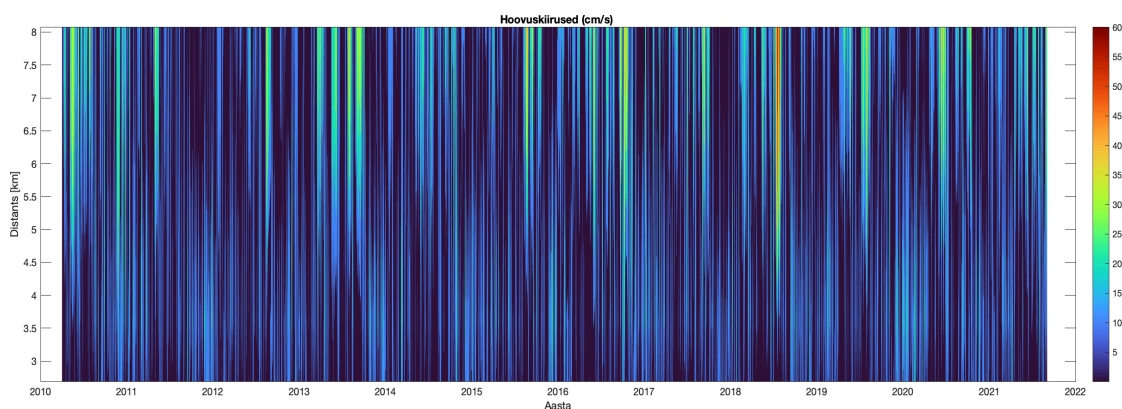


Joonis 10. Kunda lahe transekti asendiplaan

8.1 Hoovuskiiruste muutlikkus

Allpool paikneval graafikul (joonis 11) on näha terve aegrea vältel piki transekti esinenud pinnakihi hoovuskiirused. Esmalt on märgata, et suurimad hoovuskiirused esinevad transekti teises pooles, ulatudes mingil perioodil isegi üle 60 cm/s, transekti rannikupoolsemas osas on kiirused tunduvat väiksemad. Nähtavalt muutuvad hoovuskiirused nii ruumis kui ka ajas. Terve transekti ulatuses on võimalik eristada madalamate kiirustega perioode. Võib järeldada, et mingitel perioodidel on pinnahoovused oluliselt aeglasemad.

Analüüsidest distantsi ja kiiruste suhet, näib, et hoovuskiirused sõltuvad ka kaugusest rannikust. Siinjuhul tuleb võtta arvesse asjaolu, et Kunda laht on idapoolsemast küljest piiritletud Letipea neemega ning üleüldiselt suhteliselt kaarja kujuga. See faktor võib mängida olulist rolli lokaalse hoovuste dünaamika kujunemisele. Kunda lahe transekti asendiplaanilt on näha (joonis 10), et alates jaamast 6 ei ole neeme takistus enam märkimisväärselt suur ning transekt on ka ida-läänesuunaliselt ülejäänud lahega üsna avatud. Tabel 2 andmete kohaselt on jaam 6 transekti alguspunktist 4.5 kilomeetri kaugusel. Võttes arvesse viimasena mainitud asjaolusid ja uurides joonist 11, on näha et ligikaudselt sama distantsi juures intensiivistuvad ka hoovuskiirused.



Joonis 11. Hoovuskiirused (cm/s) piki transekti pinnakihti perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

Tabel 2. Mere pinnakihi hoovuste muutlikkust iseloomustavad parameetrid Kunda lahe transektil mudeli GETM andmetel perioodist 02-04-2010 kuni 03-09-2021

jaama nr	10	9	8	7	6	5	4
geograafilised koordinaadid	26° 31' 12" 59° 34' 48"	26° 31' 44" 59° 34' 24"	26° 32' 16" 59° 34' 0"	26° 32' 48" 59° 33' 36"	26° 33' 20" 59° 33' 12"	26° 33' 52" 59° 32' 48"	26° 34' 24" 59° 32' 24"
kaugus jaam 1-st (km)	8.0	7.2	6.3	5.4	4.5	3.6	2.7
sügavus (m)	20.8	19.4	17.0	13.8	9.9	6.6	4.8
miinimum (cm/s)	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0
maksimum (cm/s)	65.1	62.2	58.5	50.5	36.3	32.7	26.6
5. protsentiil (cm/s)	1.8	1.8	1.8	1.9	2.1	2.2	1.6
aritmeetiline keskmine (cm/s)	12.0	10.9	9.9	9.3	9.5	9.7	7.8
mediaan (cm/s)	9.2	8.4	8.0	7.8	8.3	8.6	6.9

Tabel 2 kinnitab asjaolu, et hoovuskiirused kasvavad rannikust kaugenedes. Aritmeetilised keskmised terve transekti ulatuses on järk-järgult kasvavad, jäädes ligikaudselt 10 cm/s piiresse – seda võib pidada mõõdukaks kiiruseks. Suur kiiruste erinevus transekti kaugeima ja rannikule lähima jaama vahel tuleb välja pigem ekstreemsemate kiiruste väärtustest. Maksimaalsed kiirused varieeruvad 65.1 cm/s kuni 26.6 cm/s, samas kui minimaalsed väärtused on transektil üldiselt sarnased, v.a jaamades 6 ja 5, kus minimaalsed kiirused on teistega võrreldes suuremad. Samuti on 5. protsentiili väärtus neis jaamades suurem. Võib järeldada, et rannikust kaugemal on hoovuskiirused üldiselt suuremad, kuid jaamades 6 ja 5 on aeglased hoovuskiirused vähem levinud.

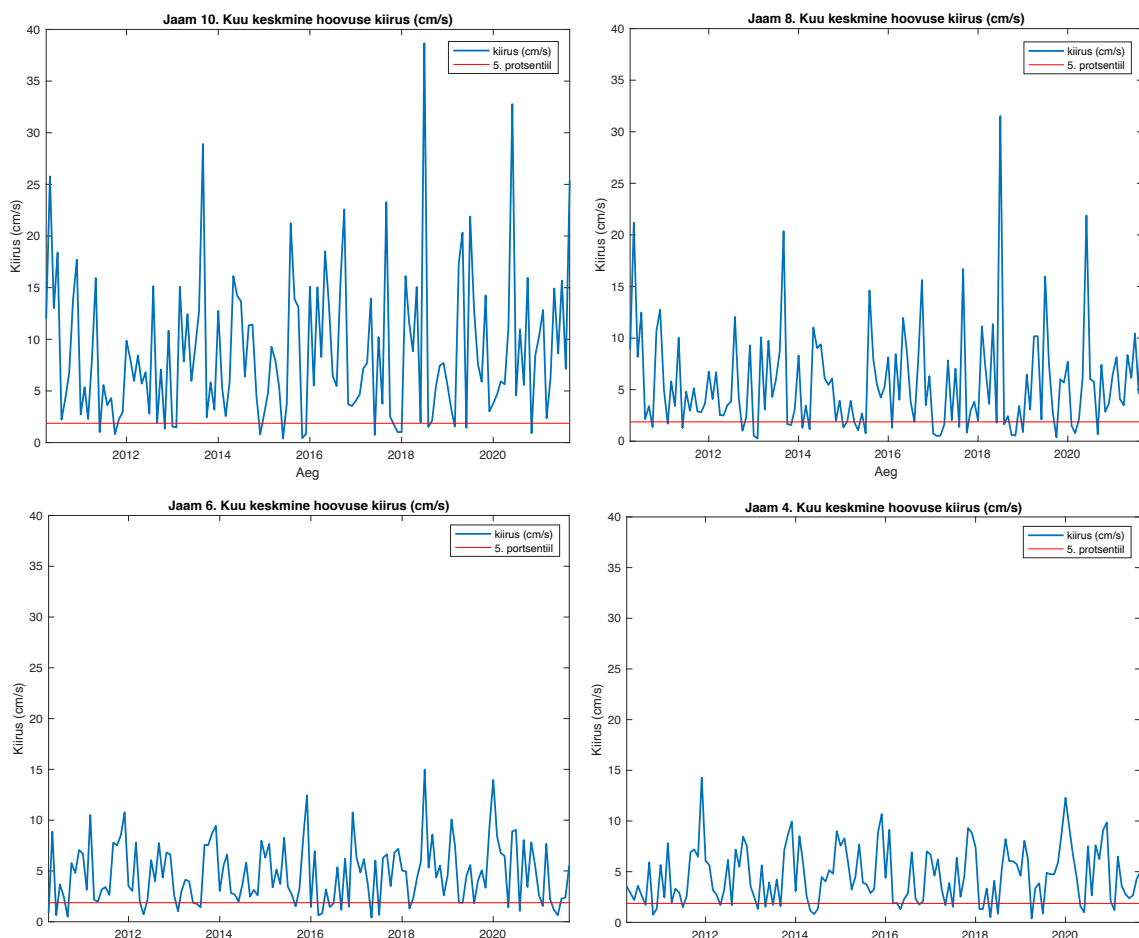
5. protsentiil näitab, et vaid 5% tervest aegrea andmetest on hoovuskiirused väiksemad kui antud väärtus tabelis. Kogu transekti 5. protsentiil on 1.9 cm/s. Nagu varasemalt selgitatud, siis jahutusvee efektiivseks laialikandumiseks on vaja piisavat vee liikuvust. Seetõttu vaadeldi edaspidi selle 5. protsentiili esinevust, et teada saada millistel juhtudel võivad äärmuslikult madalad kiirused esineda.

