

Ilmastonmuutoksen vaikutukset massaliikuntoihin Alppien
vuoristossa: esimerkkinä debrisivirtaukset sekä kivi- ja lumivyöryt

Elli Vikstedt

LuK-seminaari ja tutkielma 790351A

Maantieteen tutkinto-ohjelma

Oulun Yliopisto

30.11.2021

Tiivistelmä

Ilmastonmuutos on megatrendi, joka on ollut viime vuosina pinnalla sekä tieteellisissä julkaisuissa että valtamediassa. Ilmastonmuutos vaikuttaa valintoihimme jatkuvasti ja siitä on tullut merkittävä osa elämäämme. Ilmastonmuutoksen vaikutukset eivät jakaudu tasaisesti maapallolla, mikä ajaa alueet eriarvoiseen asemaan. Etenkin vuoristoympäristöt ovat herkkiä ilmaston vaihtelulle, ja tulevaisuudessa ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan esimerkiksi massaliikuntojen esiintymiseen vuoristoissa. Koska massaliikuntojen merkitys vuoristoalueilla on suuri, on niiden muuttumisen tutkiminen tärkeää. Vaikka ihminen voi omalta osaltaan hallita massaliikuntoja esimerkiksi keinotekoisien suojarakenteiden avulla, ihmisen ajama ilmastonmuutos kuitenkin monissa tapauksissa altistaa alueita yhä enemmän massaliikuntojen aiheuttamille vahingoille.

Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia, miten ilmastonmuutos vaikuttaa massaliikuntoihin Alppien vuoristossa. Tutkielmani on kirjallisuuskatsaus, jossa käsittelen eri massaliikuntotyyppien reagointia ilmastonmuutokseen Alpeilla. Käsittelyyn olen valinnut debrisvirtaukset, kivivyöryt ja lumivyöryt, sillä näiden massaliikuntotyyppien merkitys Alppiympäristössä on suuri ja niiden esiintymisen ennustetaan muuttuvan ilmastonmuutoksen edetessä. Kyseisten massaliikuntojen muutoksia on myös helpompi havainnoida verrattuna esimerkiksi hitaampiin massaliikuntomuotoihin, koska nopeita liikuntoja on helpompi seurata. Työni ideana on selvittää, miten ilmastonmuutoksen eri vaikutukset, kuten lämpötilan ja sateiden muutokset, vaikuttavat massaliikuntoihin tulevaisuudessa ja onko muutoksia jo havaittu.

Tutkielmani perusteella voidaan olettaa, että massaliikunnot tulevat todennäköisesti lisääntymään Alpeilla ilmastonmuutoksen myötä. Toisaalta tietyt tekijät, kuten kasvillisuuden lisääntyminen, voivat osaltaan vähentää massaliikuntojen esiintymistä vuoristoympäristöissä. Ilmastonmuutoksen on jo todettu vaikuttavan massaliikuntojen lisääntymiseen eri puolella Alppien vuoristoja. Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan luontoon globaalilla tasolla, mutta Alppien vuoristo on erityisen herkkä sen vaikutuksille, sillä lumen ja jään merkitys vuoristoalueella on suuri. Tästä syystä massaliikuntojen ennustetaan lisääntyvän entisestään. Aiheen tutkiminen on tarpeellista, jotta muutoksiin voidaan varautua tulevaisuudessa ja kehittää teknologioita, jotka mahdollistavat massaliikuntojen hallitsemista ja ennustamista.

Sisältö

1 Johdanto	4
2 Massaliikunnot	6
2.1 Yleisesti massaliikunnoista.....	6
2.2 Massaliikuntojen mekaniikka.....	6
2.3 Debrisvirtaukset.....	7
2.4 Kivivyöryt.....	8
2.5 Lumivyöryt.....	9
3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset Alpeilla	11
3.1 Alppien esittely.....	11
3.2 Vaikutusten ulottuvuus.....	11
3.3 Lämpötila.....	12
3.4 Sateet ja lumipeite.....	13
3.5 Jään vetäytyminen.....	15
3.6 Ikirouta.....	16
3.7 Rapautuminen ja kallioperä.....	16
3.8 Kasvillisuus.....	17
3.9 Maankäyttö.....	18
4 Muutokset massaliikunnoissa Alpeilla ilmaston muuttuessa	19
4.1 Lämpötila.....	19
4.2 Lumi ja sateet.....	20
4.3 Jään vetäytyminen.....	21
4.4 Ikirouta.....	22
4.5 Rapautuminen ja kallioperä.....	23
4.6 Kasvillisuus.....	24
4.7 Maankäyttö.....	24
5 Pohdinta	25
Lähteet	28

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksesta on Wulffin (2021) mukaan kehittynyt yksi ihmiskunnan suurimmista haasteista sekä yhteiskunnallisesta, että tieteellisestä näkökulmasta. Ilmastonmuutos on ajankohtainen aihe, jota tutkitaan jatkuvasti eri näkökulmista. Maapallon ilmasto on vaihdellut kautta aikojen, ja ilmasto on muuttunut nykyistä suuremmalla nopeudella jo ennen ihmistä (Lunkka 2008: 11). Tässä työssä käytän ilmastonmuutos-termiä kuvaamaan meneillään olevaa globaalia ilmaston lämpenemistä, johon ihmiskunta on vaikuttanut. Lunkan (2008: 13) mukaan teollisen vallankumouksen jälkeen ilmaston kasvihuonekaasupitoisuudet ovat kasvaneet ilmakehässä, millä on merkittävä vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Hallitusten välisen ilmastopaneelin IPCC:n mukaan sateet ja suuret sademäärät tulevat lisääntymään ilmaston lämmitessä (IPCC 2021). Pariisin ilmastosopimus solmittiin vuonna 2015 ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi, mutta siihen liittyviä tavoitteita ei ole täytetty (Wulff 2021).

Jo vuosikymmenten ajan korkeat vuoristoalueet ovat näyttäneet merkkejä ilmastonmuutoksesta (Wulff 2021). Vuoristoalueet ovat erityisen herkkiä ilmastonmuutoksen vaikutuksille (Castebrunet ym. 2012; Rangwala & Miller 2012). Yksi syy tähän on kryosfäärin hallitseva merkitys vuoristoissa (Chiarle ym. 2021). Kryosfääri käsittää veden kiinteän olomuodon eli maapallolla olevan lumen ja jään (Gregory 2010: 44). Haerbelin ja Benistonin (1998) mukaan kylmien vuoristoalueiden jäätiköt, ikirouta ja lumi ovat erityisen herkkiä ilmakehän olosuhteiden muutoksille sulamisriskin vuoksi. Alppien vuoristo on tyypillinen esimerkki vuoristoalueesta, jossa ilmastonmuutos vaikuttaa merkittävästi alueen herkkään luontoon esimerkiksi kryosfäärin muutosten, kuten jäätiköiden ja ikiroudan sulamisen kautta.

Price (1986: 5) määrittelee korkean vuoristoympäristön seuraavasti: puurajan yläpuolella oleva alue, jota kuvaavat jäätiköt, pakkaneen sekä massaliikunnot. Tämä määritelmä kuvastaa hyvin sitä, että massaliikuntojen merkitys vuoristoissa on suuri. Kylmien vuoristojen jyrkät rinteet tarjoavat optimaaliset olosuhteet voimakkaimpien massaliikuntojen syntymiselle (Haerbeli & Beniston 1998). Massaliikunnot vaikuttavat suuresti luontoon ja ihmisten elämään vuoristoalueilla. Ilmastonmuutos tulee lisäämään massaliikuntojen määrää Alppien vuoristossa (Pröbstl-Haider ym. 2016) ja tieteelliset tutkimustulokset auttavat ihmisiä varautumaan ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin rinteiden stabiiliudessa.

Työssäni käsittelen ilmastonmuutoksen vaikutusta Alppien vuoriston massaliikuntoihin. Aloitan kertomalla massaliikuntojen yleispiirteistä sekä esittelemällä käsittelemäni massaliikuntotyypit. Seuraavana esittelen tutkimusalueeni ja käyn läpi ilmastonmuutoksen vaikutuksia Alpeilla. Neljännessä kappaleessa keskityn vastaamaan tutkimuskysymyksiini eli siihen, miten ilmastonmuutos vaikuttaa eri massaliikuntotyyppeihin Alpeilla. Tutkielmani päätteeksi kokoan erilaisia näkökulmia ilmastonmuutoksesta sekä massaliikuntojen lisääntymisestä.

Perehdyn tutkielmassani seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitkä ilmastonmuutokseen liittyvät tekijät vaikuttavat debrisvirtauksiin, kivivyöryihin ja lumivyöryihin Alppien vuoristossa?
2. Miten nämä tekijät vaikuttavat edellä mainittujen massaliikuntojen esiintyvyyteen Alpeilla?

2 Massaliikunnot

2.1 Yleisesti massaliikunnoista

Massaliikunnoissa rinteiden materiaali liikkuu alas rinnettä painovoiman vaikutuksesta (Gray 2004: 40). Massaliikunnon aiheuttaa siis painovoima eikä siihen liity ulkoista kuljetusta esimerkiksi veden tai jäätikön toimesta (Price 1981: 189). Materiaali voi liikkua esimerkiksi liukumalla, putoamalla tai virtaamalla (Gariano & Guzzetti 2016). Massaliikunto aiheuttaa rinteeseen pienemmän kaltevuuskulman, sillä osa rinteiden materiaalista siirtyy alemmas (Uusinoka 1981: 76). French (1996: 161) luokittelee debrisvirtaukset sekä kivi- ja lumivyöryt nopeiksi massaliikunnoiksi. Ilmiö ei rajoitu maanpinnan yläpuolelle, vaan massaliikuntoja esiintyy myös esimerkiksi valtamerien pohjalla (Skinner & Porter 2000: 226), mutta tässä tutkielmassa keskitytään maanpinnalla tapahtuviin massaliikuntoihin.

Rinteiden stabiiliuteen vaikuttavat monet tekijät. Ilmaston ja säähän liittyviä tekijöitä ovat esimerkiksi lämpötilan muutokset, sateet ja lumen sulaminen, mutta lisäksi rinteiden vakauteen voi vaikuttaa muun muassa vulkaaninen aktiivisuus, maan värähtely sekä ihmistoiminta (Gariano & Guzzetti 2016). Massaliikuntoja tapahtuu etenkin vuoristoissa, sillä jyrkät rinteet tarjoavat otolliset olosuhteet niiden syntyyn (Price 1986: 189). Chorley ym. (1984: 245) kuvailee massaliikunnoille alttiita olosuhteita seuraavasti: suuret korkeuserot, korkea sademäärä, rikkonaiset kivet sekä tektoninen aktiivisuus. Massaliikunnon laukaisevia tekijöitä voivat olla ilmaston ja säähän liittyvät tekijät, seismiset tapahtumat sekä ihmistoiminta (Gariano & Guzzetti 2016). Massaliikunnon aiheuttavia tapahtumia voivat olla esimerkiksi salamanisku, räjähdys, aseenseläus tai huuto (Monroe & Wicander 2001: 309).

Mainierin ym. (2020) mukaan massaliikunnoista tehdyt analyysit mahdollistavat jatkuvan aikajanan, jonka avulla voidaan tutkia ilmastonmuutoksen vaikutuksia massaliikuntojen kehitykseen. Toisaalta, Garianon ja Guzzetin (2016) mukaan aukot massaliikuntojen tapahtumahistoriassa vaikeuttavat tilastollista tutkimusta. Savi ym. (2021) kertoo tutkimuksessaan, että aiempien massaliikuntojen määrää on todennäköisesti aliarvioitu, joka vaikeuttaa kehityssuuntien määrittämistä.

