



# Ilmastonmuutoksen vaikutukset Antarktiksens hyllyjäätiköihin

Luk-tutkielma,  
Kaivannaisalan tiedekunta,  
Oulun yliopisto,  
Tea Hirvikoski,  
2020

Luk-tutkielma,  
Kaivannaisalan tiedekunta,  
Oulun yliopisto,  
Tea Hirvikoski,  
2020  
Kandiohjaaja: Pertti Sarala

### Tiivistelmä:

Tässä kandityössä perehdytään ilmastonmuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin Antarktiksella hyllyjäätiköillä. Erityisesti keskitytään hyllyjäätiköiden pohjan sulamiseen (basal melt) lämpenevän valtameren johdosta. Suurin osa ilmastonmuutoksen tuottamasta lämmöstä on joutunut valtameriin, joten tämä hyllyjäätiköiden sulamisen muoto on havaittu olevan merkittävämpi kuin aiemmin on tiedetty. Tärkein tekijä hyllyjäätiköiden pohjan sulamiseen on sirkumpolaarinen syvä vesi, joka kiertää lähes koko Antarktiksella. Sirkumpolaarinen syvä vesi on sekoitusta kaikkien maailman valtamerien syvistä vesistä. Viime vuosina tämän vesimassan lämpötila on kohonnut ja sitä on alkanut kulkeutua enemmän hyllyjäätiköiden heikkoihin kohtiin erilaisista syistä, joista myös keskustellaan tässä kandityössä. Työssä paneudutaan myös Antarktiksella hyllyjäätiköiden tulevaisuuden sulamiseen ja siitä aiheutuviin mahdollisiin seurauksiin. Erityisesti keskityn Amundsenin meren alueeseen, sillä se on todella tärkeä alue koko Länsi-Antarktiksella mannerjäätikön tulevaisuutta ajatellen.

Avainsanat: ilmastonmuutos, Antarktis, hyllyjäätikkö, pohjan sulaminen (basal melting), sirkumpolaarinen syvä vesi

## Sisällysluettelo:

1. Johdanto .....	1
2. Ilmaston muutos yleisesti .....	2
3. Hyllyjäätikkö.....	3
4. Antarktiksens hyllyjäätiköiden ablaatioprosessit.....	4
4.1 Jäävuorten poikiminen .....	4
4.2 Pohjan sulaminen .....	5
4.2.1 Sirkumpolaarinen syvä vesi.....	7
4.2.2 Pohjautumislinjan vetäytyminen .....	9
4.2.3 Hyllyjäätikön pohjan kanavat.....	9
5. Merkittäviä sulamisalueita .....	10
5.1 Amundsen meren alue .....	11
5.1.1 Pine Island .....	12
5.1.2 Thwaites .....	13
5.2 Totten .....	14
6. Tulevaisuuden skenaarioita .....	14
6.1 Merijään lisääntyminen vastustaa ilmastonmuutosta .....	15
6.2 Pohjan sulamisen määrän kasvu.....	15
6.3 Merivirran uudelleenohjautuminen Filchner-Ronnella .....	19
7. Yhteenveto .....	21
Lähdeluettelo.....	24

# 1. Johdanto

Tämän kandidityön aihe on ilmastonmuutoksen vaikutukset Antarktiksien hyllyjäätiköihin. Valitsin tämän aiheen, koska ihmisten aiheuttama ilmastonmuutos on todella ajankohtainen asia ja sillä on paljon kauaskantoisia vaikutuksia. Antarktiksien alueen valitsin siksi, että se on massiivinen alue ja sulaessaan se kohottaisi merenpintaa merkittävästi. Hyllyjäätiköt puolestaan valitsin siksi, että ne ovat Antarktiksien alueita, jotka ovat tällä hetkellä kokeneet eniten jään purkautumista ja niiden häviämällä olisi dramaattisia vaikutuksia mannerjäätikköön.

Kandidityön tavoitteena on perehtyä otsikon mukaisesti siihen, kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa sekä tulee vaikuttamaan Antarktiksien hyllyjäätiköihin tulevaisuudessa. Ensimmäiseksi kerrotaan hieman yleisesti ilmaston muutoksesta ja hyllyjäätiköistä.

Aihetta on rajattu siten, että on keskitytty enemmän hyllyjäätiköiden pohjan sulamiseen (basal melting) kuin toiseen tärkeään hyllyjäätiköiden ablaatioprosessiin, jäävuorten poikimiseen, josta on mainittu kuitenkin lyhyesti. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että suuri osa ilmaston lämpenemisen tuottamasta lisälämmöstä on imeytynyt valtameriin. Tätä sulamisprosessia on tutkittu paljon viime aikoina. Sulamisprosessin kuvailussa keskityn etenkin sirkumpolaarisen syvän veden vaikutukseen, joka on Antarktiksien veden kierroista merkittävin hyllyn pohjan sulattaja. Lisäksi kuvaan jäätikön pohjan kanavien vaikutuksia sulamiseen.

Aihetta on rajattu myös alueiden mukaan keskittyen hyllyjäätikköalueisiin, jotka tavalla tai toisella ovat merkittäviä sulamisensa tai potentiaalisen sulamisensa vuoksi. Amundsenin meren alue on saattanut jo joutua merellisen mannerjäätikön epävakauden tilaan (marine ice sheet instability), mikä tarkoittaa sitä, että koko Länsi-Antarktis saattaa tulevaisuudessa taantua. Tämän epävakauden tilan ajatellaan olevan mahdollisesti käynnissä tai lähitulevaisuudessa alkamassa Amundsenin meren hyllyjäätiköillä, etenkin Pine Islandin ja Thwaitesin alueilla, joihin on tämän vuoksi perehdytty enemmän. Itä-Antarktiksien puolelta Totten hyllyjäätikkö on osoittanut myös huomattavaa sulamista ja on tämän vuoksi mielenkiinnon kohteena, sillä Itä-Antarktiksien on aiemmin uskottu

olevan vakaampi.

Lopuksi työssä esitellään muutama tulevaisuuden skenaario, jotka perustuvat erilaisilla ilmastomalleilla tehtyihin tutkimuksiin. Ensin perehdytään ilmastomuutosta potentiaalisesti vastustavaan mekanismiin. Seuraavaksi perehdytään malliin, jossa kaikki Antarktiksien hyllyjäätiköt sulaisivat tämän vuosisadan aikana. Lopuksi esittelen vielä suuren Filchner-Ronne-hyllyjäätikön sulamisen skenaarion potentiaalisen rannikkovirran uudelleenohjautumisen myötä, joka tapahtuisi kahden seuraavan vuosisadan aikana. Tämä prosessi voisi suistaa nykyään melko vakaan hyllyjäätikön taantuvaksi. Tämä hyllyjäätikkö voisi kokonsa vuoksi tuottaa runsaasti sulamisvettä tulevaisuudessa.

## **2. Ilmastomuutos yleisesti**

Antroposeeniset kasvihuonekaasupäästöt ovat kohonneet esiteollisen ajan jälkeen. Tämä kasvihuonekaasupäästöjen määrän nousu johtuu suurelta osin taloudellisesta kasvusta ja väestönkasvusta. Päästöt ovat nyt korkeammat kuin koskaan aikaisemmin. Ihmisten toiminta on johtanut hiilidioksidin, metaanin ja typpioksidin määrien kasvuun ilmakehässä. Niiden määrät ovat nyt korkeammat kuin viimeiseen 800 000 vuoteen (Stocker et al., 2013). Kasvihuonekaasujen kohonneen määrän vaikutuksia on havaittu koko ilmastosysteemissä ja on erittäin todennäköistä, että ne ovat suurin aiheuttaja havaitulle ilmaston lämpenemiselle 1950-luvusta lähtien. On äärimmäisen todennäköistä että yli puolet havaitusta globaalista pinnanlämpötilan kasvusta vuosien 1951-2010 aikana on aiheutunut antroposeenisen toiminnan kasvattamasta kasvihuonekaasujen konsentraatiosta ja muusta antroposeenisestä pakottamisesta (Pachauri et al., 2014).

Ihmisten toiminnan on arvioitu aiheuttavan noin 1 celsiusasteen nousun globaalissa lämpötilassa esiteollisen ajan jälkeen. Arktinen pintalämpötila on luultavasti noussut tuplasti globaaliin keskiarvoon nähden kahden viime vuosikymmenen aikana. (Pörtner et al., 2019).