8.2 Hoovuskiiruste aegread jaamade kaupa

Allpool paiknevatel graafikutel (joonis 12) on välja toodud kuu keskmistatud hoovuskiirused jaamades 10, 8, 6 ja 4. Ülejäänud jaamade graafikud on esitatud lisas 5. Need graafikud toetavad eelnevas alampeatükis kirjeldatud. Punane joon näitab 5. protsentiili väärtust jaamapõhiste tulemuste suhtes.

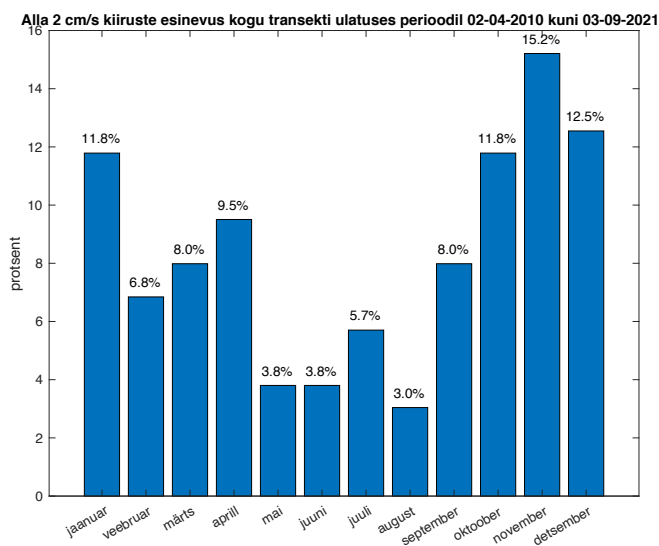
On märgata üldist kiiruste kasvu jaamade kaugenemisel rannikust. Jaam 10 puhul varieeruvad kiirused enamjaolt vahemikus 0 kuni 25 cm/s, äärmuslikel juhtumitel esineb hoovuskiirusi ka üle 38 cm/s. Jaam 8 puhul on näha, et suuremal määral kõiguvad kiirused vahemikus 0 kuni 15 cm/s, samuti esineb ka siin ekstreemsemaid juhtumeid. Jaama 6 ja 4 puhul selget erinevust ei esine – mõlema jaama puhul jäävad kiirused keskmiselt 10 cm/s piirsesse. Kiiruste esinemise sagedust ning suunalist jaotust on detailsemalt kirjeldatud järgnevas alapeatükis.

Võttes arvesse 5. protsentiili (1.9 cm/s) punast joont ning uurides alla selle väärtuse jäävaid tulemusi, võib kokkuvõtvalt öelda, et üldist mustrit alla 5. protsentiili tulemuste suhtes ei kujune. Neid kiirusi esineb näiteks nii juunis, märtsis, novembris, jaanuaris kui ka septembris.



Joonis 12. Kuu keskmine hoovuse kiirus perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021 jaamade kaupa

Järgneval tulpdiagrammil (joonis 13) on kirjeldatud parema arusaama kujundamiseks toodud välja alla 2 cm/s (5. protsentil 1.9 cm/s) esinevate kiiruste protsent iga kalendrikuu kohta. Tulpdiagrammilt on näha et 5. protsenti esineb aastaringselt üsna stabiilselt. Vähem esineb alla 2 cm/s kiiruseid suveperioodil. Talviti mõjutab hoovuskiiruseid jääkatte olemasolu. Samas on näha madalamaid kiiruseid eriti perioodil oktoober-detsember, kui jääkatet ei esine. Nagu töös varasemalt selgitatud, siis pinnahoovused on suuresti mõjutatud tuulte muutlikkusest ja seetõttu on üldise kokkuvõtliku pildina pinnahoovuste režiimi raske kirjeldada. Täpsemaks hinnanguks oleks vaja läbi viia spetsiifilisi mõõdistusteid ja saadud tulemusi võrrelda.



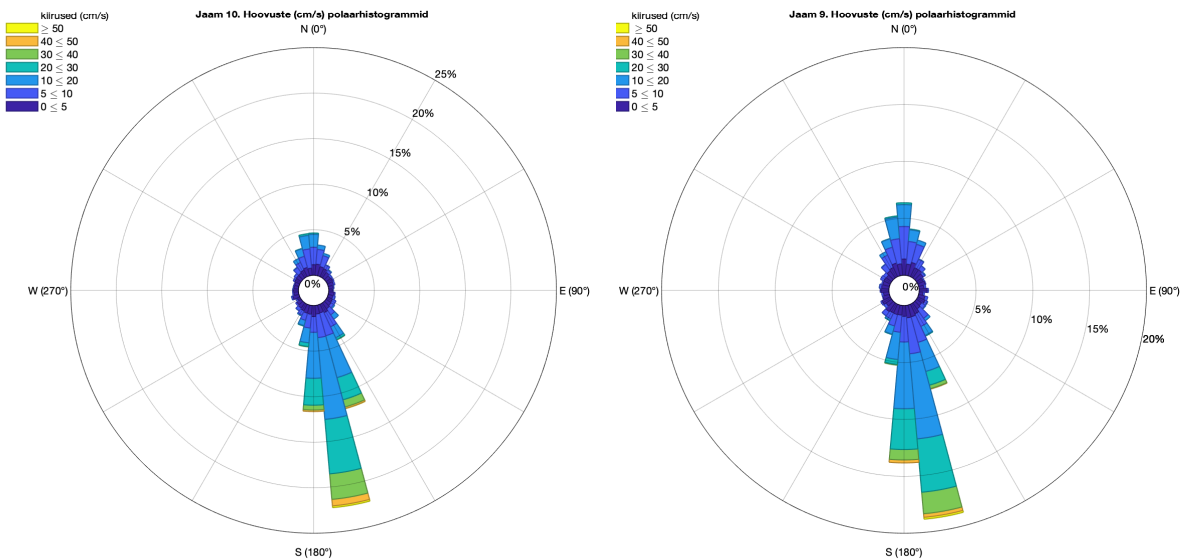
Joonis 13. Alla 2 cm/s hoovuskiiruste esinevuse protsent kogu transekti ulatuses perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

8.3 Hoovuste polaarhistogrammid jaamade kaupa

Allpool joonistel on toodud jaama-põhised hoovuskiiruste polaarhistogrammid, kajastades vahemikku 02-04-2010 kuni 03-09-2021. Joonised annavad ülevaate hoovuste peamistest suundadest ning kiiruste jaotusest.