2.2 Massaliikuntojen mekaniikka

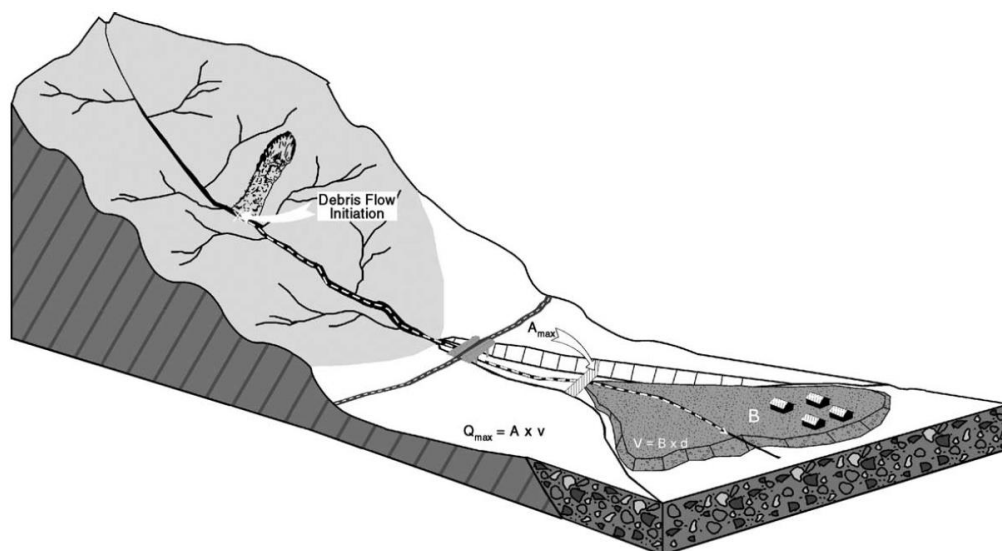
Leikkauslujuus kuvaa materiaalin kykyä vastustaa liikettä ja se riippuu materiaalin rakeiden välisestä kitkasta (Gregory 2010: 77). Aineksen vesipitoisuudella on merkittävä vaikutus

materiaalin leikkauslujuuteen (Jaboyedoff ym. 2004). Rakeiden välinen kitka pienenee, jos vesi täyttää materiaalin huokostilavuutta, mikä mahdollistaa rakeiden liukumisen toistensa ohi (Press & Siever 1986: 127). Kun rinteeseen kuormitus ylittää leikkauslujuuden, voi syntyä erilaisia massaliikuntoja (Gregory 2010: 79). Chorleyn (1984: 247) mukaan leikkauslujuus voi ylittyä ulkoisten tekijöiden johdosta tai rinnemateriaalin sisäisten prosessien johdosta. Chorley ym. (1984: 247) esittelee seuraavan kaavan, jolla voidaan mallintaa massaliikunnon syntyä:

$$F_s = \frac{\text{materiaalin leikkauslujuus}}{\text{materiaaliin kohdistuva jännitys}}$$
, missä F_s kuvaa varmuuskerrointa. Kun suhdeluku $F_s < 1.0$, rinne murtuu ja voi syntyä massaliikunto.

2.3 Debrisvirtaukset

Debrisvirtauksen materiaali koostuu pääosin konsolidoitumattomasta eli tiivistymättömästä sedimenttiaineksesta, josta noin puolet on hiekkaa karkeampaa (Skinner & Porter 1987: 229). Debrisvirtauksen materiaali on suhteellisen kuivaa (Uusinoka 1981: 80). Virtauksen materiaalin mukana voi kulkeutua esimerkiksi isoja lohkarkeitä (Monroe & Wicander 2001: 317). Debrisvirtauksessa materiaali voi liikkua nopeimmillaan jopa 100 km/h, mutta hitaimmissa virtauksissa nopeus voi olla vain metrin luokkaa vuodessa (Skinner & Porter 2000: 233). Chiarlen ym. (2007) tutkimuksessa Alpeilla debrisvirtausten kuljetusmatka oli yhdestä kuuteen kilometriä ja kesto 1–3 tuntia. Debriskeila on debrisvirtauksen kautta syntynyt muodostuma, joita esiintyy muun muassa Alpeilla (Stoffel & Huggel 2012). Kuvassa 1 näkyy selkeästi debrisvirtauksesta rinteeseen alapuolelle syntynyt keilamainen muoto.



Kuva 1. Debrisvirtauksesta syntynyt keila (Jakob 2005).

Chiarlen ym. (2007) mukaan sekä pitkittyneet sadejaksot että rankkasateet voivat aiheuttaa debrisvirtauksia vuoren rinteillä. Suurimpia debrisvirtauksia syntyy yleensä pitkittyneiden sateiden seurauksena, sillä sadejaksot mahdollistavat laajojen sedimenttien kyllästymisten vedellä (Chiarle ym. 2007). Usein debrisvirtaus kyllästyy lumen sulamisvesillä ja leviää edetessään viuhkamaiseen muotoon (French 1996: 165).

Debrisvirtaukset ovat Tirantin ym. (2018) mukaan suuren materiaalin määrän sekä pitkän keston vuoksi alppiympäristöjen vaarallisimpia luonnon prosesseja. Debrisvirtaukset ajoittuvat Stoffelin ym. (2014) mukaan Alpeilla tyypillisesti loppukevääseen, kesään sekä alkusyksyyn. Chiarlen ym. (2007) tutkimuksessa Alpeilla useimmat debrisvirtaukset ajoittuivat heinä-, elo- ja syyskuulle, joka on Alppien runsassateisinta aikaa.

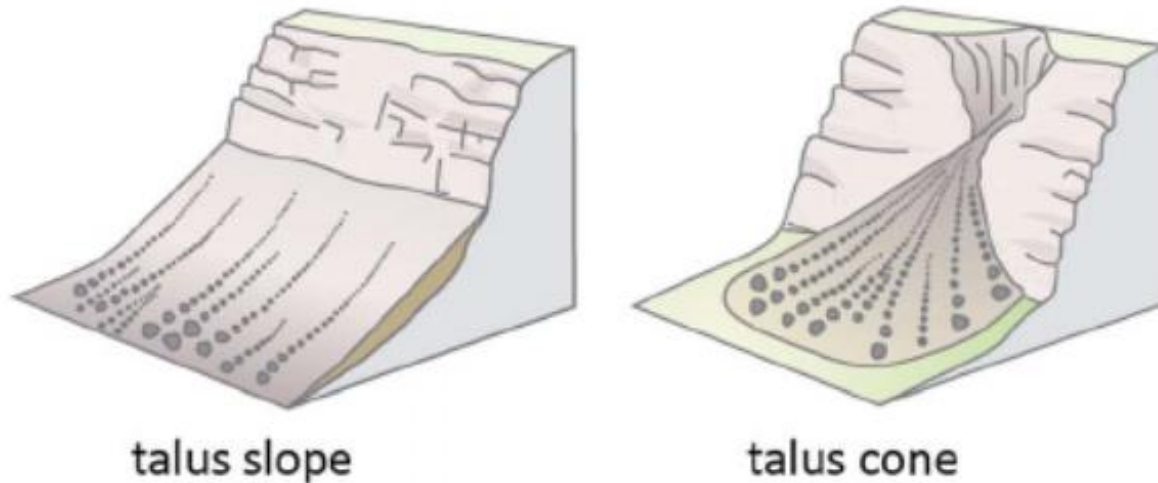
2.4 Kivivyöryt

Kivivyöryssä kallioperästä vasta irronnut materiaali vyöryy nopeasti kaltevaa pintaa alaspäin (Skinner & Porter 1987: 227). Kivivyöry alkaa kivimateriaalin irtoamisella kallioperästä (Dorren 2003). Jäätymis- ja sulamisprosessit sekä harva kasvillisuus tarjoavat otolliset olosuhteet kivivyöryn syntymiselle (Price 1986: 196). Dorren (2003) esittää, että rapautuminen ja rakoilu edistävät kivivyöryn syntymistä. Kivivyöryn laukaisijana voi Pricen (1986: 196) mukaan toimia esimerkiksi sulava lumi, vuorokauden sisäiset lämpötilavaihtelut ja eläimen tai ihmisen aiheuttama häiriö. Dorrenin (2003) mukaan kivimateriaalin liike rinnettä alas riippuu rinteiden kaltevuudesta: kohtisuorilla rinteillä kivi putoaa vapaasti, 70–90°:n rinteillä liikkuu pomppien ja alle 45°:n rinteillä pyörien. Myös kiven muoto vaikuttaa sen liikkeeseen, sillä esimerkiksi vapaasti putoavat kivet harvoin ovat pyöreitä (Dorren 2003).

French (1996: 165) esittää kirjassaan, että kivivyöryjä esiintyy usein keväisin ja syksyisin lämpötilan heitellessä nollan lähetyvillä. Mont Blancin alueella tehdyn tutkimuksen mukaan kivivyöryjä esiintyy etenkin kesäisin, mutta myös muina vuoden aikoina, kuten syksyllä, jolloin ensilunta seuraava lämpötilan nousu voi johtaa sulamisvesien syntyyn ja massaliikuntoon (Allen & Huggel 2013). Kivivyöryistä johtuvia vahinkoja voidaan estää suoja-aitojen avulla, jotka estävät kivien vyörymisen esimerkiksi teille (Price 1986: 197)

Talus on kivivyöryistä kasaantumalla syntynyt muodostuma, joka voi kasaantua esimerkiksi jyrkälle rinteelle (Price 1986: 203). Chorleyn ym. (1984: 239) mukaan talusmuodostuma voi syntyä, mikäli aiemmin kasautunutta kivimateriaalia ei poisteta paikaltaan. Pricen (1986: 203) mukaan talus voi syntyä myös hitaasti, jos rapautuminen tuottaa jatkuvasti irtonaista materiaalia rinteelle. Talusrinne on vyöryneiden kivien peittämä rinne, joka

syntyy jyrkän kalliorinteen alaosaan (Dorren 2003). Kuvassa 2 nähdään rinne, johon on muodostunut talusrinne sekä keilamainen talusmuodostuma.



Kuva 2. Kivivyöryistä syntyneet talusrinne ja keilamainen talusmuodostuma (Hoffmann ym. 2013).

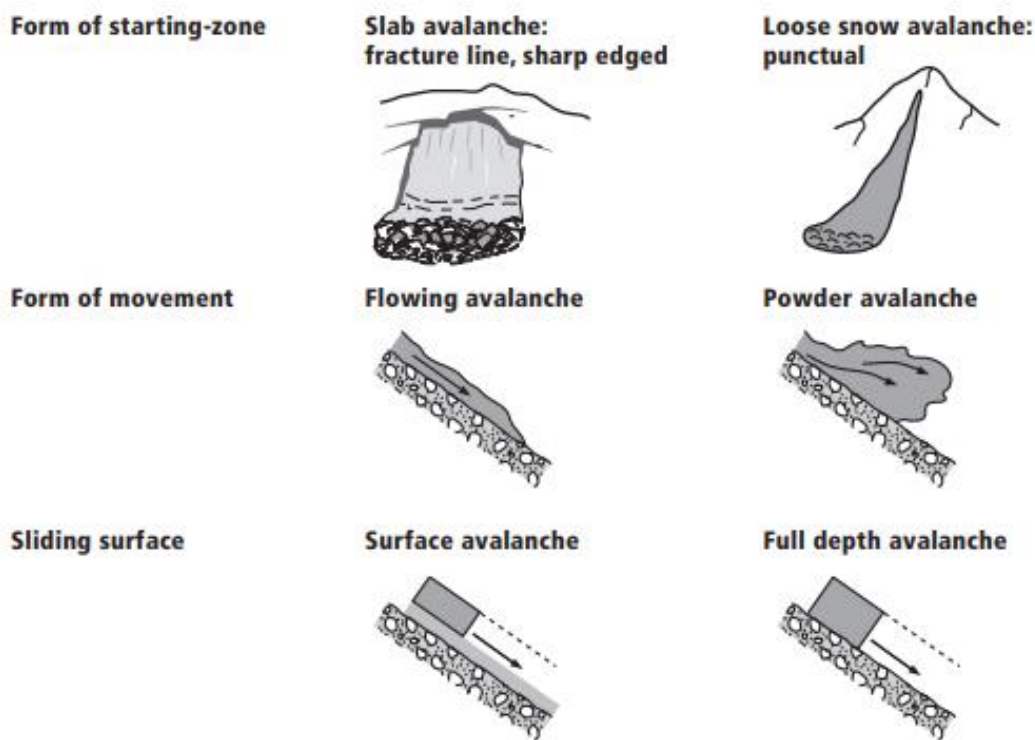
2.5 Lumivyöryt

Lumivyöry eli laviini tarkoittaa äkillistä, nopeasti tapahtuvaa lumen vyörymistä ja lumivyöry voi sisältää lumen lisäksi jäätä ja maa- tai kivikappaleita (Gregory 2010: 180). Frenchin (1996: 162) mukaan lumivyöryjä esiintyy etenkin korkealla vuoristossa, jossa lumisateet ovat runsaita. Lumivyöryjen esiintymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi topografia, lumen rakenne sekä viimeaikaiset lumisateet (Castebrunet ym. 2012). Tärkeitä lumivyöryjen syntyä edesauttavia tekijöitä ovat uuden lumen tuottama kuormitus sekä lumikiteiden koheesioon vaikuttavat lämpötilan muutokset (Price 1986: 159). Gregoryn (2010: 180) mukaan etenkin tuoreen lumen päälle satava vesi altistaa rinteiden lumivyöryille. Myös esimerkiksi rinnettä pitkin kulkeva laskettelija voi käynnistää lumivyöryn (Gregory 2010: 180).