On lähes varmaa, että globaali meren lämpötila on kohonnut 1970-luvulta lähtien ja absorboinut yli 90 prosenttia ylimääräisestä ilmastosysteemin lämpötilasta. Vuodesta 1993 valtameren lämpenemisen vauhti on enemmän kuin tuplaantunut. Eteläinen valtameri absorboi 35-43 prosenttia globaalin valtameren lämmöstä ylimpään 2000 metriin vuosien 1970-2017 välillä. Myös syvä valtameri on lämmennyt 1992 vuodesta lähtien etenkin eteläisellä valtamerellä (Pörtner et al., 2019).

Ilmaston lämpeneminen on lisännyt äärimmäisten sääilmiöiden esiintymistiheyttä ja vakavuutta. Näitä sääilmiöitä ovat helleaallot, kuivuus, tulvat, sykloonit ja metsäpalot (Pachauri et al., 2014). Lisäksi globaalinen lämpötilannousu on aiheuttanut meren happamoitumista ja meriveden happipitoisuuden vähenemistä sekä trooppisten sateiden määrän kasvua, tavallista suurempia aaltoja ja merenpinnan kohoamista (Pörtner et al., 2019).

Monet ilmastonmuutoksen seuraukset jatkuvat vuosisatojen ajan, vaikka antroposeeniset kasvihuonekaasupäästöt olisivat kokonaan lakanneet (Pachauri et al., 2014).

### **3. Hyllyjäätikkö**

Hyllyjäätiköt ovat mannerjäätikön kelluvia jatkeita. Hyllyjäätiköt kattavat yli 1,561 miljoonan neliökilometrin alan ja reunustavat 75 prosenttia Antarktiksien rantaviivasta keräten 20 prosenttia satavasta lumesta (Rignot et al., 2013). Jäähyllyjen paksuusvaihtelee noin 100-1500 metrin välillä (Ingels et al., 2018). Hyllyjäätiköitä ruokkii mannerjäätiköiltä virtaava jää, pinnan akkumulaatio ja merijää niiden alapuolella. Ne menettävät massaa jäävuorten poikimisella sekä pohjan sulamisella (basal melting). Hyllyjäätiköiden sulaminen on Antarktiksien suurin ablaatioprosessi (Rignot et al., 2013).

Hyllyjäätiköt ovat tärkeässä roolissa ilmaston muutoksen vaikutuksia vastaan, sillä ne tukevat mannerjäätiköitä ylävirrassa (Depoorter et al., 2013). Jään purkautuminen voi kiihtyä, jäähyllyjen tuen (buttressing) vähetessä hyllyjäätikön ohenemisen vuoksi, minkä

aiheuttaa tehostunut merellinen sulaminen veden kierron muutosten tai suoran lämpenemisen vuoksi tai jäähyllyn kokonaan tai osittain romahtaessa sulaveden laajentaessa pinnan railoja ilmakehällisen lämpenemisen seurauksena (Edwards et al., 2019). Tämä mannerjäätikön purkautumisen kiihtyminen mereen nostaa merenpintaa (Alley et al., 2016). Antarktiksien massakato on kolminkertaistunut viime vuosikymmenenä. Hyllyjäätiköt itsessään eivät nosta merenpintaa sulaessaan.

Viimeisten 60 vuoden aikana tehdyt havainnot osoittavat, että monet jäähyllyt Antarktiksien ympärillä ohenevat vauhdilla ja vetäytyvät sekä romahtavat. Nämä muutokset jäähyllissä johtuvat nousevasta ilman ja veden lämpötilasta (Ingels et al., 2018).

## **4. Antarktiksien hyllyjäätiköiden ablaatioprosessit**

Ablaatio tarkoittaa kaikkia prosesseja, jotka poistavat lunta, jätää tai vettä jäätiköltä. Näistä merkittävimpiä Antarktiksien hyllyjäätiköillä ovat jäävuorten poikiminen sekä pohjan sulaminen (basal melting).

### **4.1 Jäävuorten poikiminen**

Jäähylljen reuna-alueilla jään menetys on säännöllistä jäävuorten poikimisen vuoksi (Garliardini et al., 2018). Tuuli ja veden kumpuaminen lisäävät jäähylljen vetäytymistä ja halkeilua, mikä johtaa jäävuorten poikimiseen. Nämä prosessit vievät yleensä vuosia, mutta itse hyllyjen hajoaminen voi tapahtua vain viikoissa (Ingels et al., 2018).

Filchner-Ronnen ja Rossin hyllyjäätiköillä on korkein jäävuorten poikimisen määrä. Nämä kaksi hyllyjäätikköä ovat vastuussa kolmasosasta koko Antarktiksien jäävuorten tuotantoa (Depoorter et al., 2013).

Suurin yksittäinen jäävuoren poikimistapahtuma sattui 2017 heinäkuussa, kun triljoonan

tonnin painoinen jäävuori irtosi Larsen C-jäähyllystä (Ingels et al., 2018). Tämä alue oli passiivista aluetta, mikä tarkoittaa, että sillä ei ollut tukevaa vaikutusta mannerjäätikköön. Näinkin suuri tapahtuma ei siis merkittävästi kiihdyttänyt mannerjäätikön virtaamista mereen (Garliardini et al., 2018).

Larsen B-hyllyjäätikkö koki dramaattisen vetäytymisen Larsen A-hyllyn tavoin. Larsen B oli vuonna 1963 pinta-alaltaan 12 000 neliökilometriä, mutta nyt vain 20 prosenttia sen alueesta on jäljellä. Sen vetäytyminen kulmineoitui dramaattiseen pirstoutumiseen noin 3250 neliökilometrin alueelta vain muutaman päivän sisään helmikuussa 2002. A:n pirstoutumisen piilevä syy näyttäisi olevan nousevat ilmakehän lämpötilat, mutta se ei selitä mekanismeja dramaattisen romahtamisen takana, ennemmin normaalin progressiivisen vetäytymisen. Molemmilla hyllyjäätiköillä havaittiin merkittävä sulaveden kerääntyminen. Yksi teoria on, että pinnan sulaveden kerääntyminen aiheutti alustavan pirstoutumisen hyllyjäätiköllä veden edetessä halkeamien läpi. Nopeasti rakoilleen hyllyn hajoaminen tuhansiin pieniin kappaleisiin voitaisiin selittää sekundäärisillä prosesseilla. Niihin kuuluu muun muassa energia, jota vapautuu kun kapeat jäähyllyn palaset kaatuvat kumoon yhtenäisellä tavalla, mikä sitten panee alulle jatkuvan pirstoutumisen dominoefektinä. Hajoamista edeltävä pinnan tekstuuri ja jään paksuus, jotka liittyvät jäätikön alkuperän alueisiin, ovat myös kriittisiä määritettäessä hyllyjään hajoamisen nopeutta. Toinen teoria Larsen A:n romahtamisen aikana, ehdottaa että jään edustan (ice front) geometria voisi olla äärimmäisen merkittävä hajoamisen alullepanija (Cook et al., 2010).

## **4.2 Pohjan sulaminen**

Viimeaikoina meriveden aiheuttama pohjan sulaminen on havaittu aiempaa tärkeämmäksi hyllyjäätiköiden sulamismekanismissa. Näin on etenkin hyllyjäätiköiden pohjautumislinjoilla sekä onkaloissa (cavity) (Depoorter et al., 2013).

Pinnanalainen eteläinen meri näyttää lämmenneen nopeammin kuin mikään muu osa maailman valtameristä. Suhteellisen lämmin sirkumpolaarinen syvä vesi työntyy



mannerjalustalle merenalaisia syvänteitä pitkin. Hyllyjäätiköiden pohjan sulaminen (basal melt) riippuu suuresti sirkumpolaarisen syvän veden lämpenemisestä sekä tehokkuudesta, jolla se voi saavuttaa hyllyjäätiköt. Joka tapauksessa lämpimät pinnanalaiset vedet ovat merkittävästi tehostaneet pohjan sulamisen määrää Antarktiksella mannerjäätiköllä ja etenkin hyllyjäätiköillä. Hyllyjäätiköt ovat todella herkkiä valtameren lämpötilan muutoksille. Pohjan sulamista tapahtuu merkittävässä määrin hyllyjäätiköillä ympäri koko mantereen (Bintanja et al., 2013).