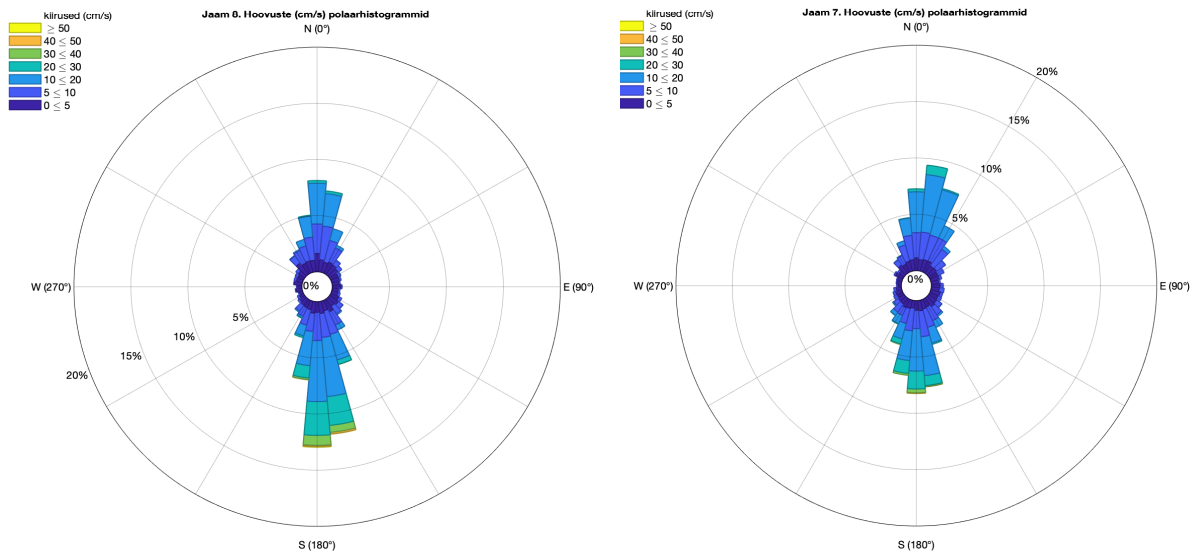
Jaamade 10 (8 km transekti alguspunktist) ning 9 (7.2 km transekti alguspunktist) tulemused on suhteliselt sarnased, mõlema puhul on valdav suund SSE (joonis 14). Vähesel määral avalduvad ka põhjasuunalised hoovused, kuid nende osakaal on minimaalne. Enamjaolt on tegemist 10 kuni 30 cm/s hoovustega. Väiksemas ulatuses

esinevad ka äärmuslikud kiirused üle 50 cm/s. Lõunasuunalisi hoovusi võib põhjendada asjaoluga, et Kunda laht on täielikult avatud ainult põhja-suunas ning seega on lõunatuulte esinemine teatud määral takistatud. Kunda lahe tuulterežiimi on varasemalt uurinud Soomere ja Keevallik 2003.



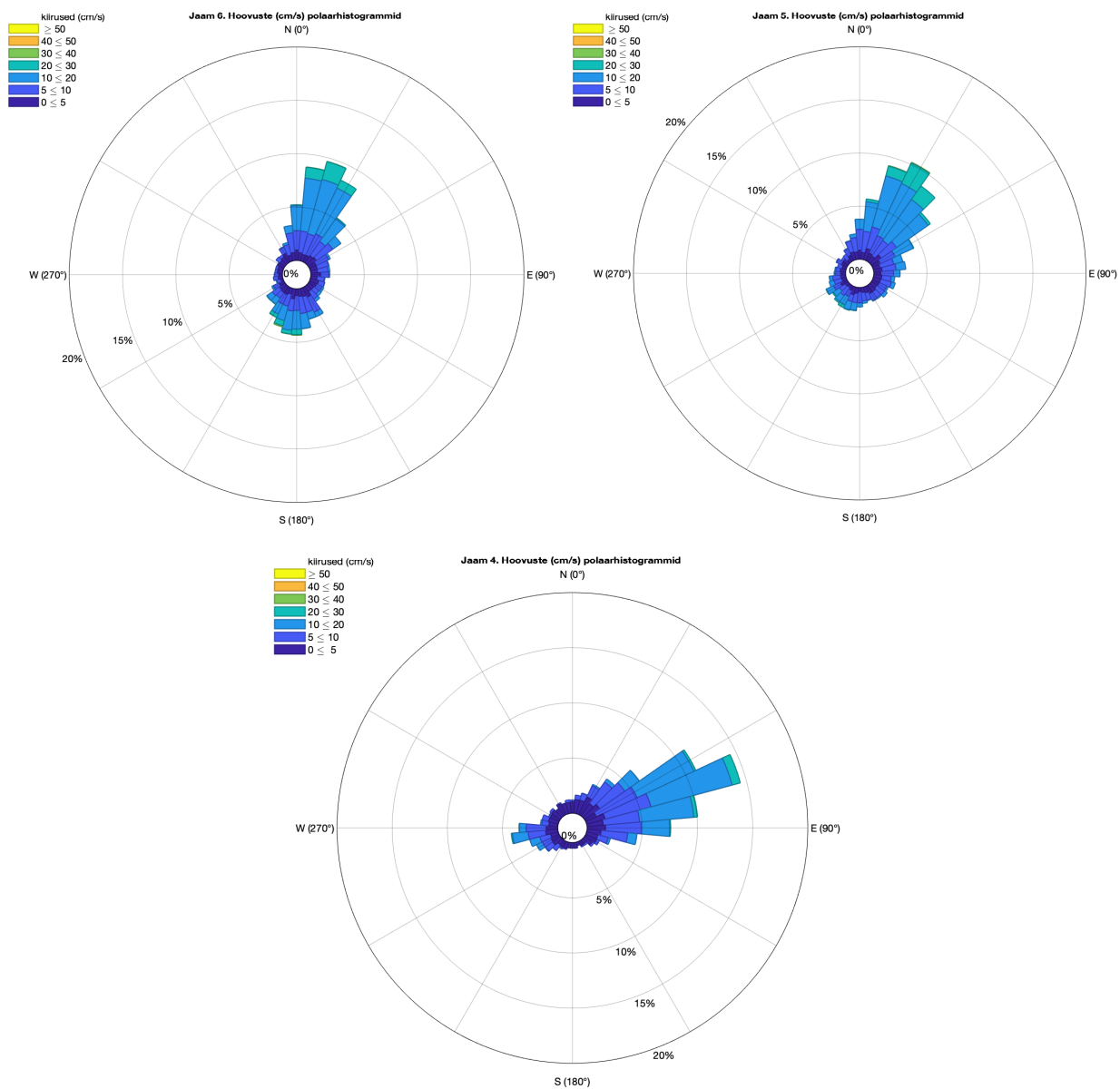
Joonis 14. Jaamade 10 ja 9 polaarihogrammide perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

Joonisel 15 jaamade 8 (transekti alguspunktist 6.3 kilomeetrit) ja 7 (transekti alguspunktist 5.4 kilomeetrit) puhul on ülekaalus N- ja S-suunalised hoovused. Kui jaam 8 puhul on märgatav S-suunaline ülekaal, siis jaam 7 puhul on propotsioon võrdne. Võttes arvesse ka jaamad 10 ja 9, on põhjasuunaliste hoovuste osakaal kasvutrendis. 20 kuni 30 cm/s kiiruste sagedus on vähenenud, lisaks ei esine enam ekstreemselt suuri kiirusi. Mõõdukate (20 kuni 10 cm/s) hoovuste osakaal on teiste jaamadega sarnane. Alla 5 cm/s kiiruste sagedus on kõikide eelmainitud jaamade puhul püsivalt väike.