Pricen (1986: 159) mukaan lumivyöryjen syntyminen edellyttää tietynlaista rinteiden jyrkkyyttä, sillä lumi ei pysty kasautumaan liian jyrkille rinteille, kun taas liian loivilla rinteillä ei synny tarpeeksi kuormitusta. Price (1986: 159) pitää lumivyöryjen synnyn kannalta optimaalisena rinteiden jyrkkyytenä $30\text{--}45^\circ$. Rinteiden jyrkkyyden lisäksi alustan materiaalilla on merkitystä, sillä sileällä alustalla lumivyöry etenee helpommin verrattuna esimerkiksi lohkaruikkoon (Price 1986: 161).

Price (1986: 157) jakaa lumivyöryt kahteen tyyppiin, jotka ovat loose-snow-lumivyöryt sekä harvemmin esiintyvät slab-lumivyöryt. Loose-snow-lumivyöryt ovat yleensä

pieniä ja lumi vyöryy muodottomasti, kuten esimerkiksi puuterilumena (Price 1986: 157). Slab-lumivyöryissä tiukemmin pakkautunut materiaali vyöryy alas rinnettä laattamaisesti (Price 1986: 157). Hübl (2002) esittää, että slab-vyöryssä materiaali liikkuu virtaamalla, mutta loose-snow-lumivyöryssä materiaali liikkuu puuterimaisesti (kuva 1). Kuvasta 1 voidaan nähdä lumivyörytyyppien ero vyöryjen syvyysulottuvuudessa: slab-lumivyöryissä vyöry tapahtuu lumen pinnassa, kun taas loose-snow-lumivyöryn ominaisuuksiin kuuluu lumen vyöryminen koko lumipeitteen syvyydeltä (Hübl ym. (2002). Hübl erottaa nämä kaksi lumivyörytyyppiä toisistaan myös lumivyöryn alkamiskohdan kautta: loose-snow-vyöryssä alkamiskohta on yksi selkeä piste ja slab-vyöry taas alkaa selkeään viivamaisesta murtumispisteestä (kuva 1). Lisäksi French (1996: 164–165) esittelee slush-lumivyöryn, joka koostuu hyvin märästä ja raskaasta lumesta, vedestä, jäälohkareista sekä erodoituneesta maa- ja kallioperästä. Slush-lumivyöryjä sattuu etenkin keväisin lumen sulaessa poikkeuksellisen nopeasti (French 1996: 165).



Kuva 3. Slab- ja loose snow-lumivyöryjen synty ja eteneminen (Hübl ym. 2002).

Koska lumivyöryt sisältävät lumen lisäksi myös muuta materiaalia, on niiden merkitys debriskuljetuksessa suuri (Gregory 2010: 180). Lumivyöryjä voidaan kontrolloida esimerkiksi rakentamalla valleja tai aiheuttamalla vyöryjä tahallisesti räjähteiden avulla, milloin lumivyöryyn voidaan varautua ja se voidaan laukaista etänä (Price 1986: 163–164). Myös

lumen maksimisyvyyksillä on vaikutusta lumivyöryihin, joten maksimisyvyksiä mallintamalla voidaan ennustaa lumivyöryjä (Nicolet ym. 2018).

3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset Alpeilla

3.1 Alppien esittely

Alpit ovat Länsi-Euroopassa, Italian, Ranskan, Sveitsin, Itävallan, Saksan, Liechtensteinin ja Slovenian alueelle ulottuva vuoristo, jonka pinta-ala on jopa 200 000 km² (Chiarle ym. 2021). Alppien keskimääräinen korkeus on noin 2500 metriä merenpinnan yläpuolella ja korkeimmat huiput yltyvät 4400–4800 metrin korkeuteen (Chiarle ym. 2021).

Haerbelin ja Benistonin (1998) mukaan Alpit ovat maailman tiheimmin asuttu vuoristo. Cannonen ym. (2007) mukaan ilmastonmuutoksen ja maankäytön vaikutuksia on vaikea erottaa Alpeilla ja yksi syy tähän on pitkään esiintynyt ihmistoiminta alueella. Vuoriston laajat topografiavaihtelut vaikeuttavat ilmastollista mallinnusta ja tulevaisuuden lämpö- ja sääolosuhteet ovat vaikeasti ennustettavissa (Stoffel ym. 2014). Luonnollisten prosessien erottaminen ihmistoiminnan vaikutuksista alueella on haastavaa, sillä Alppien vuoristo toimii asuinpaikkana noin 15 miljoonalle ihmiselle (Chiarle ym. 2021).

3.2 Vaikutusten ulottuvuus

Chiarlen ym. (2021) mukaan ilmastolla on vaikutus massaliikuntojen esiintymistiheyteen, sijaintiin, kokoon sekä massaliikunnan tyyppiin. Chiarle ym. (2021) jakaa ilmaston vaikutukset massaliikuntoihin suoriin, kuten sateen ja lämpötilan muutosten aiheuttamiin vaikutuksiin, ja epäsuoriin, jotka ovat seurausta esimerkiksi kasvillisuuden ja maankäytön muutoksista. Gariano ja Guzzetti (2016) puolestaan jakavat artikkelissaan ilmastonmuutoksen vaikutukset massaliikuntoihin kolmella eri tavalla: paikalliset ja alueelliset, lyhyt- ja pitkäaikaiset sekä suorat ja epäsuorat vaikutukset.

Pattonin ym. (2020) mukaan muutos massaliikuntojen esiintyvyydessä ulottuu laajalle, ja myös alueet, joissa esiintyvyys on matalaa, tulevat tulevaisuudessa kohtaamaan nykyistä enemmän massaliikuntoja. Stoffel ym. (2014) arvelee, että Alppien massaliikunnoissa tapahtuvat muutokset tulevat riippumaan kohdealueen korkeudesta. Harrisin ym. (2009) mukaan tutkimukset osoittavat, että Alpeilla tapahtuvat debrisvirtaukset alkavat yhä ylempää vuoristosta ilmastonmuutoksen edetessä, joten massaliikunnot voivat myös ulottua eri

korkeuksiin kuin aiemmin. Savi ym. (2021) toteaa Italian Alpeille, Gomagoin kylän läheisyyteen kohdistuneessa tutkimuksessaan, että 1945–2019 tapahtuneissa liikunnoissa alkamiskohtien siirtyminen korkeammalle vuoristoon on jo huomattu. Stoffel ja Huggel (2012) pohtivat artikkelissaan sarjassa tapahtuvien prosessien lisääntymistä vuoristoympäristöissä, joka voi johtaa vaikeasti ennustettavien, ketjussa sattuvien massaliikuntojen lisääntymiseen.

3.3 Lämpötila

Zimmermann ym. (2013) ennustaa Alppien lämpötilan nousevan keskimäärin 1,8–4,0 °C vuosien 2051–2080 aikana. Lämpötilan nousun vaikutukset ulottuvat pitkälle, sillä lämpötilan noustessa lumi sulaa, mikä vähentää auringon säteiden heijastumista ja kasvattaa lämpötilaa entisestään (Rangwala & Miller 2012). Ribolinin (2019) mukaan lämpötilojen kasvu riippuu alueen korkeudesta. Lämpötilojen kohoaminen on huomattu esimerkiksi Schönerin ym. (2012) tutkimuksessa Itävallassa, jossa Hoher Sonnblickin vuoren lämpötila on kohonnut vuodesta 1886 alkaen jopa 2 °C. Haberkornin ym. (2021) tutkimuksessa Sveitsin Alpeilla keskilämpötila oli kohonnut tarkastelujakson 1997–2019 aikana jokaisella havaintopisteellä. Rottlerin ym. (2019) tutkimuksessa Sveitsin Alpeilla vuoden keskilämpötila oli noussut 0,25–0,35 °C vuosina 1981–2017. Lämpenemisen ennustetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa ja Stoffel ym. (2013) ennustaa Sveitsin Alpeilla sijaitsevan tutkimusalueen lämpötilan olevan vuosina 2050–2100 huomattavasti korkeampi kuin vertailujakson 2000–2050 aikana.

Rangwalan ja Millerin (2012) mukaan vuoristoympäristöt voivat kokea lämpötilan nousun globaalia keskiarvoa korkeampana. Acquaotta ym. (2015) tutkimuksessa Italian Alppien luoteisosassa lämpötilan nousu on huomattu etenkin korkealla vuoristossa. Zimmermann ym. (2013) toteaa Alppien vuoriston lämpötilan nousevan todennäköisesti enemmän kuin vuoristoa ympäröivien alueiden. Samansuuntaisia tuloksia on esittänyt esimerkiksi Ribolini (2019), jonka mukaan korkeissa vuoristoympäristöissä lämpötilamuutokset tulevat olemaan voimakkaampia. Italian Alppien luoteisosassa tehdyssä tutkimuksessa lämpötilat kohosivat 1961–2010 etenkin yli 1600 metrin korkeudessa (Acquaotta ym. 2015). Myös eriäviä tuloksia on kuitenkin löydetty esimerkiksi Sveitsin Alpeilta, jossa Rottler ym. (2019) toteaa alempien alueiden lämmenneen 1981–2017 korkeita vuoristoalueita voimakkaammin.

Viimeisen 50 vuoden aikana maksimilämpötilat ja poikkeuksellisen lämpimät päivät ovat yleistyneet Alpeilla (Allen & Huggel 2013). Ääriämpötilat tulevat kasvamaan korkealla vuoristoissa (Stoffel ym. 2014). Savi ym. (2021) kertoo vuosina 2000–2009 esiintyneiden

poikkeuksellisten lämpimien päivien määrän yli kaksinkertaistuneen edelliseen vuosikymmeneen verrattuna Italian Alppien vuoristossa sijainneella mittauspisteellä. Allen ja Huggel (2013) kertovat poikkeuksellisten lämpimien päivien määrän olleen Sveitsin Alpeilla Mont Blancin alueella viimeisen vuosikymmenen aikana suurempi kuin yhtenäkkään aiempaan vuosikymmeneenä vuodesta 1960 alkaen. Acquotta ym. (2015) tutkimuksessa minimilämpötilan nousu oli maksimilämpötilan nousua yleisempää. Acquotta ym. (2015) toteaa tutkimuksessaan Italian Alppien luoteisosissa maksimilämpötilojen nousun riippuvan korkeudesta: alle 1600 ja yli 2000 metrin korkeudessa nousu tapahtui keväällä, mutta 1600–2000 metrin korkeudessa maksimilämpötilat kohosivat eniten talvella.