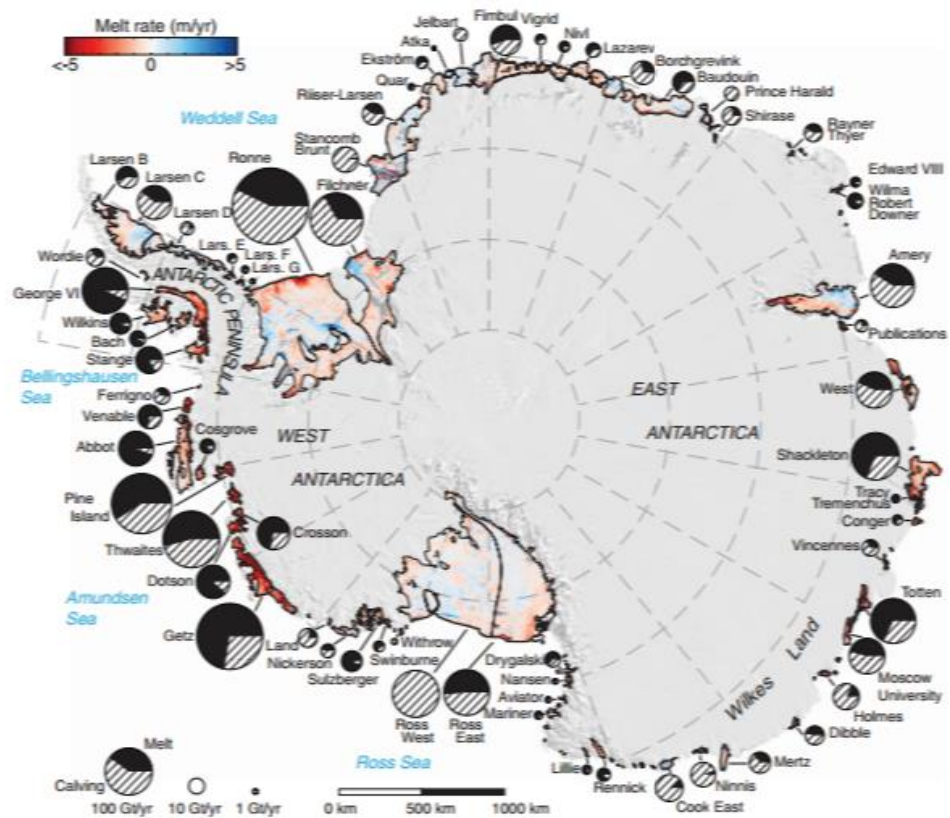
Tutkimusten mukaan noin puolet jään menetyksestä hyllyjäätiköillä tapahtuu merellisen pakottamisen seurauksena. Yksittäisillä hyllyjäätiköillä tämä meren aiheuttama pohjan sulaminen kattaa 10-90 prosenttia jään kokonaissulamisesta (Depoorter et al., 2013).

Puolet sulamisvedestä tulee kymmeneltä pieneltä lämmin-onkaloiselta (warm-cavity) Kaakkois-Tyynenmeren hyllyjäätiköiltä, jotka kattavat 8 prosenttia alueesta. Samankaltainen korkean sulamisen alue on löydetty kuudelta Itä-Antarktiksella hyllyjäätiköltä viitaten dokumentoimattomaan vahvaan merelliseen lämpö pakottamiseen niiden syvillä pohjautumislinjoilla. Getz on suurin sulamisveden lähde Antarktiksella tämän tutkimuksen aikana (Rignot et al., 2013).

Korkea pohjan sulamisen määrä ei välttämättä tarkoita hyllyjäätikön ohenemista. Hyllyjäätiköt, joilla on suuret sulamisen määrät saattavat olla massabalanssissa (Rignot et al., 2013).

Suuret vaihtelut eri hyllyjäätiköiden sulamisten välillä heijastavat suurta määrää erilaisia valtameriolosuhteita. Näihin olosuhteisiin lukeutuvat meriveden lämpötila, merenpohjan painaumat ja kynnykset (troughs and sills) sekä merijään muodostuminen (Rignot et al., 2013).

Alla esitetystä kuvasta näemme kuinka suuri osa massan menetyksestä (mass loss) tapahtuu pohjan sulamisen ja kuinka suuri osa jäävuorten poikimisen johdosta kullakin Antarktiksella hyllyjäätiköllä.



**Kuva 1.** Tässä kuvassa on esitelty Antarktiksien hyllyjäätiköiden pohjan sulamisen (basal melt) sekä jäävuorten poikimisten suhteellisia osuuksia kunkin Antarktiksien hyllyjäätikön massanmenetykseen. Punaiset hyllyjäätikkö alueet kuvassa menettävät massaa ja siniset alueet saavat puolestaan lisää massaa. Musta väri ympyrädiagrammeissa merkitsee pohjan sulamista valtameren toimesta ja viivoille merkitty alue jäävuorten poikimista.

#### 4.2.1 Sirkumpolaarinen syvä vesi

Antarktiksien mannerta ympäröi antarktinen sirkumpolaarinen virta. Tämän virran ydin koostuu sirkumpolaarisesta syvästä vedestä, joka on sekoitusta kaikkien maailman valtamerien syvistä vesistä. Tämän vesimassan piirteitä ovat yli  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötila ja yli 3,46 prosentin suolaisuus (Dinniman et al., 2011).

Sirkumpolaarinen syvä vesi jaetaan tyypillisesti kahteen tyyppiin. Ylemmän ja alemman sirkumpolaariseen syvään veteen joista alempi on suolaisempaa. Näiden vesimassojen erot johtuvat niiden alkuperäisten lähteiden eroavaisuuksista. Ylemmän sirkumpolaarisen

syvän veden ajatellaan olevan lähtöisin Intian ja Tyynen valtameren meristä ja alempi sirkumpolaarinen syvä vesi on muuntunutta Pohjois-Atlantin syvää vettä. Sirkumpolaarista syvää vettä löytyy läheltä hylly breikkiä (break) koko mantereen ympäriltä (paitsi Weddell-mereltä), mutta sen ominaisuudet eroavat riippuen sijainnista (Dinniman et al., 2011).

Tämän suhteellisen lämpimän veden kierron on ajateltu olevan kriittinen lämmön lähde hyllyjäätiköiden pohjan sulamiselle.

Sirkumpolaarinen syvä vesi osoittaa merkittävää lämpenemistä useimmilla alueilla ympäri Antarktiksensa (Schmidt et al., 2014). Lämpeneminen syvyydessä jatkuu vielä useita vuosisatoja senkin jälkeen kun hiilidioksidipitoisuus ja globaali keskilämpötila ovat vakaantuneet (Hattermann et al., 2010).

Hyllyjäätiköiden massan menetys (mass loss) on kiihtynyt, etenkin Länsi-Antarktiksella, jossa lämmin merivesi saavuttaa onkalot hyllyjäätiköiden alla (Alley et al., 2016).

Jos muuntuneen sirkumpolaarisen syvän veden lämpö on pääasiallinen lähde hyllyjäätikön sulamiselle, silloin erot sirkumpolaarisen syvän veden muuntumisessa hyllyllä voivat olla kriittisiä selitettäessä suuria eroja pohjan sulamisen määrässä hyllyjäätikoilla, jotka ovat saman paksuisia (Dinniman et al., 2011).

Esimerkkinä tästä muuntumisesta otetaan vaikka ero Rossin ja Länsi-Antarktiksensa tunkeutumisten välillä. Erona on, että Rossin meren pintavesi sekoittuu sirkumpolaarisen veden kanssa voimakkaammin, etenkin lännessä. Sirkumpolaarinen vesi, joka liikkuu Länsi-Antarktiksensa Peninsulan hyllyllä kohti hyllyjäätiköiden pohjaa, ei ainoastaan ole alunperin lämpimämpää vaan myös kokee vähemmän vertikaalista sekoittumista pintaveden kanssa. Tämä mahdollistaa suuremman sirkumpolaarisen alkuperäisen lämmön siirtymisen Länsi-Antarktiksensa hyllyjäätiköiden alle ja edistää niiden sulamista (Dinniman et al., 2011).

## 4.2.2 Pohjautumislinjan vetäytyminen

Pohjautumislinja (grounding line) on alue, jossa mannerjäätikkö irtoaa merenpohjasta ja alkaa kellua. Leedsin yliopiston tutkija huomasi, että pohjautumislinjan vetäytyminen on ollut äärimmäistä kahdeksalla 65:stä suurimmasta jäätiköstä (Konrad et al., 2018). Viime jääkaudesta lähtien jäätikkö on vetäytynyt noin 25 metriä vuodessa. Näillä pohjautumislinjoilla vetäytyminen on ollut yli viisi kertaa suurempaa. Suurimpia muutokset ovat Länsi-Antarktiksella, jossa yli viides mannerjäätiköstä on vetäytynyt merenpohjan yli viime jääkauden jälkeistä vauhtia nopeammin. Konrad et al. (2018) osoittivat tutkimuksessaan selvästi, että vetäytymistä tapahtuu mannerjäätiköillä valtameren sulattaessa niiden pohjia. Thwaites-jäätikön pohjautumislinjan vetäytyminen on kiihtynyt, mutta Pine Islandilla, jolla oli aiemmin nopeimmin vetäytyvä pohjautumislinja, vetäytyminen on pysähtynyt. Pohjautumislinjat sijaitsevat yleensä kilometrin syvyydellä tai sitä syvemmillä.