Joonis 15. Jaamade 8 ja 7 polaarhistogrammide perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

Alumistel polaarhistogrammidel (joonis 16) on selgelt näha hoovuste suunamuutust. Kuna need jaamad (6, 5 ja 4) asetsevad rannikule lähemal, võivad hoovused nendes jaamades olla suuremal määral mõjutatud ranniku kujust. Jaam 6 ja 5 puhul on hoovused peamiselt suunaga NNE, jaam 4 on pinnahoovused suunatud ENE. Jaamades 6 ja 5 hoovuskiirused suuremal määral ei erine, enim esineb 10-20 cm/s kiiruseid. Jaam 4 puhul on näha alla 10 cm/s kiiruste osakaalu suurenemist, samuti on näha ka alla 5 cm/s kiiruste sagenemist. Üle 30 cm/s hoovuseid ei esine üheski jaamas.



Joonis 16. Jaamade 6, 5 ja 4 polaarihogrammide perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

Kokkuvõte

Uurimistöö keskendus hoovuste, vee temperatuuri ja veesamba kihistatuse analüüsimisele kavandatava tuumaelektrijaama jahutusvee sissevõtu ja väljalasuvõimalikes piirkondades. Põhistsenaariumi kohaselt saab tuumaelektrijaam jahutusvee Narva lahest ning seejärel suubub Kunda lahte. Töö põhieesmärk oli analüüsida nimetatud merefüüsikalisi parameetreid, et oleks võimalik esialgselt hinnata millised piirkonnad Kunda- ja Narva lahes on kõige sobivamad sissevõtu- ja väljalasketorude suublatsiks. Analüüsis kasutati TalTech Meresüsteemide Instituudi GETM mudeltulemusi perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021 horisontaalse lahutusega 1 km. Järgnevalt on esitatud uurimistöö peamised järeldused ja olulisemad tulemused.

Narva lahe puhul uuriti temperatuuri varieeruvust põhjakihis, toetudes 95. protsentiili ületatavate juhtumite analüüsimisele. Neid käsitleti töös ekstreemsete temperatuuridena, mis ületasid 15 °C lävendit. Selgus, et temperatuurid üle 15 °C esinevad peamiselt suvekuudel ning tegemist on perioodilise eripärasusega.

Samuti leiti, et sügavuse suurenedes kahaneb kõrgemate temperatuuride esinemine. Transekti esimeses pooles väheneb üle 15 °C temperatuuride esinemise protsent järkjärgult. Alates jaamast nr 7 jääb esinemissagedus stabiilselt ühe protsendi tasemele ning olulist muutust edaspidiselt ei täheldatud. Üle 20 °C temperatuurid põhjakihis on aga harvad ning esinevad vaid rannikulähedastes madalamates vetes.

Analüüsi käigus leiti, et teatud instantsidel võib ka transekti kaugema osas vähesel määral esineda ekstreemsemaid temperatuure. Veesamba vertikaalprofiili analüüsides järeldati, et see võib viidata pealisvee sukeldumise esinemisele. Kuid tuleb rõhutada, et mõningane temperatuuritõus hilissuvel ja sügiseti on põhjalähedases kihis tavapärane.

Lühidalt võib öelda, et merevee temperatuurid põhjalähedases kihis ületavad harva 20 °C piiri, kuid temperatuure üle 15 °C esines terve transekti ulatuses. Kõrgemad temperatuuri esinevad peamiselt suvekuudel ja madalamates vetes, samas kui sügavamates vetes ning sügisetalvisel perioodil püsivad temperatuurid enamjaolt madalad.

Kunda lahe transekti puhul analüüsiti pinnahoovuste dünaamikat. Oluline on tagada, et hoovuskiirused oleksid piisavad soojenenud vee efektiivseks hajumiseks, selleks tuleks väljalask planeerida piisavalt intensiivsete hoovustega piirkonda. Uuritud jaamade tulemused näitavad kaugemas otsas (jaamad 10 ja 9) peamiselt lõuna- ja põhjasuunaliste hoovuste domineerimist – valdav suund on SSE ning vähesel määral esinevad ka N-suunalised hoovused. Kiirused jäävad enamasti vahemikku 10 kuni 30 cm/s.

Rannikule lähedamal on märgata (jaamad 8 ja 7) põhjasuunaliste hoovuste intensiivistumist ning lõunasuunaliste hoovuste osakaalu kahanemist. Enim esineb kiirusi vahemikus 10 kuni 20 cm/s.

Lahesopis on pinnahoovused suuresti mõjutatud ranniku kujust ja seda on märgata ka tulemustest. Jaamade 6 ja 5 puhul muutuvad pinnahoovused NNE-suunaliseks. Ülekaalus on mõõdukad, 10 kuni 20 cm/s hoovused. Alla 5 cm/s kiirustega hoovuste osakaal on kõikides eelmainitud jaamades püsivalt väike.

Rannikule lähim, jaam nr 4 on enim mõjutatud lahe kujust ning peamine suund on ENE. Valdavalt on esindatud on alla 10 cm/s kiirused, teiste jaamadega võrreldes esineb sagedamini ka kiiruseid alla 5 cm/s.

Lisaks jaamapõhiste analüüsile, uuriti ka hoovuste ajalist muutlikkust, et saada informatsiooni millal võivad äärmuslikud madalad kiirused esineda. Analüüsides 5. protsentiili perioodilist sagedust, st äärmuslikult madalate kiiruste esinemist, leiti et alla 2 cm/s kiiruste esinemisel ei ole selget mustrit. Neid kiirusi esineb stabiilselt aastaringselt.

Kokkuvõttes võib öelda, et hoovuste dünaamika Kunda lahes on väga mitmekesine. Transekti kaugemas osas esinevad suurimad hoovuskiirused. Rannikul lähedamal on kiirused märgatavalt väiksemad. Kuid tuleb tähelepanu pöörata, et jaamades 6 ja 5 on aeglasemad hoovuskiirused väiksema osakaaluga. Hoovuskiiruste kõikumist on mingil määral eristatav ka periooditi kui talvel jääkatte olemasolu korral on kiirused aeglasemad. Hoovuste suunad sõltuvad suuremal määral tuulte režiimist, ranniku lähedusest ning lahe avatusest merega. Seetõttu on oluline märkida, et hoovusanalüüsi peaks suhtuma

kriitilise pilguga, kuna pinnahoovused on keeruka struktuuriga ja sõltuvad suuresti tuulte muutlikkusest.

Konkreetsimate otsuste tegemine eeldab täiendavaid analüüse. Antud töö annab üldise pildi valitud transektide parameetrite kohta. Täiendav uurimistöö võiks keskenduda kitsamalt kindlale piirkonnale, arvestades tellija vajadusi ja kriteeriumeid. See hõlmaks täiendavate mõõtmiste läbiviimist ja põhjalikumaid analüüse, mis suunaksid tähelepanu spetsiifilisematele aspektidele või piirkonnale. Sellised täiendavad uuringud süvendaksid arusaamist uuritava ala kohta ning võimaldaksid anda täpsemaid soovitusi või teha täpsemaid otsuseid vastavalt projekti nõuetele.