Ääriämpötilojen yleistyminen on huomattu kaikkina vuodenaikoina esimerkiksi Savin ym. (2021) Italian Alpeille sijoittuneessa tutkimuksessa, mutta Savi ym. (2021) kertoo kuitenkin ääriämpötilojen jakautuneen tutkimusalueella niin, että kaikkien vuodenaikojen poikkeuksellisen lämpimät päivät eivät ajoittuneet samalle vuodelle. Savin ym. (2021) tutkimuksessa lämpimien talvien todetaan yleistyneen Italian Alpeilla 1980-luvun lopulta alkaen. Rottlerin ym. (2019) tutkimuksessa Sveitsin Alpeilla talven lämpötiloissa ei havaittu selvää muutosta korkealla vuoristossa viime vuosikymmenten aikana, mutta alemmilla korkeuksilla talvet osoittautuivat lämmenneen. Rangwalan ja Millerin (2012) tutkimuksen mukaan Sveitsin Alpeilla lämpeneminen on ollut suurta syksyä lukuun ottamatta. Rottlerin ym. (2019) tutkimuksessa Sveitsin Alpeilla 1981–2017 lämpeneminen oli voimakkainta keväisin ja alkukesästä. Zimmermann ym. (2013) taas ennustaa lämpötilojen nousevan eniten kesäkuukausina ja vähiten talvella.

3.4 Sateet ja lumipeite

Ilmaston lämmitessä ilmakehän kosteus kasvaa, mikä johtaa sateiden lisääntymiseen (Brönnimann ym. 2018). Ilmaston lämmitessä yhä useammat sateet tulevat vetenä lumen sijasta (Terzago ym. 2012). IPCC:n ilmastoraportin mukaan rankkasateet tulevat lisääntymään ilmastonmuutoksen edetessä (IPCC 2021). Myös Brönnimann ym. (2018) odottaa sateiden esiintyvän voimakkaampina tulevaisuudessa (Brönnimann ym. 2018). Brönnimannin ym. (2018) tutkimuksen mukaan Sveitsissä, Aare-joen ympäristössä olevan tutkimusalueen rankkasateista suurin osa ajoittuu kesään, mutta ilmastonmuutoksen edetessä rankkoja sateita voisi esiintyä myös keväisin ja syksyisin.

IPCC:n ilmastoraportin mukaan Alppien kesäajan sademäärien ennustetaan pienenevän tulevaisuudessa (IPCC 2021). Myös Brönnimannin ym. (2018) mukaan kesät

tulevat olemaan kuivempia ilmastonmuutoksen edetessä. Gianinetto ym. (2020) ennustaa sademäärien kasvavan talviaikaan, mutta vähenevän kesäisin. Fuhrerin ym. (2006) mukaan talvisateiden voimistuminen on huomattu aikavälillä 1900–2000 Pohjois- ja Keski-Euroopassa. Italian Alpeille sijoittuneessa tutkimuksessa sademäärät olivat Savin ym. (2021) mukaan kasvaneet vuodesta 1987 alkaen kaikkina vuodenaikoina kesää lukuun ottamatta. Eriäviä tuloksia on löydetty esimerkiksi Terzagon ym. (2012) tutkimuksessa Italian Alpeilla, missä talven sademäärien todetaan laskeneen. Gianinetto ym. (2020) huomauttaa, että vaikkei sateiden kokonaismäärä muuttuisi, vaikuttavat sateiden muutokset silti merkittävästi ympäristöön, koska sateet voivat tulla vetenä lumen sijaan.

Lumipeitteen keston pienenemisen syitä ovat lumisateiden väheneminen, lämpötilojen nousu (Valt ym. 2009) sekä lumen sulaminen aiemmin keväällä (Liberati ym. 2019). Terzagon ym. (2010) tutkimuksessa lumisateiden todetaan vähentyneen Piedmonten alueella Italiassa merkittävästi vuosina 1971–2009 ja vastaavasti lumipeitteen kesto on ollut alueella lyhyempi vuosina 2000–2009 aikajaksoon 1971–2000 verrattuna. Cannone ym. (2007) on tehnyt vastaavia havaintoja Italian Alpeilta, jossa sekä lumen syvyyden, että lumipeitteen keston todetaan pienentyneen vuodesta 1978 alkaen. Alppien eteläosissa tehdyn tutkimuksen mukaan lumipeitteen kesto on pienentynyt 12 % eli 14 päivää, kun aikajaksoja 1961–1990 sekä 1991–2007 verrataan (Valt ym. 2009).

Stoffel ym. (2014) pitää todennäköisenä, että alle 1500–2000 metrin korkeuksissa lumipeitteen kesto tulee pienenemään radikaalisti ilmaston lämpenemisen johdosta. Alppien eteläosissa lumipeitteen keston todetaan pienentyneen voimakkaammin alle 1600 metrin korkeudessa (Valt ym. 2009). Myös IPCC:n ilmastoraportin mukaan 1500–2000 metrin korkeus on kriittinen raja, jonka alapuolella lumipeite tulee pienenemään merkittävästi 2000-luvulla (IPCC 2021). Lumen sulaminen vaikuttaa myös alustan lämpötilaan, sillä se altistuu ilmakehän lämmölle pidemmän aikaa (Luetschg ym. 2008).

Lumipeitteen pieneneminen on huomattu myös Valtin ym. (2009) tutkimuksessa Alppien eteläosissa, joissa lumipeitteen havaitaan pienentyneen vuodesta 1985 alkaen. Lisäksi lumen syvyydessä on tapahtunut muutoksia ja esimerkiksi Ranskan Alpeilla lumen maksimisyvyyksien pieneneminen on jo huomattu (Nicolet ym. 2018). Myös Terzagon ym. (2012) tutkimuksessa Italian Alpeilla lumen syvyyden havaittiin laskeneen merkittävästi vuosina 1951–2010. Muutosta on tapahtunut lisäksi lumisateiden ajoittumisessa esimerkiksi Piedmonten alueella Italiassa, jossa lumisateiden osalta runsain kuukausi on aikaistunut: vuosina

1971–2000 eniten lunta satoi tammikuussa, mutta 2000–2009 vastaava kuukausi oli joulukuu (Terzago ym. 2010).

3.5 Jään vetäytyminen

Gresswellin (1962: 87) mukaan jään sulamisen yhteydessä käytetään usein termiä retreat, joka viittaa jään vetäytymiseen tai perääntymiseen. Termillä kuitenkin tarkoitetaan jään sulamisesta aiheutuvaa jääpeitteen pienenemistä sen sijaan, että jää suoranaisesti liikkuisi taaksepäin (Gresswell 1962: 87).

Alpeilla jäätiköiden sulaminen on huomattu esimerkiksi Italiassa Piazz-Dosdén jäätiköillä (Diolaiuti ym. 2011). Zekollari ym. (2019) toteaa jäätiköiden vetäytyneen myös Sveitsin Alpeilla. Itävallan Alpeilla, Zillertallerin alueella jäätiköiden pinta-ala on pienentynyt vuodesta 1850 jopa 65 % (Pröbstl-Haider ym. 2016). IPCC:n ilmastoraportin mukaan vuoristojäätiköiden sulaminen jatkuu ilmastonmuutoksen myötä (IPCC 2021). Zekollari ym. (2019) ennustaa Sveitsin Alppien jäätiköiden pienenevän noin puoleen aikavälillä 2017–2050 sekä tilavuudeltaan, että pinta-alaltaan. Mikäli ilmasto jatkaa voimakasta lämpenemistään, Alppien vuoriston jäätiköt voivat Zekollarin ym. (2019) mukaan kadota lähes kokonaan vuoteen 2100 mennessä.

Etenkin Alppien pienet jäätiköt kärsivät jään sulamisesta (Diolaiuti ym. 2011). Esimerkiksi Italian Alpeilla, Piazz-Dosdén jäätiköillä alle 0,1 km²:n kokoiset jäätiköt menettivät pinta-alastaan lähes 80 % vuosina 1954–2003, kun taas 0,5–1,0 km²:n laajuisilla vastaava luku oli noin 45 % (Diolaiuti ym. 2011). Sveitsin Alpeilla tehdyn tutkimuksen (Zekollari ym. 2019) mukaan jäätiköiden sulaminen on pienintä ympäristöissä, joiden korkeus ylittää 3600–3700 m. Savi ym. (2021) toteaa jään sulamisella olevan vaikutusta myös kallioperän lämpöolosuhteisiin. Haberkorn ym. (2021) toteaa Sveitsin Alpeille kohdistuvassa tutkimuksessaan maan lämpötilan olleen korkeampi alueilla, missä jäätä on heikosti.

Muuttuvat olosuhteet voivat aiheuttaa myös jäätiköiden määrän kasvua tietyissä paikoissa, mutta tämä on Diolaiutin ym. (2011) mukaan seurausta jo olemassa olleiden jäätiköiden jakautumisesta pienempiin osiin. Diolaiuti ym. (2011) painottaa artikkelissaan sitä, kuinka jäätiköiden pirstaloituminen pienempiin osiin kiihdyttää niiden sulamista entisestään, sillä pienet jäätiköt sulavat laajoja jäätiköitä nopeammin.

3.6 Ikirouta

Maata, joka on pysynyt jäässä vähintään kaksi vuotta yhtäjaksoisesti, kutsutaan ikiroudaksi (Gray 2004: 56). Ikiroutaa esiintyy Alpeilla etenkin korkeilla rinteillä (Chiarle ym. 2021).

Ikirouta on merkittävä tekijä kylmissä ympäristöissä ja se on vaarassa sulaa ilmastonmuutoksen vuoksi (IPCC 2021). Ikiroudan aktiivisella kerroksella tarkoitetaan sitä osaa ikiroutaesiintymästä, joka voi sulaa kausiluonteisesti (Ribonini 2019). Esimerkiksi Hoher Sonnblickin alueella Itävallassa aktiivisen kerroksen todetaan olevan noin metrin paksu (Schöner ym. 2012). Ilman lämpötilojen noustessa ja lumen sulaessa aiemmin keväällä maan lämpötila kasvaa, mikä johtaa aktiivisen kerroksen kasvuun (Luetschg & Haerbeli 2005).

Sekä lumipeitteen laajuudella että syvyydellä on merkittävä rooli ikiroudan levinneisyydessä (Luetschg ym. 2008). Lisäksi lumipeitteen kestolla on vaikutusta ikiroudan esiintymisessä (Ribolini 2019). Sveitsin Alpeille sijoittuneessa tutkimuksessa merkittäväksi lumen syvyyksrajaksi todettiin 0,6–0,8 metriä, jotta lumen eristävä vaikutus on riittävä (Luetschg ym. 2008). Myös alueen korkeus vaikuttaa ikiroutaesiintymiin ja Luetschgin ja Haerbelin (2005) mukaan ikiroutaesiintymien korkeusraja tulee kasvamaan vuoteen 2080 mennessä 170–580 metrillä riippuen ilmaston lämpenemisen kiihtymisestä. Esimerkiksi Sveitsin Alpeilla ikiroutaesiintymiä on yli 2600 metrin korkeudessa (Luetschg & Haerbeli 2005). Schönerin ym. (2012) mukaan Itävallassa, Hoher Sonnblickin alueella ikiroutaa esiintyy yli 2500–2750 metrin korkeudessa riippuen rinteiden suunnasta.

Korkeiden vuoristoympäristöjen ikiroutaesiintymien lämpötilojen nousu on jo huomattu globaalilla tasolla (IPCC 2021). Ikiroudan lämpötilan muutos on havaittu esimerkiksi Italiassa Cime Bianchen alueella, jossa ikiroutaesiintymien todetaan lämmenneen merkittävästi yli 8 metrin syvyydessä vuosina 2009–2013 (Pogliotti ym. 2015). Bodin ym. (2015) on löytänyt vastaavanlaisia tuloksia Ranskan Alpeilla, missä 2009 alkaen kerätty tutkimustieto osoittaa ikiroudan lämpötilan nousseen ilmakehän lämpenemisen sekä lumipeitteen syvyyden vaihteluiden vuoksi. Haberkorn ym. (2021) toteaa, että ikiroudan sulaminen tulee jatkumaan Sveitsin Alpeilla myös tulevaisuudessa.