Tulokset, joita saatiin satelliitti-tutkainterferometrialla paljastavat, että pohjan sulamisen määrä (rates) suurten jäätiköiden pohjautumislinjoilla on paljon suurempi kuin aiemmin oletettiin. Siellä missä syvällä vedellä on suora pääsy pohjautumislinjoille, jäätiköt ja hyllyjäätiköt ovat haavoittuvaisia meneillään olevalle valtameren lämpötilojen nousulle. Sulamisen nopeus riippuu myös siitä, kuinka nopeasti valtameren lämpö kulkeutuu jään pohjalle, mikä taas riippuu tiheyskentästä, vuorovesisekoittumisesta, meren pohjan topografiasta ja onkaloiden (cavity) muodosta (Rignot et al., 2002).

## 4.2.3 Hyllyjäätikön pohjan kanavat

Jäähyllyjen pohjan kanavissa lämmin vesi virtaa pohjoissuuntaisesti, kuluttaen hyllyjäätikön pohjaa (base). Alley et al. (2016) osoittavat tutkimuksessaan, että pohjan (basal) kanavat on liitetty uusien railovyöhykkeiden kehittymiseen ehdottaen, että kanavat saattavat aiheuttaa murtumia. Tullaan siihen tulokseen, että pohjan kanavat (basal channels) voivat muodostua ja kasvaa nopeasti lämpimän meriveden

tunkeutumisen seurauksena ja ne saattavat rakenteellisesti heikentää jäähylyjä mahdollisesti johtaen nopeaan jäähylykatoon joillakin alueilla.

Kanavat dominoivat pohjan topografiaa monilla hyllyjäätiköillä, joihin lämmin merivesi vaikuttaa. Mukaan lukien Amundsenin meren sektori Länsi-Antarktiksella (Alley et al., 2016).

Amundsen ja Bellinghausen merien sektorilla on korkeat pohjan sulamisen (basal melt) määrät (rate) sirkumpolaarisen syvän veden läsnäolon vuoksi. Tällä alueella on myös suurempi pohjan kanavien (basal channels) tiheys, kuin millään muulla sektorilla (Alley et al., 2016).

Alley et al. (2016) demonstroivat laajalle levinneiden suurten pohjan kanavien läsnäolon antarktiksilla hyllyjäätiköillä, joista suurin tiheys esiintyy Länsi-Antarktiksella. He osoittavat, että kanavilla on tapana asettua leikkauslinjojen (shear margins) mukaisesti.

Kanavien läsnäolo ja kasvu voi aiheuttaa rakenteellista hyllyjäätiköiden heikkenemistä jo ennestään haavoittuvilla leikkauslinjoilla (shear zones). Jos leikkauskohta häiriintyy tarpeeksi, se johtaa poikimisen nousuun, vähentyneeseen hyllyjäätikkö alueeseen, lisääntyneeseen mannerjäätikön purkautumiseen ja kohonneeseen merenpinnan nousuun. Vaikka pohjan sulamisen pohjautumislinjalla on jo osoitettu johtavan kohonneeseen jään purkautumiseen, ehdotettu lisämekanismi leikkauslinjojen heikkenemisestä pohjan kanavien johdosta voi johtaa entisestään kiihtyneeseen mannerjäätikön purkautumiseen (Alley et al., 2016).

## **5. Merkittäviä sulamisalueita**

Tässä luvussa käsitellään hyllyjäätikköalueita, joilla sulaminen on merkittävää, ja alueita, joilla on suuri merkitys lähitulevaisuuden kannalta sulamisensa vuoksi.

## 5.1 Amundsenin meren alue

Amundsen meren sektorin (Länsi-Antarktiksella) pohjautumislinjojen kartoitus on paljastanut suuria jäätikkömuutoksia 1990-luvulla. Kun käytetään kahden vuosikymmenen ERS-1/2 dataa, dokumentoidaan jatkuvaa ja nopeaa vetäytymistä Pine Islandin, Thwaitesin, Haynesin, Smithin ja Kohlerin jäätiköiden pohjautumislinjoilla. Tämä vetää suuren Länsi-Antarktiksella sektorin taantuvaksi. Vetäytyminen etenee nopeasti virtaavia kiihtyviä sektoreita pitkin, jotka ohenevat, alkavat kellua ja irtoavat pohjasta. Meren pohjasta ei löydy suuria esteitä vuoden 2011 pohjautumislinjasta ylävirtaan, jotka voisivat estää tulevan pohjautumislinjojen vetäytymisen (Rignot et al., 2014).

Amundsenin merellä jään kokonaispurkautuminen on lisääntynyt 77 prosenttia vuodesta 1973. Puolet tästä noususta tapahtui vuosien 2003 ja 2009 välillä (Feldmann et al., 2015).

Jäätiköiden vetäytymisen ja hyllyjäätiköiden sulamisen välillä on vahva kytkentä (Feldmann et al., 2015). Hyllyjäätiköiden sulaminen johtuu lähes muuntumattoman sirkumpolaarisen syvän veden läsnäolosta Pine Island Bayn mannerjalustalla (Rignot et al., 2002).

Thwaites-jäätikön virtaamisnopeudet nousivat nopeasti 2006 vuoden jälkeen, seuraten lähes vuosikymmenen kestänyttä stabiiliutta, johtaen 33 prosentin kasvuun virtauksessa vuosien 2006 ja 2013 välillä (Feldmann et al., 2015).

Tulemme siihen tulokseen, että tämä Länsi-Antarktiksella sektori on joutunut merellisen mannerjäätikön epävakauden tilaan (marine ice sheet instability), joka merkittävästi edistää merenpinnan nousua tulevista vuosikymmenistä vuosisatoihin. Feldman et al. (2015) simulaatioissa alue epävakautuu 60 vuoden jälkeen tällä hetkellä havaittuja sulamisen määriä (melt rates). Merellisen mannerjäätikön epävakauden tila tarkoittaa itseään ylläpitävää pohjautumislinjojen vetäytymistä, jonka laukaisevat valtamerelliset ja ilmakehälliset muutokset (Ritz et al., 2015).

Jos Amundsen meren sektori on epävakautunut, silloin koko merellinen mannerjäätikkö purkautuu mereen aiheuttaen 3 metriä globaalia merenpinnan nousua. Näissä epävakautuneissa simulaatioissa suuri osa Länsi-Antarktiksella merellisestä jäästä purkautuu: suuri osa Pine Islandin ja Thwaitesin valuma-alueista tyhjenee alle 3000 vuodessa. Pohjautumislinja vetäytyy nopeasti sisämaahan. Nykyisin nämä alueet toimivat varastoina, jotka ruokkivat Filchner-Ronnen ja Rossiin hyllyjäätiköitä. Pine Islandin ja Thwaitesin valuma-alueiden epävakaus siirtyy näin ollen Filchner-Ronnen ja Rossin hyllyjäätiköiden alueille. Tämä oheneva signaali saapuu lopulta näiden alueiden pohjautumislinjoille. Tämä pohjautumislinjojen häiriö aiheuttaa epävakautumista myös Filchner-Ronnella ja Rossilla. Nykyiset havainnot Länsi-Antarktiksella vetäytymisestä saattavat merkitä alkua tuhansien vuosien aikaskaalaiselle itseään ylläpitävälle jään purkautumiselle Länsi-Antarktiksella (Feldmann et al., 2015).

### **5.1.1 Pine Island**

Vuonna 1994 valtamerimittaukset lähellä Pine Island -jäätikköä osoittivat, että hyllyjäätikkö, joka tukee mannerjäätikköä, oli sulamassa nopeasti. Tämä sulaminen liitettiin suhteellisen lämpimän veden eli syvän veden läsnäoloon Amundsenin meren mannerjalustalla (Jacobs et al., 2011).

Pine Island-jäätikkö on osoittanut lähes jatkuvaa kiihtyvää ohenemista. Tätä muutosta ajavat valtameren lämmön kuljetuksen muutokset sen alapuolella. Tämän seurauksena pohjautumislinja on vetäytynyt sisämaahan. Pohjautumislinjan vetäytyminen merenpohjan sillalta on jättänyt yli 30 kilometriä aiemmin pohjautunutta jäätikköä alttiiksi lämpimälle valtameren vedelle (Jenkins et al., 2010).