Summary

The author of "Analysis of currents, water temperature and water column stratification in the possible cooling water intake and outlet areas of the proposed nuclear power plant," is Luise Kompus, who conducted this research as part of their bachelor's diploma. The main part of this thesis consists of 37 pages and 16 figures, 2 tables, and a total of 20 reference sources were used. The analysis utilizes data from the Institute of Marine Systems at Tallinn University of Technology (TalTech). The analysis was commissioned by Fermi Energia AS.

Estonia is currently exploring the possibility of adopting nuclear energy as a source of power. One crucial aspect is determining the most suitable location for the intake and discharge pipes of the nuclear power plant. This holds significant importance in terms of safeguarding the environment and ensuring comprehensive nuclear safety. This involves analyzing various marine physical parameters in the area, including periodic characteristics, current patterns, water temperature variability, and extreme temperature occurrences. By studying and understanding these factors, preliminary decisions can be made regarding the optimal placement of the intake and discharge infrastructure.

The thesis begins by providing an introduction to cooling systems and their selection factors, using the Loviisa nuclear power plant as an example. It then describes the possible cooling system for the proposed nuclear power plant. The physical characteristics of the Gulf of Finland are also discussed.

The methodology section explains the approach used, followed by the analysis and discussion of the results. The analysis includes the variability of temperature along the transect in Narva Bay and the examination of surface currents in Kunda Bay. The study concludes with a summary, list of sources, and supplementary materials.

The analysis in Narva Bay primarily examined the variability of sea water temperatures in the near-bottom layer of the water column, focusing on the 95th percentile values. The results indicated that temperatures exceeding 20 °C were infrequent in this layer, while temperatures above 15 °C were observed across the entire transect. Higher temperatures were more prevalent during the summer months and in shallower waters, whereas lower

temperatures were generally observed in deeper waters and during the autumn-winter period. It was found that during certain time intervals, temperatures at depths of 30 meters can exceed the threshold of 15 °C. It was concluded that this may indicate the occurrence of downwelling. However, a slight increase in temperature during vertical mixing in the near-bottom layer is common.

For Kunda Bay, the emphasis was on studying surface currents to ensure effective dispersal of heated cooling water. The analysis revealed that the highest current velocities occur in the more distant part of the transect, while velocities closer to the coast are significantly lower. However, it should be noted that in stations 6 and 5, slower current speeds are less prevalent. Current velocities exhibit periodic variability, and there is no clear pattern in the occurrence of velocities below 5th percentile.

The directions of the currents are largely influenced by wind patterns, proximity to the coastline, and the openness of the bay to the sea. Therefore, it is important to approach current analysis with careful consideration, as surface currents have a complex structure and are highly dependent on multiple aspects.

Making more specific decisions requires additional analysis. This study provides a general overview of the selected transects' parameters. This would involve conducting additional measurements and more in-depth analyses that would draw attention to more specific aspects or regions. Such additional studies would be conducted with the aim of addressing the needs and criteria to provide more tailored recommendations and decision-making support for Fermi Energia's nuclear power plant project.

Keywords: cooling water, discharge, intake, inflow, water cooling system, nuclear power plant, Kunda Bay, Narva Bay, surface currents, extreme temperatures.

Viidatud allikad

- Alenius, P. et al. (1998). The physical oceanography of the Gulf of Finland: A review.
https://www.researchgate.net/publication/29725971_The_physical_oceanography_of_the_Gulf_of_Finland_A_review (08.03.2023)
- Andrejev, O. et al. (2004). Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland - a study based on three-dimensional modelling.
<http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber9/ber9-001.pdf> (08.03.2023)
- Ecofys (2014). Pilot project on availability, use and sustainability of water production of nuclear and fossil energy - Geo-localised inventory of water use in cooling processes, assessment of vulnerability and of water use management measures. (08.03.2023)
- Elken, J. et al. (2003). On the estuarine transport reversal in deep layers of the Gulf of Finland.
https://www.researchgate.net/publication/248452317_On_the_estuarine_transport_reversal_in_deep_layers_of_the_Gulf_of_Finland (08.03.2023)
- European Commission (2023). Water framework directive overview.
https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en (13.04.2023)
- Eur-Lex (13.12.2011). Directive 2011/92/EU of the European Parliament and the Council of 13 December 2011 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011L0092> (13.04.2023)
- Fortum (2021). Loviisa power plant environmental report: Our environment 2021.
<https://www.fortum.com/about-us/our-company/our-energy-production/our-power-plants/loviisa-nuclear-power-plant/our-environment-2021> (13.04.2023)
- Fortum (2021). Temporary reduction of power at Loviisa power plant Unit 1 due to high sea water temperature.
<https://www.fortum.com/media/2021/07/temporary-reduction-power-loviisa-power-plant-unit-1-due-high-sea-water-temperature> (13.04.2023)
- Haapala, J. (1994). Upwelling and its influence on nutrient concentration in the coastal area of the Hanko Peninsula, entrance of the Gulf of Finland.
https://www.researchgate.net/publication/29724689_Upwelling_and_its_Influence_on_Nutrient_Concentration_in_the_Coastal_Area_of_the_Hanko_Peninsula_Entrance_of_the_Gulf_of_Finland (08.03.2023)

Riigiteataja (22.02.2019). Veeseadus.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001> (13.04.2023)

Räämet, A., Soomere, T. (2010) The wave climate and its seasonal variability in the northeastern Baltic Sea.

https://www.researchgate.net/publication/228514231_The_wave_climate_and_its_seasonal_variability_in_the_northeastern_Baltic_Sea (08.03.2023)

Soomere, T. & Keevallik, S. (2001) Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper.

https://kirj.ee/public/va_te/t50-1-3.pdf (08.03.2023)

Soomere, T. & Keevallik, S. (2003) Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland.

https://kirj.ee/wp-content/plugins/kirj/pub/eng-2-2003-73-90_20230304223357.pdf (08.03.2023)

Soomere, T. et al. (2008). The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: a review for 1997-2007.

<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/503myrbe.pdf> (08.03.2023)

Soomere, T et. al (2011) Patterns of current-induced transport in the surface layer of the Gulf of Finland.

<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/232809/ber16A-049.pdf?sequence=1> (08.03.2023)

Suhhova, I et al. (2015) Variability of currents over the southern slope of the Gulf of Finland.

https://www.researchgate.net/publication/273791631_Variability_of_currents_over_the_southern_slope_of_the_Gulf_of_Finland (08.03.2023)

Suursaar, Ü. (2010). Waves, currents and sea level variations along the Letipea - Sillamäe coastal section of the southern Gulf of Finland.

https://www.researchgate.net/publication/46485773_Waves_currents_and_sea_level_variations_along_the_Letipea_Sillamae_coastal_section_of_the_southern_Gulf_of_Finland (08.03.2023)

Toimetajad Raateoja, M., Setälä, O. (2016). The Gulf of Finland assessment. (08.03.2023)

Westerlund, A. et al. (2018). Attributing mean circulation patterns to physical phenomena in the Gulf of Finland.