3.7 Rapautuminen ja kallioperä

Rapautuminen tarkoittaa terveen, kiinteän kiven muuttumista irtonaiseksi kiviainekseksi esimerkiksi lämmön tai kemiallisten reaktioiden johdosta (Uusinoka 1981: 12). Rapautumisella on merkittävä rooli kivisten rinteiden materiaalin muokkaamisessa (Viles 2021). Korkea

keskilämpötila johtaa kosteissa olosuhteissa kasvillisuuden lisääntymiseen, mikä lisää kemiallista rapautumista (Uusinoka 1981: 26). Sulamis- ja jäätymisprosessien keston ja voimakkuuden muutoksilla on merkittävä vaikutus pakkasrapautumiseen (Kellerer-Pirklbauer 2017). Pakkasrapautumisessa kiven raoissa oleva vesi laajenee jäätyessään, mikä johtaa kiviaineksen hajoamiseen (Uusinoka 1981: 13).

Ilmaston lämpeneminen on aiheuttanut pakkasrapautumiselle alttiimpien alueiden siirtymisen korkeammalle vuoristoon (Savi ym. 2021). Itävallassa tehdyn tutkimuksen mukaan lämpenevä ilmasto vaikuttaa lumipeitteen keston ja kallioperän lämpötilaan, joka vähentää osaltaan jäätymisprosesseja ja pienentää aikaikkunaa, jona alusta altistuu pakkasrapautumiselle (Kellerer-Pirklbauer 2017). Myös ikiroudan sulaminen vaikuttaa Haerbelin ja Benistonin (1998) mukaan rapautumisen kehitykseen.

Ilmastonmuutoksella on vaikutus maanpinnan alaisiin lämpötiloihin (Pröbstl-Haider ym. 2016). Esimerkiksi lumipeitteen pieneneminen vaikuttaa merkittävästi kallioperän lämpötilaan (Kellerer-Pirklbauer 2017). Haberkornin ym. (2021) tutkimuksessa maan lämpötilan huomattiin kohonneen heikkolumisina talvina sekä kesän helleaaltojen aikana. Paksu lumipeite hidastaa ilmakehän lämpenemisen vaikutusta maan lämpötilan muutoksiin, joten esimerkiksi jyrkät rinteet, joissa lumipeite on ohut, lämpenevät nopeammin (Luetschg ym. 2008). Pogliottin ym. (2015) tutkimus osoittaa kallioperän lämmenneen Cime Bianchen alueella Italiassa 16–20 metrin syvyydessä.

3.8 Kasvillisuus

Vuoristoympäristöjen ekosysteemit toimivat Lamprechtin ym. (2018) mukaan hyvinä indikaattoreina ilmastonmuutoksen vaikutuksille. Waltherin ym. (2005) mukaan kasvillisuuden muutos on kiihtynyt vuodesta 1985 alkaen Sveitsin Alppien kaakkoisosissa vastaten ilmastonmuutoksen kehitystä. Kasvillisuuteen vaikuttavia ilmastonmuutoksen tekijöitä ovat muun muassa ikiroudan sulaminen (Theurillat & Guisan 2001), lumipeitteen keston pieneneminen (Cannone ym. 2007) sekä kasvukauden pituuteen vaikuttavat ilman keskilämpötilan muutokset (Theurillat & Guisan 2001).

Waltherin ym. (2005) tutkimuksessa Sveitsin Alppien kaakkoisosissa kasvilajien on huomattu siirtyvän ylöspäin vuoristoon. Esimerkiksi Itävallan Alpeille sijoittuneessa tutkimuksessa kasvilajien määrä oli lisääntynyt vuosina 1994–2014, mikä on ollut todennäköisesti seurausta lajien siirtymisestä ylemmäs vuoristoon (Lamprecht ym. 2018).

Cannone ym. (2007) esittää Alpeilla yli 2500 metrin korkeudessa tapahtuneiden kasvillisuuden muutosten liittyneen sademäärän lisääntymiseen sekä ikiroudan sulamiseen.

Lamprechtin ym. (2018) mukaan lämpenevä ilmasto vaikuttaa negatiivisesti kylmiin olosuhteisiin sopeutuneiden kasvien esiintymiseen vuoristoissa. Muutos voidaan huomata esimerkiksi sellaisten kasvilajien kohdalla, jotka eivät siedä kosteita olosuhteita (Theurillat & Guisan 2001). Esimerkiksi putkilokasvien määrän on havaittu laskevan Itävallan Alpeilla (Lamprecht ym. 2018). Theurillatin ja Guisanin (2001) mukaan kilpailu eri kasvilajien välillä tulee lisääntymään ilmaston lämmitessä. Toisaalta lumipeitteen lyhempi kesto mahdollistaa pitemmän kasvukauden ja samalla uudenlaisten kasvilajien esiintymisen (Liberati ym. 2019). Esimerkiksi Walther ym. (2005) osoittaa tutkimuksessaan, että kasvilajien määrä vuoristossa on kasvanut Sveitsin Alpeilla sijaitsevalla tutkimusalueella. Gianinetta ym. (2020) esittää, että ilmastonmuutoksen edetessä harvan kasvillisuuden alueet tulevat vähenemään tutkimusalueella Val Camonicaan laakson läheisyydessä Italiassa.

Metsäpalot voivat vaikuttaa esimerkiksi kasvillisuuden häviämiseen (Sass ym. 2012). Dupiren ym. (2017) mukaan metsäpalojen riski on kasvanut viime vuosikymmenien aikana etenkin Etelä-Alpeilla. Myös Sass ym. (2012) esittää, että tutkimustulokset viittaavat metsäpaloariskin kasvuun Alpeilla. Myös Dupiren ym. (2017) tutkimuksessa metsäpalojen esiintymisriskin kasvu huomattiin kaikkialla Ranskan Alpeilla. Dupire ym. (2017) ennustaa metsäpalojen muuttuvan voimakkaammiksi tulevaisuudessa poikkeuksellisten sääolojen, kuten helleaaltojen ja kuivien kausien lisääntyessä.

3.9 Maankäyttö

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös maankäytön mahdollisuuksiin Alpeilla. Helleaaltojen ja kuivien kesien lisääntyminen voi vaikuttaa Alppien viljelymahdollisuuksiin negatiivisesti (Fuhrer ym. 2006). Fuhrerin ym. (2006) mukaan myös Alppien ruoholaitumet voivat kärsiä ilmastonmuutoksen aiheuttamasta kuivuudesta kesäisin. Sateiden lisääntymisestä johtuva kasvava eroosio vaikuttaa myös viljelyalueiden maaperän eroosioon rinteillä (Fuhrer ym. 2006). Alppien maankäytön muutoksista voivat kärsiä myös metsät ja metsätalous, joihin myrskyt ja helleallot voivat vaikuttaa negatiivisesti (Fuhrer ym. 2006). Sveitsin Alpeilla Grindelwaldissa metsien kokonaispinta-alan on todettu kasvaneen vuosina 1824–2005 osittain ilmastonmuutoksen vuoksi, mutta tietyissä paikoissa metsää on myös hävinnyt (Providoli & Kuhn 2012). Ilmastonmuutoksesta johtuva jään vetäytyminen voi johtaa metsien kasvuun alueilla, joista jääpeite häviää (Providoli & Kuhn 2012).

Yksi selvä ilmastonmuutoksen aiheuttama maankäytön muutos Alpeilla on lasketteluturismin väheneminen. Lämpötilojen nousu ja lumipeitteen harveneminen uhkaavat laskettelumahdollisuuksia Alppien rinteillä (Willibald ym. 2021). Lämpötilan lisäksi sateiden lisääntyminen voi vaikuttaa negatiivisesti lasketteluturismiin (Gilaberte-Búrdalo ym. 2014). Willibald ym. (2021) tuo esille, että laskettelumahdollisuuksien muutos on riippuvaista alueen korkeudesta ja korkeilla rinteillä laskettelumahdollisuudet eivät heikenny yhtä voimakkaasti kuin alempana vuoristossa. Gilaberte-Búrdalo ym. (2014) toteaa, että 2°C:n lämpötilan nousu johtaisi lumiolojen heikentymisen vuoksi siihen, että jopa 37 % Sveitsin Alppien laskettelukeskuksista tulisi käyttökelvottomiksi. Willibald ym. (2021) uskoo, että Sveitsin Alppien alle 1000 metrin korkeudessa sijaitsevien laskettelukeskuksien kauden pituus tulee lyhenemään puoleen 2050 mennessä ja lähenemään nolaa vuoteen 2075 mennessä. Toisaalta ilmastonmuutoksen vaikutuksiin voidaan vastata osittain keinolumen avulla (Gilaberte-Búrdalo ym. 2014). Willibaldin ym. (2021) mukaan alemmilla rinteillä lumetuksen avulla voidaan jopa kolminkertaistaa laskettelukauden pituus.

4 Muutokset massaliikunnoissa Alpeilla ilmaston muuttuessa

4.1 Lämpötila

Bodinin ym. (2015) mukaan geomorfologisten tapahtumien aktiivisuus tulee kasvamaan poikkeuksellisten sääolojen, kuten erityisen lämpimien kesien lisääntyessä. Stoffel ja Huggel (2012) toteavat lämpötilojen muutoksen vaikuttavan sekä massaliikuntojen esiintymistiheyden että niiden suuruuden kasvuun. Savi ym. (2021) esittää etenkin keväille ajoittuvien poikkeuksellisten lämpötilojen olevan merkittävässä roolissa massaliikuntojen syntymisen suhteen, sillä ne voivat aiheuttaa äkillistä lumen sulamista ja ikeroudan aktiivisen kerroksen kasvua.

Legayn ym. (2021) mukaan etenkin pitkät helleaallot mahdollistavat kivivyöryjen syntymisen. Kesällä 2003 Alpeilla tapahtui tavallista suurempi määrä kivivyöryjä, mikä oli seurausta poikkeuksellisen lämpimästä kesästä (Chiarle ym. 2021). Myös Bodin ym. (2015) on tutkinut kesän 2003 lämpöolojen vaikutuksia ja esittää kivivyöryjen määrän kasvaneen kesällä 2003 Mont Blancin alueella. Allenin ja Huggelin (2013) mukaan lämpimät päivät kivivyöryjä edeltäneen viikon aikana ovat lisänneet etenkin pieniä kivivyöryjä Sveitsin Alpeilla. Lämpimien ääriämpötilojen lisäksi myös poikkeuksellisen kylmät päivät voivat vaikuttaa

kivivyöryihin, mistä esimerkkinä toimii vuoden 2007 kivivyöryt Mont Blancilla, joista useita edelsi äärimmäisen kylmät kausittaiset lämpötilat (Allen & Huggel 2013).

Vastaavanlaisia havaintoja on tehty esimerkiksi Fischerin ym. (2013) tutkimuksessa, jossa vuodenajalle epätyypilliset ja erityisen lämpimät päivät Italian Monte Rosassa edelsivät tutkimuksessa tarkasteltuja kivivyöryjä. Myös Legayn ym. (2021) tutkimus Mont Blancin alueella osoittaa, että useita Alppiympäristössä tapahtuvia kivivyöryjä on edeltänyt poikkeuksellisen korkeat lämpötilat. Allen ja Huggel (2013) toteavat tutkimuksessaan poikkeuksellisten lämpimien päivien edeltäneen yli puolta Mont Blancilla tutkituista kivivyöryistä. Mont Blancin alueella ääriämpötilojen vaikutus kivivyöryjen lisääntymiseen on huomattu jopa vain kahden vuoden pituisella tarkastelujaksolla (Allen & Huggel 2013).

Ääriämpötilat ja ilmaston lämpeneminen voivat Stoffelin ym. (2013) mukaan johtaa myös debrisvirtausten esiintymiskauden pidentymiseen. Esimerkiksi Sveitsissä debrisvirtausten ennustetaan suurenevan tulevaisuudessa, mikä voi johtaa suuriin vahinkoihin alueilla, joissa on ihmistoimintaa (Stoffel ym. 2013).

4.2 Lumi ja sateet

Stoffelin ja Huggelin (2012) mukaan sateiden muutokset tulevat vaikuttamaan massaliikuntojen suuruuteen sekä niiden esiintymiseen. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat lämpötilamuutokset vaikuttavat lumisateisiin ja -peitteeseen sekä lumipeitteen päälle satavaan veteen, mikä voi edesauttaa massaliikuntojen lisääntymistä (Gariano & Guzzetti 2016). Lumi- ja vesisateet voivat vaikuttaa massaliikuntoihin sekä lyhyellä, että pitkällä aikavälillä, ja Chiarle ym. (2021) kertoo esimerkiksi debrisvirtausten voivan reagoivan vesisateisiin välittömästi.