Tehokas vertikaalinen lämmön vaihto on aiheuttanut nopeaa sulamista ohentaen hyllyjäätikköä ja laajentaen aukkoa sillan yläpuolella. Tämä taas on helpottanut ulomman ja sisemmän onkaloston (cavity) veden vaihtoa ja vähentänyt sekoittumista sisään- ja ulosvirtauksen välillä johtaen kohonneeseen lämmön kuljetukseen sisempiin onkaloihin ja progressiivisesti vahvistanut sulamista pohjautumislinjan lähellä. (Jenkins et al., 2010).

### 5.1.2 Thwaites

Thwaites-jäätikkö, Länsi-Antarktiksella on kokenut nopean, mahdollisesti peruuttamattoman pohjautumislinjan vetäytymisen ja massan menetyksen vastauksena tehostuneelle hyllyjäätiköiden sulamiselle. Tulokset viimeaikaisista numeerisista malleista ehdottavat laajalle levinnyttä, nopeaa ja jatkuvaa jäätikön vetäytymistä (Yu et al., 2018).

Jään menetykset ovat kohtalaisia tämän vuosisadan ajan, mutta kasvavat sen jälkeen. Kaikissa paitsi mahdollisessa vähäisimmän sulamisen skenaariossa osoitetaan, että merellisen mannerjäätikön epävakauden tilan (marine ice sheet instability) varhainen vaihe on alkanut (Joughin et al., 2014).

Länsituulten vahvistuminen Antarktiksella ympärillä parin viime vuosikymmenen aikana on pakottanut enemmän lämmintä, suolaista sirkumpolaarista syvää vettä mannerjalustalle ja hyllyjäätiköiden onkaloihin (Yu et al., 2018). Ellei sirkumpolaarisen syvän veden määrä vähene merkittävästi vähentäen pohjan sulamista huomattavasti nykyistä alhaisemmaksi, on vaikeaa nähdä Thwaites-systeemin vakautuvan, edes kohonneen pinnan akkumulaation myötä. Vaikka yksinkertainen sulaparametrisointi ehdottaa, että täysimittainen tämän sektorin romahtaminen saattaa olla väistämätön, se jättää paljon epävarmuutta sen ajoituksen kanssa. Eri simulaatioissa se vaihtelee kahdesta yhdeksään vuosisataan (Joughin et al., 2014).

Vetäytymistä kontrolloi pohjan (bed) topografia. Subglasiaaliset sillat itäisellä puolella kohtalaisesti viivytävät vetäytymistä, kun taas läntinen silta tarjoaa suurimman vakauden jäätikölle ainakin usean seuraavan vuosikymmenen ajan. Kun jäätikön pohjautumislinja vetäytyy läntisen subglasiaalisen sillan ohi, Yu et al. (2018) esittämä simulaatio ehdottaa, että siellä ei ole enää vakauttavia tekijöitä tarjolla ja vetäytyminen muuttuu pysäyttämättömäksi seuraavaksi sadaksi vuodeksi.



### 5.3 Totten

Totten on hyllyjäätikkö Itä-Antarktiksella, joka tukee meripohjaista (marine-based) mannerjäätikköä, jolla on potentiaalia nostaa merenpintaa ainakin 3,5 metriä. Totten kokee myös nopeaa pohjan sulamista (Rintoul et al., 2016).

Nykyisten havaintojen valossa Tottenin poikimisedustalta (front) saadaan vahvistus, että lämmin vesi saapuu onkaloihin vastikään löydettyjen syvien kanavien kautta (Rintoul et al., 2016).

Valtameren lämmön kuljetus onkaloihin on riittävä ylläpitämään suuria pohjan sulamisen määriä (Rintoul et al., 2016).

Useat todisteet tukevat päätelmää, että nopea Tottenin hyllyjäätikön pohjan sulaminen on lämpimän muuntuneen sirkumpolaarisen syvän veden aiheuttamaa (Rintoul et al., 2016).

Phipps et al. (2016) ehdottavat, että yhden sektorin sulaminen Itä-Antarktikselle voisi johtaa kiihtyneeseen sulamiseen muilla sektoreilla, mukaan lukien Weddell-meren sektorin Länsi-Antarktiksella. Näinollen paikallinen sulaminen Itä-Antarktiksella voisi mahdollisesti epävakauttaa laajemman Antarktisen mannerjäätikön.

## 6. Tulevaisuuden skenaarioita

Tässä luvussa perehdytään parin seuraavan vuosisadan kannalta mielenkiintoisiin tulevaisuuden Antarktiksien hyllyjäätiköiden sulamisen mahdollisiin skenaarioihin.

Ilmastomalleihin perustuvat projektiot osoittavat vahvaa tulevaisuuden kasvihuonekaasupakottamista, joka luo itsepintaisia keskimääräisiä idänsuuntaisia

hyllyjäätiköitä rikkovia tuulia vuoteen 2100 mennessä, johtaen edelleen tehostuneisiin lämpimän valtameren anomalioihin. Nämä tuulen muutokset ovat heikompia skenaariossa, jossa kasvihuonekaasujen konsentraatio on vakaantunut (Holland et al., 2019).

### **6.1 Merijään lisääntyminen vastustaa ilmaston muutosta:**

Kiihtynyt Antarktiksien hyllyjäätiköiden pohjan sulaminen on luultavasti vaikuttanut merkittävästi merijään laajenemiseen. Sulamisvesi Antarktiksien hyllyjäätiköiltä kertyy kylmäksi ja makeaksi pintakerrokseksi, joka suojaa valtameren pintaosaa lämpimämmiltä syviltä vesiltä ja niiden hyllyjäätiköitä sulattavalta vaikutukselta (Bintanja et al., 2013).

Yhteys vedenpinnanalaisen valtameren lämpenemisen ilmastonmuutoksen johdosta, mannerjään massakadon ja laajenevan merijään välillä saattaa muodostaa takaisinkytkennän, jolla on potentiaalia vastustaa eteläisen pallonpuoliskon ilmakehällistä lämpenemistä ja globaalia merenpinnan nousua (Bintanja et al., 2013).

Merijään viimeaikainen laajeneminen, pinnanalaisen eteläisen valtameren lämpeneminen sekä Antarktisten hyllyjäätiköiden sulaminen saattaa johtaa merijään laajenemisen jatkumiseen ja jopa pintaveden viilenemiseen eteläisellä valtamerellä tulevina vuosina/vuosikymmeninä (Bintanja et al., 2013).

### **6.2 Pohjan sulamisen määrän kasvu**

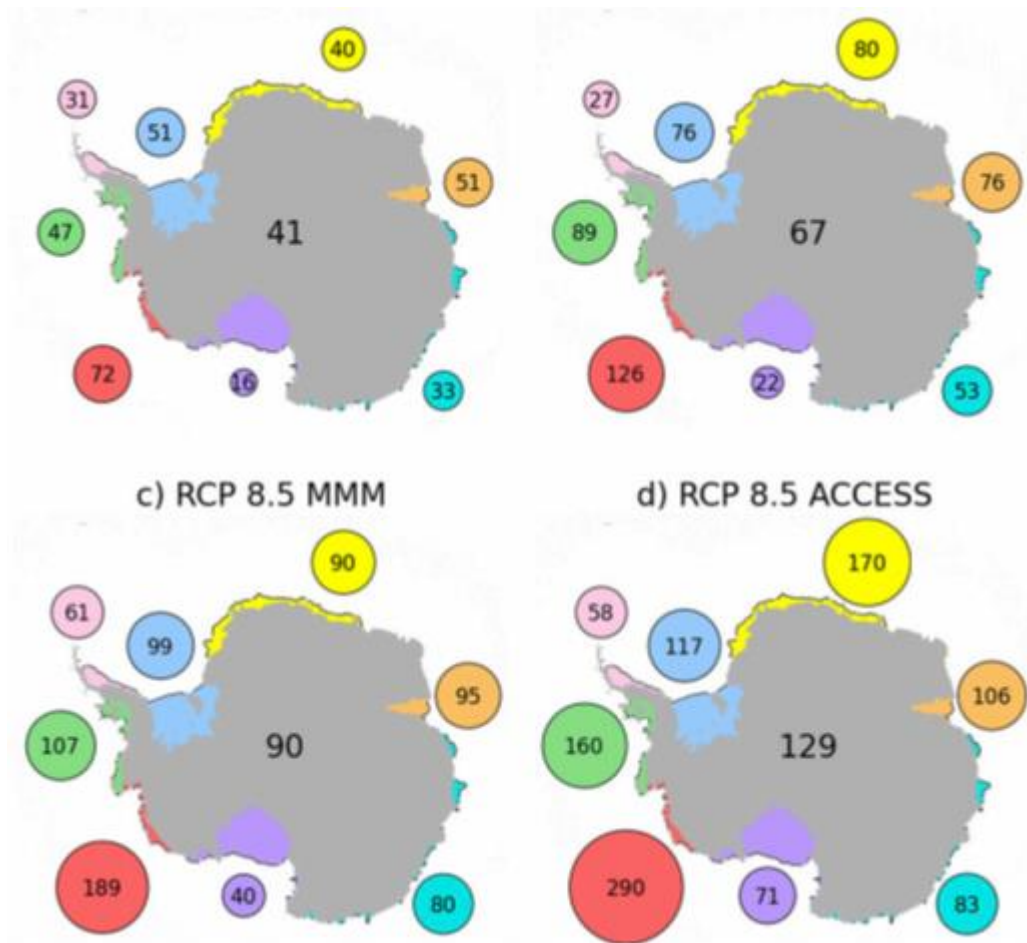
Antarktiksien hyllyjäätiköiden pohjan sulamisen (basal melt) määrän on odotettu kasvavan tämän vuosisadan aikana valtameren lämmitessä (Naughten et al., 2018).

Naughten et al. (2018) esittelevät tulevaisuuden skenaarioita Antarktisten hyllyjäätiköiden sulamisesta käyttäen Finite Element Sea Ice/Ice-Shelf Ocean mallia (FESOM)

pakotettuna ilmakehällisten ulostulojen kanssa malleista 5 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5).

Seuraavan sadan vuoden simulaatioissa hyllyjään pohjan massakato (basal mass loss) nousee koko Antarktiksella 49-129 prosenttia. Jokainen sektori Antarktiksella osoittaa kohonnutta pohjan sulamista joka skenaariossa. Suurin kasvu tapahtuu Amundsenin merellä. Rossin merellä sulaminen kiihtyy vähiten kaikissa neljässä simulaatioissa. Pääasiallinen mekanismi, joka ajaa tätä sulamista on sirkumpolaarisen syvän veden lisääntyminen Antarktiksella mannerjalustalla. Merijään väheneminen talviaikaan kerrostaa vesikolumnia sallien lämpimän pohjakerroksen kehittymisen ja tunkeutumisen hyllyjäätiköiden onkaloihin. Heikentyneen merijään muodostumisen muita seurauksia ovat suolaisen hyllyveden makeutuminen ja Antarktiksien pohjaveden lämpeneminen. Lisäksi Antarktiksien rannikon ympäristön makeutuminen heidän simulaatioissaan aiheuttaa Antarktiksien sirkumpolaarisen merivirran heikkenemisen ja Antarktiksien rannikko virran voimistumisen (Naughten et al., 2018).

Ilmastoskenaariot vaihtelevat “best-case scenario”:sta, jossa kasvihuonekaasujen konsentraatio stabiloituu 2050-luvun tienoilla “business-as-usual scenario”:on, jossa kasvihuonekaasujen konsentraatio jatkaa kiihtymistään. Globaalit kasvihuonekaasu päästöt seuraavat parhaillaan “business-as-usual scenario”:ta (Naughten et al., 2018).



**Kuva 2.** Tässä kuvassa näemme tulevaisuuden prosentuaaliset muutokset hyllyjäätiköiden pohjan massakadolle (basal mass loss) eri RCP-simulaatioissa. Muutokset on laskettu vuosien 1996-2005 ja 2091-2100 vuosien keskiarvoista. Tulokset on jaettu kahdeksaan Antarktiksien sektoriin. Alueet on värikoodattu seuraavasti: Filchner-Ronne hyllyjäätikkö (sininen), itäinen Weddell alue (keltainen), Amery hyllyjäätikkö (oranssi), Australian sektori (sinivihreä), Rossin meri (violetti), Amundsenin meri (punainen), Bellinghausenin meri (vihreä) ja Larsenin hyllyjäätiköt (vaaleanpunainen). Jokaisen alueen sisälle on kirjoitettu niiden prosentuaalisen muutoksen osuus pohjan massakadossa (basal mass loss). Mantereen keskelle kirjoitettu luku on keskimääräinen prosentuaalinen muutos pohjan massakadossa (basal mass loss) ympäri Antarktiksien.

Muutokset pohjan massakadossa voidaan ymmärtää paremmin tutkimalla erilaisten vesimassojen evoluutiota hyllyjäätiköiden onkaloissa tällä vuosisadalla. Löydetään kuusi erilaista vesimassaa perustuen erillisiin lämpö- ja suolaisuus rajoihin. Hyllyjäätikkövesi (Ice Shelf Water), lämpötilaltaan pintaveden jäätympistettä alhaisempi, on hyllyjäätiköiden pohjien sulamisen tuottamaa. Antarktinen pintavesi (Antarctic Surface Water) on suhteellisen makeaa ja lämpenee merijään puuttumisen myötä. Matala suolainen hyllyvesi (Low Salinity Shelf Water) ja korkeasuolainen hyllyvesi (High

Salinity Shelf Water) ovat merijään muodostumisen tuotteita, niiden lämpötila on lähellä pinnan jäätymispistettä. Sirkumpolaarinen syvä vesi on lämpimin vesimassa hyllyjäätiköiden onkaloissa. Kun se ohittaa mannerjalustan, se voi muuntua monin tavoin sekoittuessaan kylmempiin vesimassoihin muodostaen muuntunutta sirkumpolaarista syvää vettä (Naughten et al., 2018).

Tällä vuosisadalla, Filchner-Ronne hyllyjäätikön alla korkeasuolainen hyllyvesi korvaantuu matalasuolaisella hyllyvedellä heikomman merijään muodostumisen vuoksi (Naughten et al., 2018).

Kaikki kolme vesimassaa kokevat pienen lämpenemisen (Naughten et al., 2018).

Amery-hyllyjäätikön onkalosto on matalasuolaisen hyllyveden dominoima, mutta se korvaantuu suhteellisen viileällä muuntuneella sirkumpolaarisella syvällä vedellä 2050-lukuun mennessä. Tämän jälkeen sen lämpötila nousee (Naughten et al., 2018).

Amundsenin merellä onkalosto on matalasuolaisen hyllyveden ja viileän muuntuneen sirkumpolaarisen syvän veden hallitsema (Naughten et al., 2018).

Tehostunut hyllyjäätiköiden pohjan sulaminen johtuu enimmäkseen valtameren lämpenemisestä hyllyjäätiköiden onkaloissa (cavity). Lämpenemisen kaksi päämekanismia ovat pinnan dominoima ja pohjan dominoiva lämpeneminen. Pinnan dominoimassa lämpenemisessä pintavesi lämpenee vähentyneen kesäisen merijää peitteen vuoksi. Lämmennyt pintavesi saattaa upota hyllyjäätiköiden alle. Pinnan dominoivan lämpenemisen alueita ovat Filchner, Larsen ja Wilkins, sekä itäinen Weddell, Australian sektori ja Rossin hyllyjäätikön edusta (front) (Naughten et al., 2018).

Pohjan dominoiva lämpeneminen tarkoittaa kasvanutta sirkumpolaarisen syvän veden tai muuntuneen sirkumpolaarisen syvän veden läsnäoloa. Pohjan dominoimalla lämpenemisellä näyttäisi olevan suurempi merkitys Naughten et al. (2018) simulaatioissa. Amundsenin merellä tämä vaikuttaa eniten. Lisäksi tämä vaikuttaa Abbotilla, Amerylla, läntisellä itäisen Weddell meren osalla ja Ronnellalla.

Toisin kuin muut tämän vuosisadan projektiot FESOM:illa Naughten et al. (2018) simulaatio ei osoita antarktisen rannikkovirtauksen uudelleen ohjaantumista Filchner-Ronne hyllyjäätiköllä, jota käsitellään seuraavassa luvussa. Heidän simulaatiossaan näkyy yhdistelmä erilaisia prosesseja, jotka ajavat sulamista Filchner-Ronnen alapuolella. Ronnen hyllyjäätikköön vaikuttaa myös hieman pohjan dominoiva lämpeneminen. Vähentynyt kierto Ronnen painaumassa (depression) sallii lämpimämmän pohjakerroksen muodostumisen, matalasuolaisesta hyllyvedestä tai korkeasti muuntuneesta sirkumpolaarisesta syvästä vedestä, joka virtaa Ronnen onkaloihin (Naughten et al., 2018).