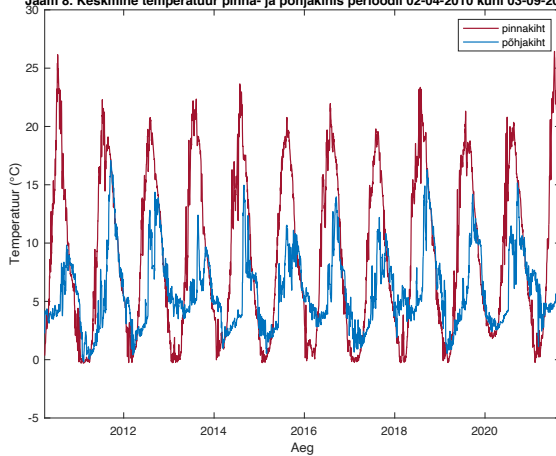
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0078323417300623#bib0005-> (08.03.2023)

Zhurbas, V. et al. (2008) Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004280>
(08.03.2023)

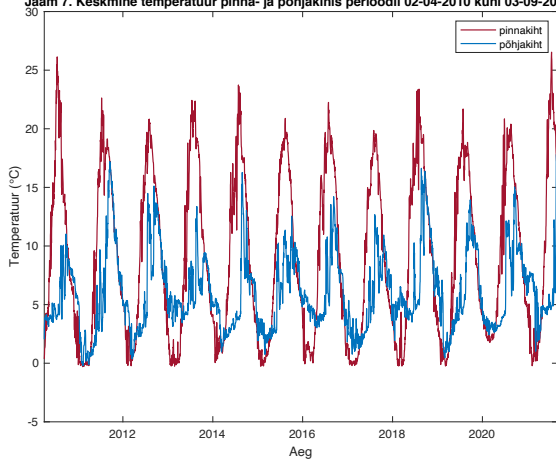
Lisa 1. Keskmise temperatuur pinna- ja põhjakihis aastatel 2010-2021; põhjalähedasema kihi maksimaalsed temperatuurid

Jaam 8. Keskmise temperatuur pinna- ja põhjakihis perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



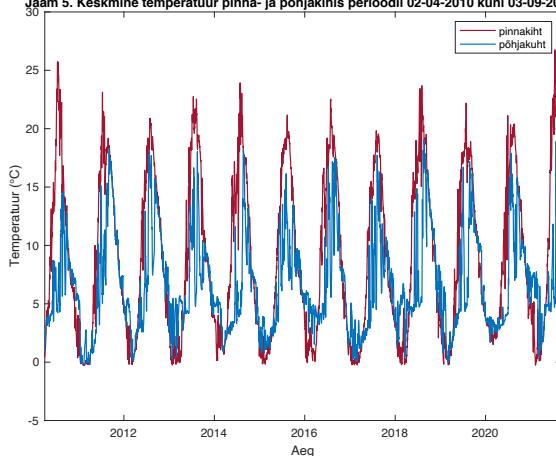
Jaam 8		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	26-Sep-2010	9.8
2011	18-Sep-2011	17.1
2012	10-Sep-2012	14.4
2013	24-Aug-2013	12.4
2014	31-Aug-2014	15.0
2015	12-Aug-2015	11.5
2016	15-Sep-2016	14.0
2017	29-Aug-2017	12.2
2018	20-Sep-2018	16.3
2019	24-Sep-2019	14.2
2020	19-Sep-2020	15.2
2021	25-Aug-2021	17.7

Jaam 7. Keskmise temperatuur pinna- ja põhjakihis perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

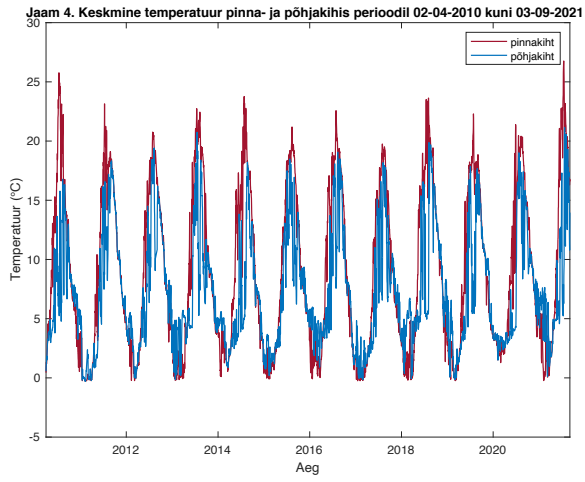


Jaam 7		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	26-Sep-2010	11.0
2011	17-Sep-2011	17.2
2012	10-Sep-2012	15.1
2013	24-Aug-2013	13.4
2014	28-Aug-2014	16.3
2015	04-Okt-2015	12.6
2016	09-Sep-2016	14.2
2017	09-Aug-2017	12.7
2018	23-Aug-2018	16.6
2019	24-Sep-2019	13.9
2020	19-Sep-2020	15.1
2021	25-Aug-2021	17.8

Jaam 5. Keskmise temperatuur pinna- ja põhjakihis perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

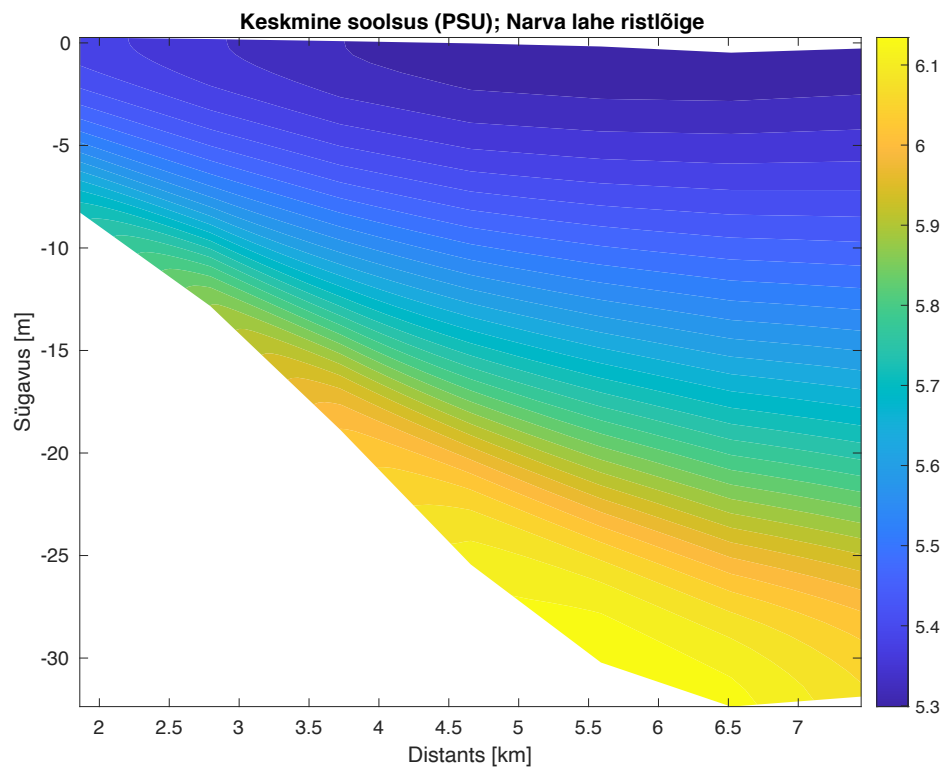
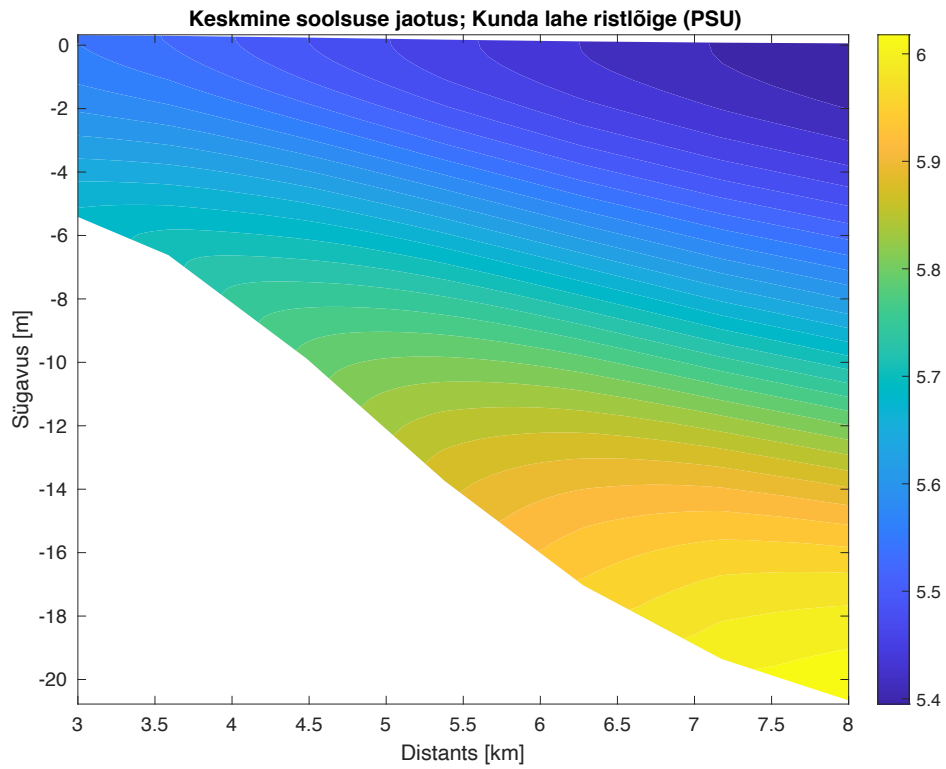


Jaam 5		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	29-Aug-2010	14.6
2011	05-Sep-2011	18.3
2012	25-Jul-2012	18.1
2013	17-Aug-2013	18.0
2014	23-Aug-2014	18.3
2015	04-Aug-2015	16.1
2016	29-Aug-2016	17.5
2017	08-Aug-2017	17.7
2018	22-Aug-2018	19.1
2019	25-Aug-2019	17.2
2020	24-Jul-2020	17.9
2021	24-Jul-2021	18.9



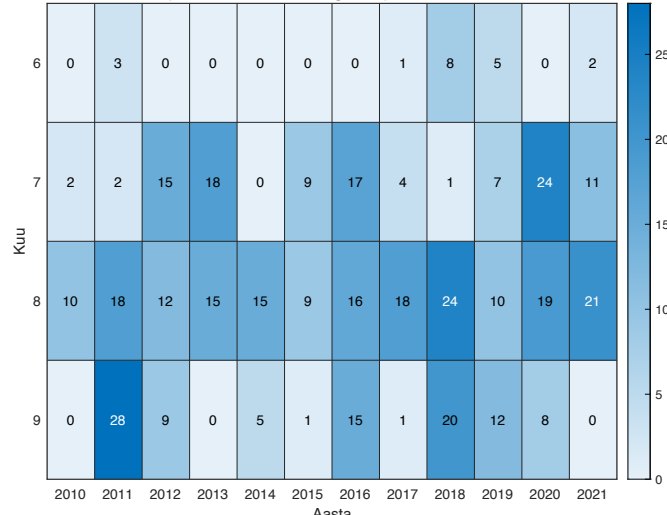
Jaam 4		
aasta	kuupäev	temperatuur (°C)
2010	12-Aug-2010	16.8
2011	05-Sep-2011	18.3
2012	10-Aug-2012	19.4
2013	18-Jul-2013	20.7
2014	23-Aug-2014	18.2
2015	26-Jul-2015	18.5
2016	11-Aug-2016	19.1
2017	07-Aug-2017	18.2
2018	08-Aug-2018	19.9
2019	04-Jul-2019	17.9
2020	24-Jul-2020	19.0
2021	23-Jul-2021	21.1

Lisa 2. Mõlema transekti keskmise soolsuse jaotumise ristlõige

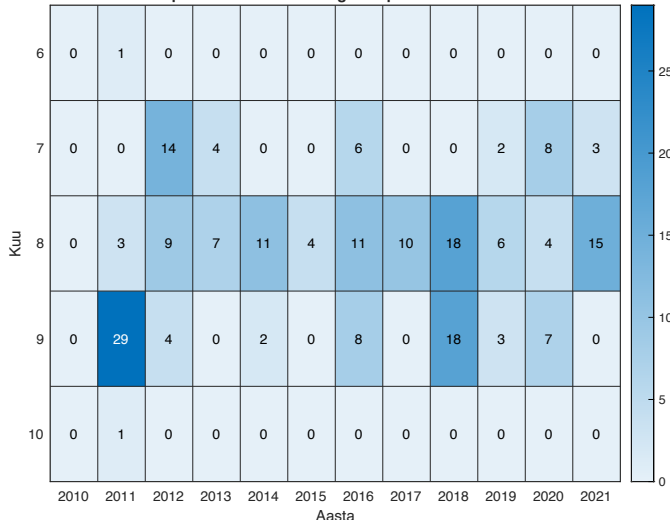


Lisa 3. Iga jaama üle 15 °C esinevuse sagedus põhjalähedases kihis perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021

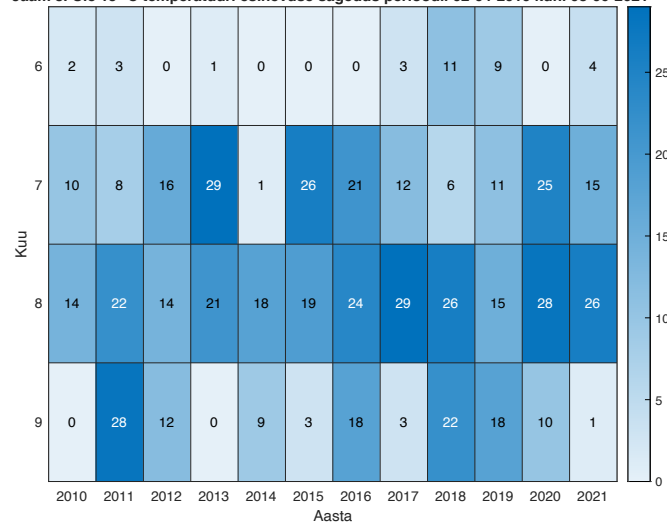
Jaam 4. Üle 15 °C temperatuuri esinevuse sagedus perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



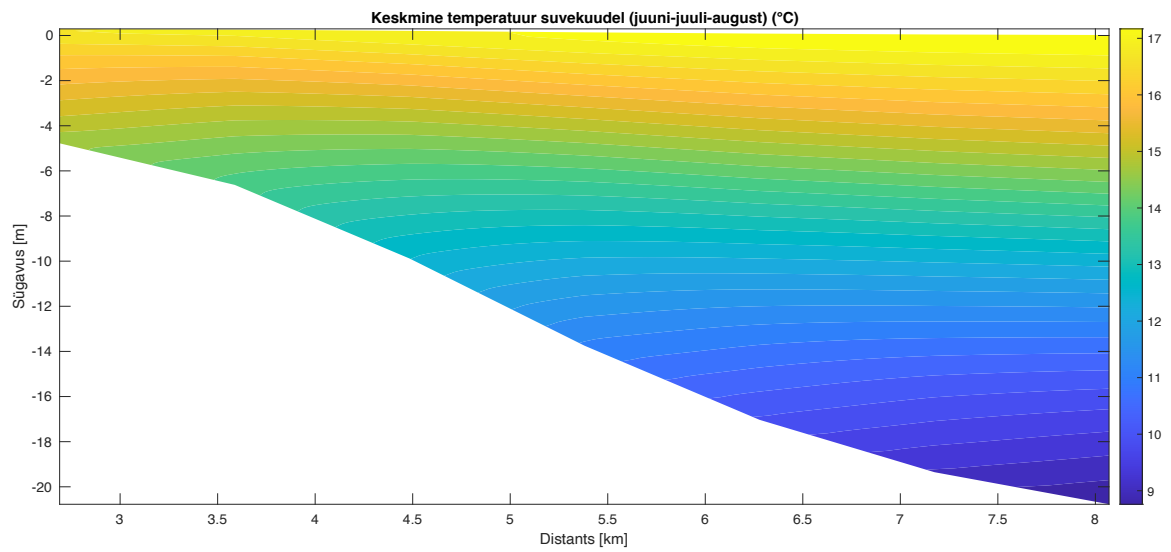
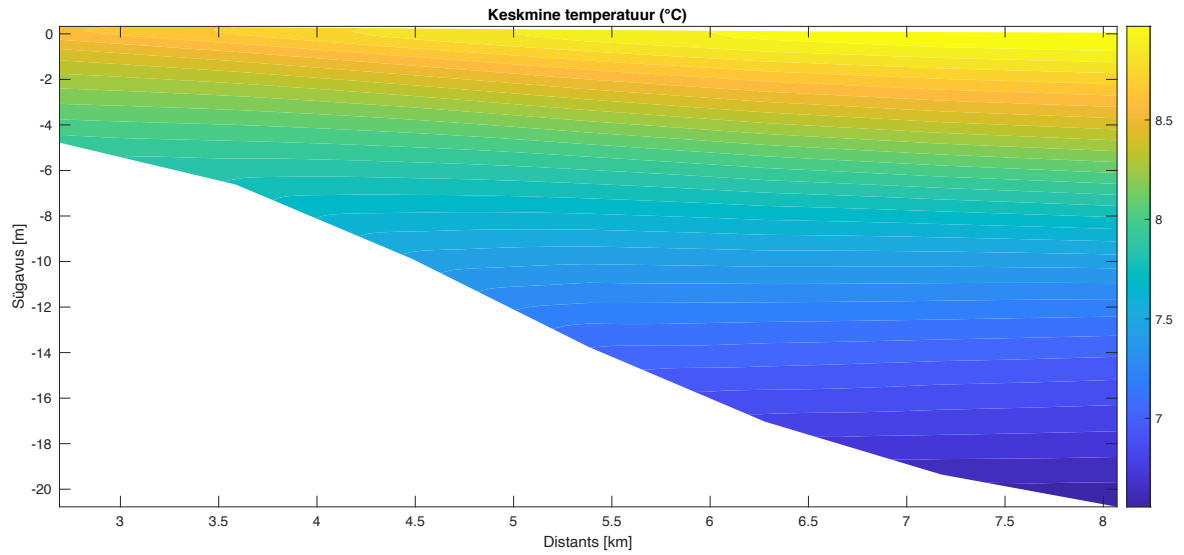
Jaam 5. Üle 15 °C temperatuuri esinevuse sagedus perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



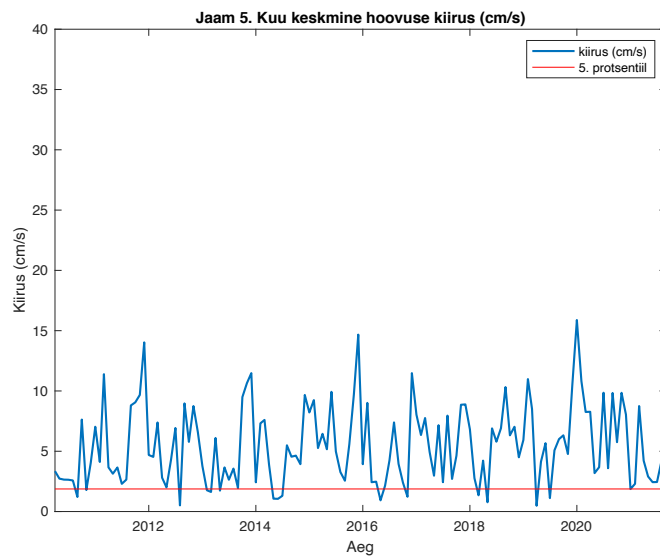
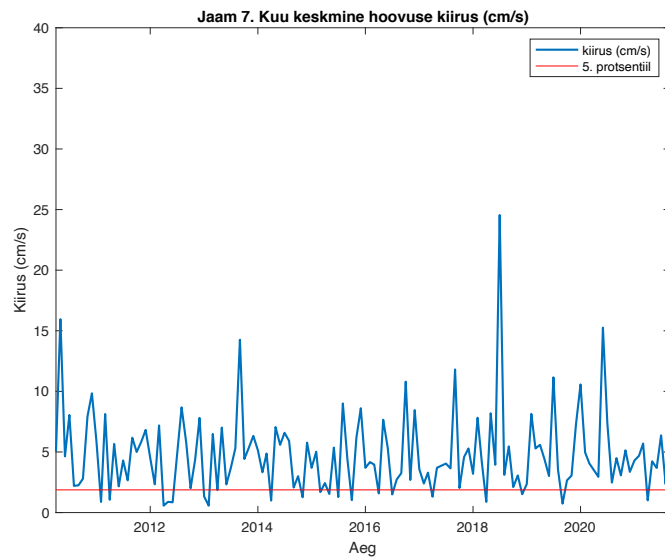
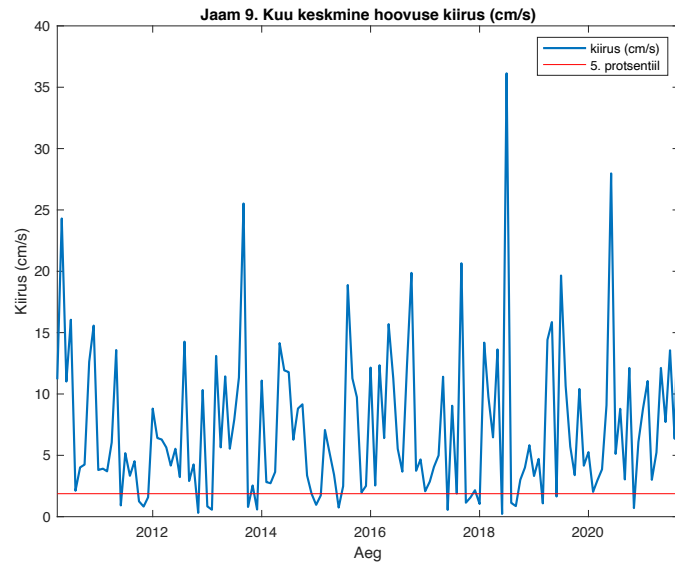
Jaam 3. Üle 15 °C temperatuuri esinevuse sagedus perioodil 02-04-2010 kuni 03-09-2021



Lisa 4. Kunda lahe transekti keskmise temperatuuri jaotumise ristlõiked



Lisa 5. Hoovuskiiruse aegread jaama kaupa



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks⁴

Mina, Luise Kompus:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Hoovuste, vee temperatuuri ja veesamba kihistatusse analüüs kavandatava tuumaelektrijaama jahutusvee sissevõtu ja väljalasu võimalikes piirkondades“, mille juhendaja on Urmas Lips:

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

22.05.2023

⁴ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.