Sademäärän lisääntyminen on merkittävä tekijä debrisvirtausten määrän kasvussa vuoristoissa (Chiarle ym. 2021; Tiranti ym. 2018). Harris ym. (2009) kertoo, että Sveitsin Alpeilta saatu tutkimustieto osoittaa kesäajan debrisvirtausten kasvaneen äärimmäisten sadeolojen johdosta. Myös Savi ym. (2021) toteaa Italiassa tehdyssä tutkimuksessaan sateista johtuneiden debrisvirtausten lisääntyneen vuodesta 2010 alkaen. On arvioitu, että ilmastonmuutoksen edetessä lumen nopea sulaminen ja lumen päälle satavan veden määrä lisääntyvät ja tämä kiihdyttää osaltaan massaliikuntojen käynnistymistä sekä tehokkuutta (Gariano & Guzzetti 2016). Stoffel ym. (2013) epäilee debrisvirtausten määrän nousevan Sveitsissä 2000-luvun ensimmäisellä puolikkaalla ja laskevan vuosina 2050–2100, milloin tapahtumien ennustetaan olevan suurempia.

Myrskyt voivat toimia massaliikunnan laukaisijana, sillä lyhyessä ajassa tapahtuvat muutokset rinteiden materiaalissa muuttavat olosuhteita äkillisesti (Gregory 2010: 79). Esimerkkinä tästä on Italian Alpeilla Forno Alpi Graien kylän seudulla 1993 tapahtunut suuri debrisvirtaus, joka oli Chiarlen ym. (2021) mukaan seurausta rankasta myrskystä. Harrisin ym. (2009) mukaan kesäajan poikkeuksellisen rankat sateet tulevat lisäämään debrisvirtausten määrää tulevaisuudessa.

1999 oli erittäin aktiivinen vuosi lumivyöryjen suhteen Alpeilla, ja tämä oli seurausta kylmästä lämpötilasta sekä runsaista lumisateista (Castebrunet ym. 2012). Talvikausi 2008–2009 oli Italian runsaslumisina lähes 80 vuoteen, mikä johti lumivyöryjen lisääntymiseen sekä poikkeuksellisen suurten lumivyöryjen esiintymiseen (Valt ym. 2009). IPCC:n ilmasto- ja ilmastoraportti esittää, että muutokset Alppien lumimäärissä voivat johtaa lumivyöryjen määrän vähenemiseen (IPCC 2021). Myös Castebrunet ym. (2014) toteaa lumisateiden vähenemisen ja lumipeitteen ohentamisen vähentävän lumivyöryjä erityisesti keväisin. Toisaalta etenkin kevään lämpötilojen nousut voivat vaikuttaa positiivisesti märkien lumivyöryjen määrään (Fouinat ym. 2018). Esimerkiksi Castebrunet ym. (2014) esittää mahdollisuuden siitä, että märistä lumiolosuhteista johtuvat lumivyöryt voisivat lisääntyä Ranskan Alpeilla ilmastonmuutoksen edetessä. Fouinat ym. (2018) toteaa etenkin lumen päälle satavan veden vaikuttavan lumivyöryjen lisääntymiseen. Castebrunetin ym. (2014) mukaan muutos on jo huomattavissa Ranskan Alpeilla ja märät lumivyöryt ovat lisääntyneet.

4.3 Jään vetäytyminen

Chiarle ym. (2007) kertoo jäätiköiden reunoilla tapahtuneiden debrisvirtausten lisääntyneen Alpeilla. Stoffelin ja Huggelin (2012) mukaan Alppien suurimpien debrisvirtauksen taustalla on ollut jäätikön vetäytymiseen liittyvä laajojen sedimenttimassojen paljastuminen. Etenkin konsolidoitumattomat eli tiivistymättömät sedimentit ovat alttiita massaliikunnoille jäätikön vetäytyessä (Huggel ym. 2011).

Yksi esimerkki jään sulamisesta aiheutuneesta debrisvirtauksesta on Italiassa 2005 kesällä sattunut virtaus, jossa 15 000 m³ jäätikön alta paljastunutta materiaalia virtasi yli tunnin ajan rinteitä alas (Chiarle ym. 2007). Huggel ym. (2011) kertoo artikkelissaan Sveitsissä 2005 sattuneesta Routlai-Gutannen-debrisvirtauksesta, joka oli suurin Sveitsin Alpeilla tapahtuneista debrisvirtauksista yli kahteen vuosikymmeneen. Virtauksessa oli materiaalia noin 500 000 m³:n edestä ja sen synnyn taustalla oli rankka sadejakso sekä jäätikön vetäytymisen takia paljastuneet sedimenttimassat (Huggel ym. 2011).

Sedimentit, jotka paljastuvat rinteillä jäätikön vetäytyessä, voivat pysyä paikallaan vuosikymmenten ajan ennen niistä syntyvää massaliikuntaa (Huggel ym. 2011), ja tämä on hyvä esimerkki siitä, kuinka ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset vuoristoissa voivat vaikuttaa massaliikuntojen muodostumiseen suurellakin viiveellä. Stoffel ja Huggel (2012) asettavat hypoteesin, jonka mukaan tulevaisuudessa jäätikön edelleen vetäytyessä heikosti tiivistyneitä sedimenttejä paljastuu jatkuvasti enemmän, mikä vaikuttaa debrisvirtausten esiintymiseen. Myös Chiarle ym. (2007) toteaa vetäytyvän jään ja laajojen konsolidoitumattomien sedimenttimassojen toimivan merkittävänä tekijänä debrisvirtausten aktiivisuudessa Alpeilla ilmastonmuutoksen edetessä. Jään sulamisella on vaikutusta myös kallioperän lämpöolosuhteisiin (Savi ym. 2021).

4.4 Ikirouta

IPCC:n ilmastoraportin mukaan ikiroudan sulamisella on yhteys rinteiden stabiiliuteen (IPCC 2021). Myös Ribolinin (2019) mukaan ikiroudan muutokset ovat merkittävä tekijä rinteiden stabiiliudessa. Pattonin ym. (2019) mukaan ikirouta ja sen sulaminen altistavat alueen massaliikunnoille. Ikiroudan sulaminen on merkittävä rinteiden stabiiliuteen vaikuttava ilmiö, sillä vuoristoympäristöjen jyrkillä rinteillä on runsaasti ikiroutaesiintymiä (Stoffel & Huggel 2012). Ribolinin (2019) mukaan ikiroudan sulaminen vaikuttaa massaliikuntojen esiintymistiheyteen, -alueisiin sekä voimakkuuteen. Patton ym. (2019) esittää, että massaliikuntojen määrä ja suuruus tulevat lisääntymään ikirouta-alueilla seuraavien vuosikymmenten aikana. Savi ym. (2021) olettaa ikiroudan sulamisen johtavan esimerkiksi massaliikuntojen materiaalin irtoamiskohtien siirtymiseen ylemmäs vuoristoon.

Pattonin ym. (2020) mukaan ikiroudan sulamisesta johtuva materiaalin koheesio aleneminen mahdollistaa massaliikuntojen synnyn yhä loivemmillä rinteillä. Ikiroudan sulaminen vaikuttaa koheesio lisäksi materiaalin hydrologiaan (Patton ym. 2019). Vesi on merkittävä tekijä massaliikuntojen synnyssä ja Chiarlen ym. (2021) mukaan ikiroudan sulaminen mahdollistaa veden tuoton rinteille, jotka ovat aiemmin olleet jäässä. Pattonin ym. (2020) tutkimuksessa massaliikuntoja esiintyi etenkin alueilla, joissa ikiroutakerroksen paksuus oli 0,8–1,1 metriä. Stoffel ja Huggel (2012) toteavat artikkelissaan ikiroudan aktiivisen kerroksen kasvulla olevan yhteys massaliikuntojen lisääntymiseen. Chiarlen ym. (2021) mukaan ikiroudan sulamisella voi olla vaikutusta esimerkiksi debrisvirtausten esiintymiseen vuoristoissa.

Harris ym. (2009) kertoo ikiroudan lämpenemisen ja sulamisen vaikuttavan kivivyöryjen esiintymisen kasvuun. Yhtä lailla Pröbst-Haider ym. (2016) toteaa ikiroudan sulamisen johtavan kivivyöryjen määrän lisääntymiseen. Saman suuntaisia tuloksia on löydetty Mont Blancin alueella, jossa on Bodinin ym. (2015) mukaan vuosina 1997, 2005 ja 2008 sattunut kolme suurta kivivyöryä, jotka olivat todennäköisesti seurausta ikiroudan sulamisesta. Etenkin kiviseinämät kärsivät Legayn ym. (2021) mukaan kivivyöryjen lisääntymisestä ikiroudan sulamisen seurauksena. Mont Blancin alueella suoritetun tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että ikiroudan sulaminen vaikuttaa yli 6 metrin syvyydestä irtoaviin kivimassoihin, mutta lähempänä maanpintaa irtoavien kivivyöryjen kohdalla ikiroudan sulamisen vaikutus ei olisi yhtä merkittävä (Legay ym. 2021).

4.5 Rapautuminen ja kallioperä

Rapautuminen vaikuttaa negatiivisesti rinteen stabiiliuteen (Jaboyedoff ym. 2004). Materiaalin rapautumisaste voi vaikuttaa leikkausjännitykseen ja näin massaliikunnan syntymiseen (Viles 2012). Rapautuminen tuottaa irtonaista kivimateriaalia, joka lisää rinteen epävakautta (Tiranti ym. 2018). Kivilajilla on merkitystä rapautumisherkkyyteen ja esimerkiksi kvartsi on hyvin kovaa eikä rapaudu helposti, kun taas saviliuske on herkkä rapautumaan (Skinner & Porter 1987: 214–215). Jaboyedoff ym. (2004) osoittaa esimerkiksi kemiallisen rapautumisen vaikuttavan merkittävästi Alppien ympäristön rinneprosesseihin. Kemiallinen rapautuminen käsittää maan pinnalla tapahtuvat kemialliset reaktiot, jotka tapahtuvat kiviaineksen, veden ja ilmakehän välillä (Uusinoka 1981: 14).

Rapautuminen voi vaikuttaa esimerkiksi kivivyöryjen syntymiseen (Viles 2012; Fischer 2013). Uusinokan (1981: 13) mukaan etenkin pakkasrapautumisella on merkitystä kivivyöryjen synnyssä, sillä pakkasrapautuminen tuottaa talven aikana irtainta kiviainesta, joka voi keväisin vyöryä etenkin jyrkkärinteisillä vuorilla. Rapautumisella on yhteys myös rakoiluun, sillä Uusinokan (1981: 1) mukaan rakoillut kallio altistuu herkemmin esimerkiksi pakkasrapautumiselle. Rakoilulla tarkoitetaan kiviaineksen säröjä, joiden suuntaisesti ei ole tapahtunut näkyvää liikettä (Uusinoka 1981:1). Patton ym. (2019) kertoo jäätymis- ja sulamisprosessien altistavan alustan rakoilulle ja heikkousvyöhykkeiden muodostumiselle, mikä voi johtaa massaliikunnan syntyyn. Rakoilu heikentää kivisiä rinteitä ja vaikuttaa näin rinteiden stabiiliuteen (Press & Siever 1986: 127).

Legay ym. (2021) toteaa kallioperän lämpenemisen lisäävän kivivyöryjä sekä jäisissä, että jäättömissä olosuhteissa. Kivimateriaalin reagointi muutoksiin voi tapahtua viiveellä ja

esimerkiksi Legayn ym. (2021) tutkimuksessa maanpinnan lämpötilojen osoitettiin vaikuttavan kivivyöryn syntyyn jopa 2 kuukautta ennen massaliikuntaa.