Merijään pohjoinen osio vetäytyy kaikissa neljässä simulaatiossa (Naughten et al., 2018).

Simuloidussa nykypäivän ilmastossa, merijään muodostuminen ajaa konvektiota mannerjalustalla, joka suojelee hyllyjäätiköiden onkaloita lämpimältä sirkumpolaariselta syvältä vedeltä ja muuntuneelta sirkumpolaariselta syvältä vedeltä. Tämän vuosisadan aikana simulaatiossa lämpimämmät talvet ja vähäisempi merijään muodostuminen aiheuttaa kasvanutta vesipatsaan kerrostumista (stratification of water column). Vähempi sekoittuminen kerrosten välillä sallii lämpimän pohjakerroksen kehittymisen monilla alueilla (Naughten et al., 2018).

### **6.3 Merivirran uudelleen ohjautuminen Filchner-Ronnella:**

Suuren Filchner-Ronnen hyllyjäätikön alueella eteläisellä Weddell-merellä syvä merivesi on kylmää. Pohjan sulamisen määrä alueella on siksi tällä hetkellä alhaista, mutta viimeaikaiset mallinnukset ennustavat, että muuttuvat merijääolosuhteet aiheuttaisivat rannikoiden merivirran uudelleenohjautumisen seuraavan vuosisadan aikana tavalla, joka sallii lämpimän syvän veden pääsyn Filchner-hyllyjäätikön onkaloihin Filchner painauman kautta. Sulamisen määrät nousisivat näinollen dramaattisesti (Darelius et al., 2016).

Darelius et al. (2016) esittelevät havaintojaan Filchner-hyllyjäätikön läheisyydeltä ja Filchner-painaumasta, jotka osoittavat, että lämpimän veden pulsseja saapuu jo niinkin kauas etelään kuin jään edustalle. Tämä etelänsuuntainen lämmön kuljetus seuraa Filchner-painauman itäistä sivua ja se on suoraan liitetty tuulen ajaman rannikkovirtauksen vahvuuteen.

Vahvojen itäisten tuulten vaikutus on kahtalainen ja riippuu aikaskaalasta, jota tarkastellaan. Pidemmällä (kuukausittaisella) aikaskaalalla se painaa termokliiniä mannerrinteen yläpuolelle, sulkien lämpimänveden sisään virtauksen kohti mannerjalustaa. Lyhyemmällä (päivittäisellä) aikaskaalalla se vahvistaa rannikkovirtausta ja tehostaa lämpimän veden etelänsuuntaista kuljetusta hyllylle (Darelius et al., 2016).

Rannikkovirtauksen uudelleen ohjautuminen Filchner-painanteeseen (trough) ja Filchner-Ronnen hyllyjäätikön alapuolelle tämän vuosisadan toisen puoliskon aikana johtaisi lämpimien vesien liikkeiden kasvuun syvälle eteläiseen hyllyjäätikön onkalostoon. Veden lämpötila nousisi yli kahdella Celcius-asteella ja nostaisi keskimääräistä pohjan sulamista suuresti (Hellmer et al., 2012).

Aiemmin ajateltiin Filchner-Ronne -hyllyjäätikön olevan turvassa lämpenevässä ilmastossa, mutta tämä näkökanta koski vain tiheitä mannerjalustan vesimassoja lämpenevässä ilmastossa, mutta vähemmän lujittunut merijää kerros voi myös vaikuttaa Weddell-meren kiertoon, mukaan lukien rannikko virtausten suuntiin (Hellmer et al., 2012).

Hellmer et al. (2012) tutkimuksessa pakotettiin BRIOS-malli (Bremerhaven Regional Ice-Ocean Simulations) yhteen kahden HadCM3:sen ilmastomallin tulosten kanssa. Näitä skenaarioita kuvaavat erilaiset hiilidioksidi päästöt.

Simuloidun nykypäivän mallin mukaan, rinne-edusta (slope front) erottaa hyllyveden suhteellisen lämpimästä vedestä. Kuitenkin vuodesta 2036 alkaen, lämpimän veden pulssit ohittavat 700 metriä syvän kynnyksen silloin tällöin Filchner-painaumassa sen

itäisellä sivulla, mutta eivät saavuta eteläistä hyllyjäätikön edustaa. Vuoden 2070 nolaa celsius-astetta lämpimämpi vesi alkaa saapua Filchner-painanteeseen jatkuvasti, saavuttaen pohjautumislinjat kuusi vuotta myöhemmin. 14 vuoden päästä tästä koko painanne ja eteläinen puoli Ronne-hyllyjäätikön onkaloita on täyttynyt avomeren vedellä. Tämä aiheuttaa syvän eteläisen onkaloston lämpenemisen yli kahdella Celsius-asteella. Satunnainen lämpimän veden virtaus Filchner-painanteella tällä vuosisadalla, kuten myös sen etelänsuuntainen eteneminen on myös ehdotettu tuloksena finite element -malliin FESOM. Kun se pakotetaan yhteen HadCM3-B/A1B: n tulosten kanssa. FESOM on jää-valtameriali, joka ottaa myös hyllyjäätiköt huomioon. Näinollen mallin odotetaan reagoivan intensiivisemmin ilmakehän ja merijään häiriöihin. FESOM-mallissa, lämpimät vesipulssit saavuttavat Filchner-Ronne -hyllyjäätikön onkalot vähemmän laimentuneena ja näinollen aiheuttavat merkittävää nousua pohjan sulamisen määrässä (Hellmer et al., 2012).

Analyysi paljastaa, että rannikkovirtauksen uudelleen ohjautuminen kaakkoisella Weddell-merellä aiheutuu paikallisesti monien ilmastokomponenttien tuloksena. Tehostunut pinnan stressi uudelleenohjaa rannikko virran etelänsuuntaiseksi kohti Filchner-Ronnen hyllyjäätikön edustaa. 80 prosenttia muutoksista tapahtuu tällä vuosisadalla (Hellmer et al., 2012).

Samoja rajuja muutoksia Filchner-Ronnen hyllyjäätikön pohjan sulamisessa tapahtuu myös simulaatioissa, jotka on pakotettu yhteen A1B tuloksen kanssa HadCM3-B:ssä, mutta viidenkymmenen vuoden viiveellä (Hellmer et al., 2012).

Monet kokeet osoittavat, että hyllyjäätiköt mukautuvat häiriöihin valtameren lämpötilassa aikaskaaloissa vaihdellen muutamista vuosikymmenistä muutamiin vuosisatoihin (Hellmer et al., 2012).



## 7. Yhteenveto

Hyllyjäätiköt ovat tärkeitä ilmastonmuutoksen vaikutusten vastustajia Antarktiksella. Ne tukevat mannerjäätiköitä ylävirrassa ja estävät niitä virtaamasta mereen. Viime aikoina tehdyt havainnot osoittavat, että hyllyjäätiköt Antarktiksella ympärillä ohenevat vauhdilla, vetäytyvät sekä romahtavat. Tämä merkitsee hyllyjäätiköiden tuen vähenemistä mannerjäätiköille.

Hyllyjäätiköt vetäytyvät ja ohenevat enimmäkseen kahden päämekanismin johdosta, jäävuorten poikimisen ja pohjan sulamisen kautta. Tuuli ja veden kumpuaminen vaikuttavat jäävuorten poikimiseen, sillä ne lisäävät halkeilua sekä hyllyjäätiköiden vetäytymistä. Jäävuorten poikimistapahtumat voivat olla dramaattisia hyllyjäätiköiden pirstoutuessa pieniin kappaleisiin. Pohjan sulaminen hyllyjäätiköillä johtuu pääasiallisesti sirkumpolaarisen syvän veden läsnäolosta hyllyjäätiköillä ja sen pääsystä hyllyjäätiköiden onkaloihin.

Sirkumpolaarinen syvä vesi on lämpimin vesimassa Antarktiksella ympärillä. Se on alkuperältään sekoitusta kaikkien valtamerien syvistä vesistä. Sirkumpolaarinen syvä vesi saavuttaa hyllyjäätiköt usein muuntuneena sekoituttuaan kylmempien vesimassojen kanssa. Pohjan morfologia vaikuttaa merkittävästi siihen saavuttaako sirkumpolaarinen syvä vesi onkaloita hyllyjäätiköiden alla tai niiden syviä pohjautumislinjoja, joilla hyllyjäätikkö alkaa kellua.

Amundsenin meren sektori on kokenut merkittäviä muutoksia jään menetyksessä, sillä sen jään kokonaispurkautuminen on kasvanut 77 prosenttia vuodesta 1973 lähtien. Amundsenin meren sektorilla etenkin Pine Island ja Thwaites -jäätiköt tunnetaan niiden mahdollisen epävakautumisen vuoksi. Tämä epävakautuminen voi johtaa merellisen mannerjäätikön epävakauden tilaan, joka on itseään ylläpitävä pohjautumislinjojen vetäytyminen. Tämän alueen epävakautuminen voi johtaa tulevaisuudessa koko Länsi-Antarktiksella alueen romahtamiseen.

Totten hyllyjäätikkö Itä-Antarktiksella kokee myös nopeaa pohjan sulamista. Itä-Antarktiksella yhden sektorin romahtaminen voisi johtaa laajemman mannerjäätikön epävakautumiseen.

Tulevaisuudessa laajentunut merijää voi aluksi luoda takaisinkytkennän, jolla on mahdollisuus vastustaa eteläisen pallonpuoliskon ilmakehällistä lämpenemistä. Lopulta merijää alkaa kuitenkin vetäytyä Antarktiksellakin. Tämä merijään väheneminen voi johtaa lämpimän pohjakerroksen kehittymiseen ja sen tunkeutumiseen hyllyjäätiköille. Kaikkien Antarktiksien hyllyjäätiköiden pohjan sulamisen määrä tulee nousemaan tällä vuosisadalla 49-129 prosenttia. Muuttuvat merijää olosuhteet voisivat aiheuttaa myös rannikkovirtauksen uudelleen ohjautumisen suurella Filchner-Ronnen hyllyjäätiköllä. Tämä johtaisi nykyisin vakaan hyllyjäätikön taantumiseen.

Tulen sellaisiin päätelmiin, että Antarktiksien hyllyjäätiköiden sulaminen tulee vaikuttamaan tulevaisuuteen suuresti. Jos hyllyjäätiköt kokevat merellisen mannerjäätikön epävakautumisen, koko Antarktiksien manner voi lopulta taantua ja nostaa merenpintaa huimasti. Tämä vaikuttaisi ihmisiin suuresti kaupunkien jäädessä vedenpinnan alapuolelle. Mielestäni on siis erittäin tärkeää seurata Antarktiksien haavoittuvaisimpia alueita tarkasti ja yrittää myös vaikuttaa tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen määrään.

## Lähdeluettelo:

- Alley, K. E., Scambos, T. A., Siegfried, M. R. ja Fricker, H. A., 2016. Impacts of Warm Water on Antarctic Ice Shelf Stability through Basal Channel Formation. *Nature Geoscience* 9, 290–293.
- Bintanja, R., van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S. S, Wouters, B. ja Katsman, C.A., 2013. Important Role for Ocean Warming and Increased Ice-Shelf Melt in Antarctic Sea-Ice Expansion. *Nature Geoscience* 6, 376–379.
- Cook, A. J. ja Vaughan, D. G., 2010. Overview of Areal Changes of the Ice Shelves on the Antarctic Peninsula over the Past 50 Years. *The Cryosphere* 4, 77–98.
- Darelius, E., Fer, I. ja Nicholls K. W., 2016. Observed Vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to Wind-Driven Inflow of Warm Deep Water. *Nature Communications* 7, artikkelinnumero 12300.
- Depoorter, M. A., Bamber, J. L., Griggs J. A., Lenaerts, J. T. M., Ligtenberg, S. R. M., van den Broeke, M.R. ja Moholdt, G., 2013. Calving Fluxes and Basal Melt Rates of Antarctic Ice Shelves. *Nature* 502, 89–92.
- Dinniman, M. S., Klinck, J. M. ja Smith, W. O., 2011. A Model Study of Circumpolar Deep Water on the West Antarctic Peninsula and Ross Sea Continental Shelves. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 58, 1508–1523.
- Edwards, T. L., Brandon, M. A., Durand, G., Edwards, N. R., Golledge, N. R., Holden, P. B., Nias, I. J., Payne, A. J., Ritz, C. ja Wernecke, A., 2019. Revisiting Antarctic Ice Loss Due to Marine Ice-Cliff Instability. *Nature* 566, 58–64.
- Feldmann, J. ja Levermann, A., 2015. Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after Local Destabilization of the Amundsen Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 14191–14196.
- Gagliardini, O., 2018. The Health of Antarctic Ice Shelves. *Nature Climate Change* 8, 15–16.
- Hattermann, T., ja Levermann, A., 2010. Response of Southern Ocean Circulation to Global Warming May Enhance Basal Ice Shelf Melting around Antarctica. *Climate Dynamics* 35, 741–756.
- Hellmer, H. H., Kauker, F., Timmermann, R., Determann, J. ja Rae, J., 2012. Twenty-First-Century Warming of a Large Antarctic Ice-Shelf Cavity by a Redirected Coastal Current. *Nature* 485, 225–228.
- Holland, P. R., Bracegirdle, T. J., Dutrieux, P., Jenkins, A. ja Steig E. J., 2019. West Antarctic Ice Loss Influenced by Internal Climate Variability and Anthropogenic Forcing. *Nature Geoscience* 12, 718–724.
- Ingels, J., Aronson R. B., ja Smith, C. R., 2018. The scientific response to Antarctic ice-shelf loss. *Nature Climate Change* 8, 843-851.
- Jacobs, S. S., Jenkins, A., Giulivi, C. F. ja Dutrieux, P., 2011. Stronger Ocean Circulation and Increased Melting under Pine Island Glacier Ice Shelf. *Nature Geoscience* 4, 519–523.
- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs S. S., McPhail, S. D., Perrett, J.R., Webb, A. T. ja White, D., 2010. Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and Implications for Its Retreat. *Nature Geoscience* 3, 468–472.
- Joughin, I., Smith B. E. ja Medley, B., 2015. Marine Ice Sheet Collapse Potentially Underway for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science* 344, 735-738.

- Konrad, H., Shepherd, A., Gilbert, L., Hogg, A. E., McMillan, M., Muir, A. ja Slater, T., 2018. Net Retreat of Antarctic Glacier Grounding Lines. *Nature Geoscience* 11, 258–262.
- Naughten, K. A., Meissner, K. J., Galton-Fenzi, B. K., England, M. H., Timmermann, R. ja Hellmer, H. H., 2018. Future Projections of Antarctic Ice Shelf Melting Based on CMIP5 Scenarios. *Journal of Climate* 31, 5243–5261.
- Pachauri R.K, ja Meyer L. A., 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate change. Geneve, Sveitsi, s.8, 16 ja 48.
- Phipps, S. J., Fogwill, C. J., ja Turney, C. S. M., 2016. Impacts of Marine Instability across the East Antarctic IceSheet on Southern Ocean Dynamics. *The Cryosphere* 10, 2317–2328.
- Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegria A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B. ja Weyer N.M., 2019. *IPCC Special Report on The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change. S. 6 ja 9-10.
- Rignot, E., 2002. Rapid Bottom Melting Widespread near Antarctic Ice Sheet Grounding Lines. *Science* 296, 2020–2023.
- Rignot, E., S. J., Mouginot, J. ja Scheuchl, B., 2013. Ice-Shelf Melting Around Antarctica. *Science* 341, 266–270.
- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H. ja Scheuchl, B., 2014. Widespread, Rapid Grounding Line Retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters* 41, 3502–3509.
- Rintoul, S. R., Silvano, A., Pena-Molino, B., van Wijk, E., Rosenberg, M., Greenbaum, J. S. ja Blankenship, D. D., 2016. Ocean Heat Drives Rapid Basal Melt of the Totten Ice Shelf. *Science Advances* 2, artikkelinumero e1601610.
- Ritz, C., Edwards, T. L., Durand, G., Payne, A. J., Peyaud, V. ja Hindmarsh, R. C. A., 2015. Potential Sea-Level Rise from Antarctic Ice-Sheet Instability Constrained by Observations. *Nature* 528, 115–118.
- Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F. ja Aoki, S., 2014. Multidecadal Warming of Antarctic Waters. *Science* 346, 1227-1231.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner K.-G., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. ja Midgley P.M., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for policy makers*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Iso-Britannia ja New York: Cambridge University Press. s.11.
- Yu, H., Rignot, E., Seroussi, H. ja Morlighem, M., 2018. Retreat of Thwaites Glacier, West Antarctica, over the next 100 Years Using Various Ice Flow Models, Ice Shelf Melt Scenarios and Basal Friction Laws. *The Cryosphere* 12, 3861–3876.