4.6 Kasvillisuus

Gariano ja Guzzetti (2016) esittävät, että ilman lämpötilan nousu johtaa haihtumisen kasvuun, mikä lisää rinteiden stabiiliutta, sillä maanpinnan alaista vettä on vähemmän. Stoffelin ja Huggelin (2012) mukaan pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksen seuraukset voivat vähentää massaliikuntoja vuoristoympäristöissä: esimerkiksi kasvillisuuden lisääntyminen korkeammalla vuoristossa voisi luoda vakaampia olosuhteita rinteille. Fouinat ym. (2018) toteaa kasvillisuuden vähentävän etenkin märkiä lumivyöryjä rinteillä.

Kasvillisuus vaikuttaa Pressin ja Sieverin (1986: 127) mukaan rinteiden stabiiliuteen myös juurien avulla, sillä ne tukevat maan sisäisiä rakenteita. Monroen ja Wicanderin (2001: 304) mukaan kasvit myös sitovat vettä sen sijaan, että vesi imeytyisi maaperään. Kasvillisuuden poisto joko luonnollisista syistä tai ihmisen toimesta on yksi syy massaliikuntojen aiheutumiselle (Monroe & Wicander 2001: 305).

Sass ym. (2012) toteaa metsäpalojen vaikuttavan kivivyöryjen esiintymiseen Alpeilla. Yksi esimerkki tästä on Melzerin ym. (2019) tutkimus, vuonna 2018 Itävallan Hallstattissa sattunut metsäpalo, joka johti kivivyöryihin alueella. Maan pinnalla olevien kasvien osien lisäksi juurien palaminen voi aiheuttaa rinteeseen epästabiiliutta ja vaikuttaa osaltaan esimerkiksi kivivyöryn syntymiseen (Melzner ym. 2019). Sassin ym. (2012) mukaan metsäpaloista johtuva kasvillisuuden poistuminen rinteiltä voi johtaa debrisvirtausten ja lumivyöryjen aktiivisuuteen. Metsäpalot voivat vaikuttaa myös kivien rapautumisaktiivisuuteen (Melzner ym. 2019) lisäten riskiä massaliikunnoille.

4.7 Maankäyttö

Ihmistoiminnalla on vaikutusta massaliikuntojen esiintymiseen ja voimakkuuteen myös maankäytön kautta (Stoffel & Huggel 2012). Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan maankäyttöön ja maanpeitteeseen, jotka ovat tärkeitä tekijöitä massaliikuntojen esiintymisen suhteen (Gariano & Guzzetti 2016). Chorley ym. (1984: 230) toteaa ihmistoiminnan sijoittuvan kasvavissa määrin massaliikunnoille alttiille alueille ilmaston muuttuessa ja maapallon väestön kasvaessa, mikä voi lisätä massaliikuntoja. Ihmistoiminnan aiheuttamat maanpeitteen muutokset vaikuttavat merkittävästi maaperän eroosioon (Gianinnetto ym. 2020), joka vaikuttaa

osaltaan massaliikuntoihin. Eroosiolla tarkoitetaan maanpinnan kulumista (Skinner & Porter 1987: 14). Chorleyn ym. (1984: 232) mukaan maankäytön muutokset ovat vaikuttaneet sekä massaliikuntojen esiintyvyyteen, että voimakkuuteen.

Maankäytön muutosten merkitys on huomattu esimerkiksi Ranskan Alpeilla Lauvitelin järven alueella, jossa lumivyöryjen todetaan lisääntyneen ihmistoiminnan muokatessa maanpeitettä (Fouinat ym. 2018). Gray (2004: 153) kertoo, että esimerkiksi rinteen kyntäminen voi lisätä eroosiota ja altistaa näin massaliikunnoille. Toinen maankäyttöön liittyvä tekijä on metsien hakkuu, joka voi edistää massaliikuntojen syntymistä (Gregory 2010: 83). Fouinatin ym. (2018) tutkimuksessa metsien hakkuun todetaan lisänneen lumivyöryjä Alppien länsiosissa.

5. Pohdinta

Ilmastonmuutos on yksi ihmiskunnan suurimmista haasteista (Wulff 2021) ja se vaikuttaa sekä luontoon että ihmistoimintaan maapallolla. Kuten Lunkka (2008: 256) toteaa kirjassaan, on mahdotonta ennustaa varmasti ilmastonmuutoksen vaikutuksia, mutta se on varmaa, että ilmasto tulee muuttumaan. Vaikka ilmastonmuutoksen vaikutusten ennustaminen on haastavaa, on ilmastonmuutokseen ja luonnon prosesseihin liittyvä tutkimustyö tärkeää, jotta tulevaisuuden muutoksiin voidaan varautua. Kuten Lunkka (2008: 11) toteaa, ilmasto on vaihdellut aina ja jo miljoonia vuosia ennen ihmistä tapahtuneet muutokset ilmastossa tuovat mielenkiintoiset näkökulman ilmastokeskusteluun. Toisaalta meneillään olevassa ilmastonmuutoksessa on monta aiemmista muutoksista erottavaa tekijää: ihminen on toiminnallaan kiihdyttänyt ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvua ja ihminen on myös todistamassa ja tutkimassa nykyisiä muutoksia. Vaikka nykyinen ilmastonmuutos, johon ihminen toiminnallaan vaikuttaa, on ajallisesti vain murto-osa maapallon historiaa, ovat sen vaikutukset yhtä lailla merkittäviä kuin aiempien ilmastovaihteluiden.

Yksi tärkeä huomio ilmastonmuutoksessa on sen vaikutusten ulottuvuus ympäri maailman: ihmiset vaikuttavat toiminnallaan myös niiden alueiden elottomaan ja elolliseen luontoon, missä ei ole asutusta. Heiskanen (2020: 110) huomauttaa, että ilmastonmuutos ei etene maapallolla tasaisesti, mikä osoittaa hyvin alueiden epätasa-arvoisen aseman. Esimerkiksi asuttamattomat napa-alueet ja vuoristot reagoivat muutokseen herkemmin ja ovat tästä syystä alistuneessa asemassa ihmisen ajamassa ilmastonmuutoksessa. Alpeilla on runsaasti asutusta ja matkailua, millä on oma merkityksensä massaliikuntoihin sen lisäksi, että ihmiset ympäri

maailman vaikuttavat massaliikuntoihin ilmastonmuutoksen kiihdyttämisen avulla. Toisaalta ilman alueen ihmistoimintaa ihmiskunnalla ei olisi yhä paljon tutkimustietoa alueen herkästä luonnosta sekä massaliikuntojen esiintymisestä ja lisääntymisestä.

Kuten Heiskanen (2020: 113) esittää kirjassaan, ilmastonmuutosta ei voida pysäyttää, joten nyt on aika sopeutua muutoksiin ja hillitä tulevaisuudessa tapahtuvia muutoksia. Lunkka (2008: 15) huomauttaa, että ihminen on joutunut sopeutumaan ilmaston muutoksiin jo muinaisessa historiassa. Muutenkin haastavissa olosuhteissa alppiympäristössä sopeutuminen tulee tuottamaan haasteita. Lumen ja jään sulamisen vaikutukset Alpeilla ovat merkittävät, mutta toisaalta Lunkan (2008: 11) mukaan keskiajalla Euroopassa elettiin lämmintä ilmastovaihetta, jolloin talvet olivat täysin lumettomia. Kaikki on siis kiinni sopeutumisesta.

Yksi sopeutumiseen liittyvä tekijä on Alppien maankäyttö. Jatkossa olisi mielenkiintoista tutkia, miten ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan alueen maankäyttöön. Mitä tapahtuu esimerkiksi niille alueille, joilla laskettelu tulee ilmaston lämmetessä mahdottomaksi? Toinen mielenkiintoinen näkökulma on massaliikuntojen muutosten vaikutus maankäyttöön. Tulevaisuudessa näemme, rajoittaako massaliikuntojen lisääntyminen maankäyttöä Alpeilla ja kuinka kauan tällaiset muutokset tulevat vaikuttamaan maankäyttöön. Ihminen voi toiminnallaan lisätä massaliikuntoja sekä ilmastonmuutoksen kautta että paikallisesti esimerkiksi eroosiota lisäämällä. Olisi kiinnostavaa nähdä, voiko tilanne kääntyä tulevaisuudessa päinvastoin siten, että lisääntyvät massaliikunnot rajoittavat ihmisten maankäyttöä.

Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan Alppien herkkään vuoristo-ympäristöön, ja massaliikuntojen muutokset ovat yksi merkittävistä, sekä luontoon, että ihmistoimintaan liittyvistä vaikutuksista. Vaikka ilmastonmuutoksen ennustetaan pääosin lisäävän massaliikuntoja, on hyvä muistaa myös tiettyjen ilmastonmuutoksen vaikutusten päinvastainen merkitys. Tästä esimerkkinä toimii Stoffelin ja Huggelin (2012) esittämä ajatus siitä, että pitkällä aikavälillä lisääntyvä kasvillisuus voi vähentää massaliikuntoja tietyissä vuoristo-ympäristöissä. Tulevaisuudessa myös näemme, miten pitkään massaliikuntojen lisääntyminen jatkuu ilmaston lämpenemisen edetessä.

Massaliikunnot ovat hengenvaarallisia tapahtumia, jotka aiheuttavat runsaasti onnettomuuksia vuoristoalueilla. Esimerkiksi lumivyöryt vahingoittavat vuoristo-ympäristöjen infrastruktuuria sen lisäksi, että ne ovat riski ihmiselle (Castebrunet ym. 2014). Mielenkiintoista on tulevaisuudessa nähdä, miten ihmiset reagoivat massaliikuntojen todennäköiseen lisääntymiseen. Esimerkiksi kivivyöryjä hallitaan jo nyt ihmisen rakentamien aitojen avulla

(Melzner ym. 2019). Näkyykö massaliikuntoihin sopeutuminen siten, että niitä yritetään hallita jatkuvasti enemmän keinotekoisien rakenteiden avulla? Lisäksi on kiinnostavaa nähdä, kehittykö massaliikuntojen ennustamiseen yhä useampia menetelmiä tai lisääntykö esimerkiksi lumivyöryjen tahallinen aiheuttaminen.

Mielestäni ilmastonmuutoksen vaikutuksista puhuttaessa on tärkeää muistaa sekä vaikutusten ulottuvuus globaalilla tasolla että paikalliset, lyhyen ajan muutokset säässä. Sveitsin Alpeilla 2005 sattunut suuri debrisvirtaus, joka oli seurausta jäätikön sulamisesta sekä rankkasateista (Huggel ym. 2011), on hyvä esimerkki siitä, kuinka lyhyen ja pitkän aikavälin muutokset yhdessä voivat johtaa vakaviin massaliikuntoihin. Tämä osoittaa, että sekä paikallisilla vaihteluilla, että globaalilla ilmaston lämpenemisellä on merkittävä rooli massaliikuntojen esiintymisessä. Maapallon ilmaston luonnolliset vaihtelut yhdessä ihmistoiminnan kanssa vaikuttavat ilmastoon, ja on tärkeää muistaa myös paikallisten tekojen globaali vaikutus maapallon ilmastokehityksessä.

Lähteet

- Acquaotta, F., Frantianni, S. & Garzena, D. (2015). Temperature changes in the North-Western Italian Alps from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology* 122(3–4) 619–634. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1316-7>
- Allen, S. & Huggel, C. (2013). Extremely warm temperatures as a potential cause of recent high mountain rockfall. *Global and Planetary Change* 107 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.007>
- Bodin, X., Schoeneich, P., Deline, P., Ravanel, L., Magnin, F., Krysiecki, JM. & Echelard, T. (2015). Mountain permafrost and associated geomorphological processes: recent changes in the French Alps. *Journal of Alpine Research* 103(2). <https://doi.org/10.4000/rga.2885>
- Brönnimann, S., Rajczak, J., Fischer, EM., Raible, CC., Rocher, M. & Schar, C. (2018). Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 18(7) 2047–2056. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2047-2018>
- Cannone, N., Sgorbati, S. & Guglielmin, M. (2007). Unexcepted impacts of climate change on alpine vegetation. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7) 360–364. <https://doi.org/10.1890/060141>
- Castebrunet, H., Eckert, N. & Giraud, G. (2012). Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps. *Climate of the Past* 8(2) 855–875. <https://doi.org/10.5194/cp-8-855-2012>
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y. & Morin, S. (2014). Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. *Cryosphere* 8(5) 1673–1697. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1673-2014>
- Chiarle, M., Iannotti, S., Mortata, G. & Deline, P. (2007). Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change* 56(1–2) 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.003>
- Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G. & Clague, J. (2021). Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change* 202. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103499>
- Chorley, R., Schumm, S. & Sugden, D. (1984). *Geomorphology*. Methuen & Co, London.
- Diolaiuti, GA., Maragno, D., D’Agata, C., Smiraglia, C. & Bocchiola, D. (2011). Glacier retreat and climate change: Documenting the last 50 years of Alpine glacier history from area

- and geometry changes of Dosde Piazzis glaciers (Lombardy Alps, Italy). *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 35(2) 161–182. <https://doi.org/10.1177/0309133311399494>
- Dorren, L. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 27(1) 69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Dupire, S., Curt, T. & Bigot, S. (2017). Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of the Total Environment* 595 801–817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.027>
- Fischer, L., Huggel, C., Kääh, A. & Haeberli, W. (2013). Slope failures and erosion rates on a glacierized high-mountain face under climatic changes. *Earth Surface Process and Landforms* 38(8) 863–846. <https://doi.org/10.1002/esp.3355>
- Fouinat, L., Sabatier, P., David, F., Montet, X., Schoeneich, P., Chaumillon, E., ... & Arnaud, F. (2018). Wet avalanches: long-term evolution in the Western European Alps under climate and human forcing. *Climate of the Past* 14(9) 1299–1313. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1299-2018>
- French, H. (1996). *The periglacial environment*. 2p. Longman, London.
- Fuhrer, J., Beniston, M., Fischlin, A., Frei, C., Goyette, S., Jasper, K. & Pfister, C. (2006). Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland. *Climatic Change* 79(1–) 79–102. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5714-4_5
- Gariano, S. & Guzzetti, F. (2016). Landslides in changing climate. *Earth-Science Reviews* 162 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gianinetto, M., Aiello, M., Vezzoli, R., Polinelli, F.N., Rulli, M.C., Chiarelli, ... & Soncini, A. (2020). Future scenarios of soil erosion in the Alps under climate change and land cover transformations simulated with automatic machine learning. *Climate* 8(2). <https://doi.org/10.3390/cli8020028>
- Gilaberte-Burdalo, M., Lopez-Martin, F., Pino-Otin, MR. & Lopez-Moreno JI. (2014). Impacts of climate change on ski industry. *Environmental Science & Policy* 44 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.07.003>
- Gray, M. (2004). *Geodiversity*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Gregory, K. (2010). *The Earth's land surface*. Sage Publications, Thousand Oaks.
- Gresswell, R. (1962). *The physical geography of glaciers and glaciation*. Hulton, London.

- Harris, C., Arenson, L., Christiansen, H., Etzemüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., ... & Mühlh, D. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92(3–4). 117–171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>
- Haerbeli, W. & Beniston, M. (1998). Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* 27(4) 258–265. DOI: ei löydy.
- Haberkorn, A., Kenner, R., Noetzel, J. & Phillips, M. (2021). Changes in ground temperature and dynamics in mountain permafrost in the Swiss Alps. *Frontiers in the Earth Science* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.626686>
- Heiskanen, M. (2020). *Yhteen hiileen*. Tammi, Helsinki.
- Hoffmann, T., Müller, T., Johnson, E.A. & Martin, Y.E. (2013). Postglacial adjustment of steep, low-order drainage basins, Canadian Rocky Mountains. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 2568–2584. <https://doi.org/10.1002/2013jf002846>
- Huggel, C., Clague, J. & Korup, O. (2011). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms* 37(1) 77–91. <https://doi.org/10.1002/esp.2223>
- Hübl, J., Kienholz, H. & Loipersberger, A. (2002; toim.). *DOMODIS- Documentation of Mountain Disasters: State Discussion in the European Mountain Areas*. Jost Druck AG, Hünibach.
- IPCC (2021; painossa). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (toim.). Cambridge University Press.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Bardou, E. & Girod, F. (2004). The effect of weathering on Alpine rock instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37(2) 95–103.
- Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering Geology* 79(3–4) 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.01.006>
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2017). Potential weathering by freeze-thaw action in alpine rocks in the European Alps during a nine year monitoring period. *Geomorphology* 296 113–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.020>

- Lamprecht, A., Semenchuk, P., Steinbauer, K., Winkler, M. & Pauli, H. (2018). Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps. *New Phytologist* 220(2) 447–459. <https://doi.org/10.1111/nph.15290>
- Legay, A., Magnin, F. & Ravanel, L. (2021). Rock temperature prior to failure: Analysis of 209 rockfall events in the Mont Blanc massif (Western European Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 32(3) 520–536. <https://doi.org/10.1002/ppp.2110>
- Liberati, L., Messerli, S, Matteodo, M. & Vittoz, P. (2019). Contrasting impacts of climate change on the vegetation of windy ridges and snowbeds in the Swiss Alps. *Alpine Botany* 129(2) 95–105. <https://doi.org/10.1007/s00035-019-00223-5>
- Luetschg, M. & Haerbeli, W. (2005). Permafrost evolution in the Swiss Alps in a changing climate and the role of the snow cover. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 59(2) 78–83. <https://doi.org/10.1080/00291950510020583>
- Luetschg M, Lehning, M. & Haerbeli, W. (2008). A sensitivity study of factors influencing warm/thin permafrost in the Swiss Alps. *Journal of Geology* 54(187) 696–704. <https://doi.org/10.3189/002214308786570881>
- Lunkka, J.P. (2008). *Maapallon ilmastohistoria*. Gaudeamus, Helsinki.
- Mainieri, R., Favillier, A., Lopez-Saez, J., Eckert, N., Zgheib, T., Morel, P., ... & Corona, C. (2020). Impacts of land-cover changes on snow avalanche activity in the French Alps. *Anthropocene* 30 1–13.
- Melzner, S., Shtober-Zisu, N., Katz, O. & Wittenberg L. (2019). Brief communication: Post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(12) 2879–2885. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2879-2019>
- Monroe, J. & Wicander, R. (2001). *The changing Earth*. 3p. Brooks/Cole Publishing, Pacific Grove.
- Nicolet, G., Eckert, N., Morin, S. & Blanchet, J. (2018). Assessing climate change impact on the spatial dependence of extreme snow depth maxima in the French Alps. *Water Resources Research* 54(10) 7820–7840. <https://doi.org/10.1029/2018WR022763>
- Patton, A., Rathburn, S., Capps, D., Brown, R. & Singleton, J. (2020). Lithologic, geomorphic and permafrost controls on recent landsliding in the Alaska Range. *Geosphere* 16(6) 1479–1494. <https://doi.org/10.1130/GES02256.1>
- Patton, A., Rathburn, S. & Capps, F. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology* 340 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029>

- Pogliotti, P., Guglielmin, M., Cremonese, E., di Cella, U.M., Filippa, G., Pellet, C. & Hauck, C. (2015). Warming permafrost and active layer variability at Cime Bianche, Western European Alps. *Cryosphere* 9(2) 647–661. <https://doi.org/10.5194/tc-9-647-2015>
- Press, F. & Siever, R. (1986). *Earth*. 4p. W.H. Freeman and Company, New York.
- Price, L. (1986). *Mountains and man*. University of California Press, Berkeley.
- Providoli, T. & Kuhn, J. (2012). Climate and land use effects on forest cover in the Bernese Alps during the 20th century. *Geographica Helvetica* 67(1–2) 15–25. <https://doi.org/10.5194/gh-67-15-2012>
- Pröbstl-Haider, U., Dabrowska, K. & Haider, W. (2016). Risk perception and preferences of mountain tourists in light of glacial retreat and permafrost degradation in the Austrian Alps. *Journal of Outdoor Recreation and tourism* 13 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2016.02.002>
- Rangwala, I. & Miller, JR. (2012). Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic change* 114(3–4) 527–547. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- Ribolini, A. (2019). Permafrost and climate change: The South-Western Alps perspective. *Agrochimica* Special Issue 229–236.
- Rottler, E., Kormann, C., Francke, T. & Bronstert, A. (2019). Elevation-dependent warming in the Swiss Alps 1981–2017: Features, forcings and feedbacks. *International Journal of Climatology* 39(5) 2556–2568. <https://doi.org/10.1002/joc.5970>
- Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stoger, F., Wetzel, KF. & Friedmann A. (2012). Disturbance, geomorphic processes and recovery of wildfire slopes in North Tyrol. *Earth Surface Processes and Landforms* 37(8) 883–894. <https://doi.org/10.1002/esp.3221>
- Savi, S., Comiti, F. & Strecker M. (2021). Pronounced increase in slope stability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*. 46(7) 1328–1347. <https://doi.org/10.1002/esp.5100>
- Schöner, W., Boeckli, L., Hausmann, H., Otto, J-H., Reisenhoffer, S., Riedl, C. & Seren, S. (2012). Spatial patterns of permafrost at Hoher Sonnblick (Austrian Alps) – Extensive field-measurements and modelling approaches. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105(2) 154–168. DOI: ei löydy.
- Skinner, B. & Porter, S. (1987). *Physical geology*. John Wiley & Sons, New York.
- Skinner, B. & Porter, S. (2000). *The dynamic Earth*. 4p. John Wiley & Sons, New York.

- Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M. & Gobiet, A. (2013). Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change* 122(1–2) 141–155. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0993-z>
- Stoffel, M. & Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 36(3) 421–439. <https://doi.org/10.1177/0309133312441010>
- Stoffel, M., Tiranti, D. & Huggel, C. (2014). Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment*. 493 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.102>
- Terzago, S., Cassardo, C., Cremonini, R. & Fratianni, S. (2010). Snow precipitation and snow cover climatic variability for the period 1971–2009 in the Southwestern Italian Alps: The 2008–2009 snow season case study. *Water* 2(4) 773–787. <https://doi.org/10.3390/w2040773>
- Terzago, S., Fratianni, S. & Cremonini, R. (2013). Winter precipitation in Western Italian Alps (1926–2010). *Meteorology and Atmospheric Physics* 119(3–4) 125–136. <https://doi.org/10.1007/s00703-012-0231-7>
- Theurillat, JP. & Guisan, A. (2001). Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic Change* 50(1–2) 77–109.
- Tiranti, D., Crema, S., Cavalli, M. & Deangeli, C. (2018). An integrated study to evaluate debris flow hazard in alpine environment. *Frontiers in Earth Science* 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00060>
- Uusinoka, R. (1981). *Yleinen maaperägeologia: 1.osa Kulutusprosessit*, 2 p. Helsingin Yliopisto, Helsinki.
- Valt, M., Cianfarra, P., Moro, D. & Zasso, R. (2009). Recent snow cover variations and avalanche activities in the Southern Alps. *ISSW 09 Europe: International snow science workshop*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4405.7287>
- Viles, HA. (2013). Linking weathering and rock slope instability: non-linear perspectives. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(1) 62–70. <https://doi.org/10.1002/esp.3294>
- Walther, GR., Beissner, S. & Burga, CA. (2005). Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16(5) 541–548. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02394.x>
- Willibald, F., Kotlarski, S., Ebner, PP., Bavay, M., Marty, C., Trentini, FV., ... & Gret-Regamey, A. (2021). Vulnerability of ski tourism towards internal climate variability and

- climate change in the Swiss Alps. *Science of the Total Environment* 784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147054>
- Wulff, A. (2021). At the frontier of climate change: Red alert from the European Alps, the Arctic and coral reefs. *Ambio* 50(6) 1123–1129. <http://doi.org/10.1002/2016JD025427>
- Zekollari, H., Huss, M. & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere* 13(4) 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>
- Zimmermann, N., Gebetsroither, E., Züger, J., Schmatz, D. & Psomas, A. (2013). Future Climate of the European Alps. Teoksessa Cerbu, G. (toim.) *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks*