



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Maanvyörymäalttiusanalyysi Longyearbyenin kylästä, Huippuvuorilta

Janette Hagren

Maantiede
LuK-tutkielma
Laajuus: 6 op

23.4.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä(t): Janette Hagren

Otsikko: Maanvyörymäalttiusanalyysi Longyearbyenin kylästä, Huippuvuorilta

Ohjaaja(t): Harri Tolvanen

Sivumäärä: 37 sivua

Päivämäärä: 23.4.2025

Ilmastonmuutoksen myötä arktiset alueet kokevat nopeampia ympäristön muutoksia, kuin muu maailma. Kasvavalla keskilämpötilalla sekä kiihtyvällä tahdilla ja skaalalla sulava ikirouta vaikuttavat merkittävästi arktisten alueiden maaperän vakauteen. Tämä tutkimus tarkastelee maanvyörymäalttiutta rankkasadetapahtuman aikaan Longyearbyenin kylässä, Huippuvuorilla 8.7.2024. Tutkimuksen tavoitteena on arvioida alueellista maanvyörymäalttiutta ja tarkastella ilmastonmuutoksen aiheuttamien ilmiöiden, erityisesti ikiroudan sulamisen ja lisääntyvän sademäärän vaikutuksia maanvyörymäalttiuteen.

Tutkimuksessa käytän painotettua päällekkäisanalyysiä (*weighted overlay analysis*), jossa yhdistetään neljä muuttujaa: rinteiden kaltevuus, rinteiden suuntaus, sademäärä ja ikiroudan ylimmän sulaneen kerroksen syvyys. Tulokset osoittavat, että suurin osa kylän rakennuksista ja tiestöstä sijoittuu matalan riskin alueille, mutta laakson eteläosissa ja tietyillä jyrkkien rinteiden alapuolisilla alueilla esiintyy korkeampaa maanvyörymäalttiutta. Ikirouta osoittautui keskeiseksi riskitekijäksi, sillä mitä syvemmäksi kerros sulaa, sitä alttiimpi maaperä on vyöryille. Myös sademäärä on merkittävä tekijä, sillä maaperän vakaus perustuu pitkälti sen vesipitoisuuteen.

Tämä tutkimus ei anna kattavaa kuvaa koko vuoden riskidynamiikasta alueella, mutta se tarjoaa tietoa hetkellisestä riskistä sekä mahdollistaa alueellisen riskiluokituksen hahmottamisen. Tutkimus avaa näkymiä tulevaisuuden riskiskenaarioihin ilmastonmuutoksen näkökulmasta.

Avainsanat: maanvyöry, ikirouta, ilmastonmuutos, arktinen alue, Huippuvuoret, Longyearbyen, paikkatieto, riskianalyysi

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
2	Teoreettinen viitekehys	7
2.1	Maanvyörymät	7
2.1.1	Maanvyörymätyypit	7
2.1.2	Maanvyörymiin vaikuttavat tekijät	7
2.2	Ikirouta	8
2.2.1	Ikiroudan määritelmä	8
2.2.2	Ikirouta maansitojana	9
2.3	Ilmastonmuutos	9
2.3.1	Arktinen amplifikaatio	9
2.3.2	Ilmastonmuutoksen vaikutukset maanvyörymiin	10
2.4	Ennakointi- ja alttiusanalyysimenetelmät	11
2.4.1	Käytetyt menetelmät yleisesti	11
2.4.2	Painotettu päällekkäisanalyysi	11
2.4.3	Maanvyörymäalttiuden analysoinnin haasteet	12
3	Tutkimusalue	13
3.1	Ilmasto ja säteilyolosuhteet	13
3.2	Geologia ja jäätiköt	13
3.3	Maankäyttö ja rakennettu ympäristö	15
4	Aineistot ja menetelmät	16
4.1	Korkeusaineisto	16
4.2	Roudan syvyys	17
4.3	Sademäärä	18
4.4	Maankäyttö ja rakennettu ympäristö	18
4.5	Painotettu päällekkäisyysanalyysi	19
5	Tulokset	20
5.1	Maanvyörymäalttius alueellisesti	20
5.2	Korkeusprofiilit 1-3	22
6	Keskustelu	25

6.1	Maanvyörymäälttiuden merkitys arktisilla alueilla	25
6.2	Maanvyörymäälttius alueellisesti	26
6.3	Roudan ja rankkasateiden vaikutukset maanvyörymäälttiuteen	27
6.4	Epävarmuustekijät	28
6.5	Jatkotutkimuksen tarpeet ja haasteet	29
7	Johtopäätökset	30
	Kiitokset	31
	Kirjallisuus	32

1 Johdanto

Joulukuussa 2016 Longyearbyenissä, Huippuvuorilla, koettiin poikkeuksellinen maanvyöry, jonka taustalla oli epätavallinen yhdistelmä pitkäkestoista sateisuutta ja korkeita lämpötiloja (Wang ym. 2017). Longyearbyenissä rakentaminen on perustunut vakaaseen ikiroutaan ja oletukseen sen pysyvyydestä (Meyer 2023), mutta muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa ja roudan sulaessa käsitys ei ole pysnyt enää entisellään. Joulukuun maanvyörymä ei ollut yksittäinen tapahtuma, vaan osa laajempaa kehityskulkua, jossa ilmastonmuutoksen aiheuttamat ääri-ilmiöt, kuten rankkasateet, ilman lämpeneminen ja ikiroudan sulaminen, kasvattavat maaperän epävakautta erityisesti arktisilla alueilla (Swanson ym. 2021; Patton ym. 2019; IPCC 2018).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat arktisilla alueilla erityisen voimakkaita, ja ne vaikuttavat moninkertaisella nopeudella verrattuna muuhun maailmaan. Tätä ilmiötä kutsutaan Arktiseksi amplifikaatioksi (Rantanen ym. 2022), ja se näkyy erityisesti ikiroudan sulamisena, sademäärien kasvuna sekä hydrologisten ja geoteknisten prosessien muutoksina (French 2018; Dobinski 2011). Ikiroudan sulaminen vaikuttaa maaperän rakenteeseen heikentäen sen kantavuutta ja lisäksi sen vetymistä, mikä yhdessä sade- ja sulamisvesien kanssa voi laukaista maanvyörymiä ilman mitään varsinaista laukaisutapahtumaa (Ciorescu 2023; Ran ym. 2018).

Tämä on pakottanut arvioimaan uudelleen riskienhallinnan käytäntöjä erityisesti Longyearbyenin kaltaisissa yhteisöissä, joissa infrastruktuuri ja maankäyttö ovat riippuvaisia maaperän vakaudesta (Johannessen ym. 2024). Maanvyöryjen ennaltaehkäisy, varoitussjärjestelmien kehittäminen ja alueellisten riskikarttojen laatiminen ovat nousseet keskeisiksi kysymyksiksi arktisessa riskitutkimuksessa (Gariano & Guzzetti 2016). Samalla on tunnistettu tarve kehittää käytännön työkaluja, jotka mahdollistavat maanvyöryherkkyyden arvioinnin myös tilanteissa, joissa havaintodataa on rajoitetusti.

Tässä tutkimuksessa tarkastelen Longyearbyenin kylän maanvyörymäalttiutta käyttäen paikkatietopohjaista painotettua päällekkäisanalyysiä (engl. *weighted overlay analysis*). Menetelmässä yhdistän neljä muuttujaa: rinteiden jyrkkyys, rinteiden suuntaus, sademäärä ja aktiivisen kerroksen syvyys, arvioimaan maanvyöryn todennäköisyyttä alueellisesti 8.7.2024 tapahtuneen rankkasadetapahtuman aikana. Valitut muuttujat perustuvat kirjallisuuteen, jossa ne on osoitettu keskeisiksi tekijöiksi arktisessa kontekstissa (Bui ym. 2016; Arumugam ym. 2023; French 2018). Lisäksi ne olivat saatavilla ja käsiteltävissä rajallisilla resursseilla.

Tutkimuksen tavoitteena on lisätä ymmärrystä siitä, miten maanvyöryriski jakautuu Longyearbyenin alueella ja millaisia vaikutuksia ilmastonmuutoksen ennustetuilla seurauksilla, kuten kasvavalla sademäärällä ja sulavalla ikiroudalla voi olla tulevaisuudessa alueelliseen turvallisuuteen ja maankäytön

suunnitteluun erityisesti rakennusten ja tiestön näkökulmasta. Tarkastelen näitä aiheita seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

1. Millainen maanvyörymäalitus Longyearbyenin kylässä on alueellisesti?
2. Millaisia vaikutuksia ikiroudan sulamisella on maanvyörymäalitiuteen Huippuvuorten alueella?
3. Miten maanvyörymäalitiuden oletetaan muuttuvan tulevan vuosisadan aikana ilmastonmuutoksen seurauksena Huippuvuorten alueella?

2 Teorettinen viitekehys

2.1 Maanvyörymät

2.1.1 Maanvyörymätyypit

Maanvyörymä voidaan yksinkertaisesti määritellä kiven ja/tai maaperän liikkeeksi rinnettä alaspäin (Cruden 1991). Tässä tutkimuksessa käytän Hungr ym. (2014) tekemää päivitettyä versiota D.J. Varnesin vuonna 1978 tekemästä maanvyörymätyyppien luokituksesta, joka sisältää yhteensä 32 maanvyörymätyyppiä. Käytän, kuten laajalti muuallakin alan kirjallisuudessa, termiä "maanvyörymä" kuvaamaan kivien lohkoliukumia (engl. *planar rock slides*), irtoaineksen virtauksia ja vyöryjä (engl. *debris flow* ja *debris avalanche*) sekä kiven putoamista (engl. *rock fall*). Näille maanvyörymätyypeille yhteistä on se, että liikkuva irtoaines pysyy kontaktissa alustan kanssa koko liikkeen ajan ja, että vuodenaikaisuuden aiheuttamat sulamis- ja jäätymisprosessit voivat vaikuttaa niihin (Hungr ym. 2014).

Routaisilla alueilla voi esiintyä myös useita muita maanvyörymätyyppejä, kuten esimerkiksi solifluktiota, joka on roudan ylimmissä sulaneissa kerroksissa tapahtuvaa hyvin hidasta ja matalaa maaperän "ryömintää". Lisäksi voi esiintyä esimerkiksi yhtenäistä maaperän hidasta muodonmuutosta, joka riippuu suoraan ikiroudan jääpitoisuudesta (Hungr ym. 2014). Routamaiden maanvyörymille on myös kehitetty ja käytetty tarkempia luokituksia eri tutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa keskityn ainoastaan yllä mainittuihin nopeisiin massaliikuntoihin.

2.1.2 Maanvyörymiin vaikuttavat tekijät

Maanvyörymäalittiuteen vaikuttavaa useita eri tekijöitä, jotka voidaan jakaa topografisiin, geologisiin, ilmastollisiin ja ihmistoimintaan liittyviin tekijöihin. Rinteen jyrkkyys on toistuvasti osoittautunut tärkeimmäksi yksittäiseksi tekijäksi useissa tutkimuksissa (Irigaray ym. 2007; Costanzo ym. 2012d; Bui ym. 2016). Myös muut topografiset tekijät, kuten rinteen suuntaus, pinnan karheus, korkeuserot ja topografinen kosteusindeksi (TWI) voivat vaikuttaa maanvyörymärisktiin, mutta niiden merkitys vaihtelee maanvyörymätyypin mukaan. Geologisista tekijöistä tärkeitä ovat kallioperätyyppi, sekä geologiset siirrokset ja kontaktit (Costanzo ym. 2011). Lisäksi maaperän paksuus, veden kylläisyys, pohjaveden taso ja läheisyys uomiin vaikuttavat maan vakauteen (Lee & Ho 2009; Irigaray ym. 2007; Ma ym. 2006).

Maaperän kosteuspitoisuuden lisääntyminen on yksi keskeisimmistä maanvyöryjä laukaisevista tekijöistä. Kun maaperä kyllästyy vedestä, huokospaine kasvaa ja leikkauslujuus heikkenee, mikä voi johtaa maanvyörymän syntyyn (Ran ym. 2018). Vettä kertyy maaperään useista lähteistä, esimerkiksi voimakkaat yksittäiset sateet ja pitkäkestoiset sadejaksot kyllästävät maaperää tehokkaasti. Lisäksi maanvyöryjen syntyyn ja uudelleenaktivoitumiseen on yhdistetty epäsäännöllinen sadanta, lumen

sulamisen ja kevätsateet, jolloin maaperä on jo valmiiksi kostea ja sulamisvedet lisäävät maaperän kyllästymistä (Arghiuş ym. 2011). Myös ikiroudan sulaessa maaperä vettyy, mikä voi aiheuttaa maanvyörymän (Ma ym. 2006).

Ihmistoiminta vaikuttaa maanvyöryalittiuteen sekä suoraan että välillisesti. Rakentaminen, metsänraivaus, tienrakennus ja kaivostoiminta voivat häiritä rinteiden vakautta, altistaa maaperän eroosiolle ja nopeuttaa sulamista ikiroudan alueilla. Ilmastonmuutoksen voidaan olettaa lisäävän maanvyörymiä tulevaisuudessa muun muassa lisääntyvien sademäärien sekä ikiroudan sulamisen myötä.

2.2 Ikirouta

2.2.1 Ikiroudan määritelmä

Ikirouta tarkoittaa maaperää, jonka lämpötila pysyy alle 0 °C vähintään kahden vuoden ajan yhtäjaksoisesti (Harris ym. 1988; Dobinski 2011). Ikirouta on yksi kryosfäärin elementti, joka muuttuu dynaamisesti, ja jolla on suuri rooli lämpötilojen tasapainottajatekijänä ilmakehän, vesikehän ja kivikehän välillä (Dobinski 2011). Pohjoisella pallonpuoliskolla ikiroudan arvioitu pinta-ala pohjoisen pallonpuoliskon maa-alasta on 22,79 miljoonaa km² eli noin 23.9 %. Koko maapallon maa-alasta ikirouta kattaa yli 25 % (Dobinski 2011). Huippuvuorten alueella ikiroudan syvyyden arvioidaan olevan noin 100 metriä laaksoalueilla ja jopa 400–500 metriä vuoristoisilla alueilla (Liestøl 1977; Ciorescu 2023).

Ikiroudan tärkeä ominaisuus on sen aktiivinen kerros, joka on kausiluonteisesti jäätyvä ja sulava ylin kerros (Dobinski 2011). Tyypillisesti aktiivinen kerros sulaa joka kesä, minkä myötä se toimii pohjana valtaosalle arktisten alueiden biologisista prosesseista (Hinzman 1991). Aktiivisen kerroksen paksuuteen vaikuttaa monta eri tekijää, ja se vaihtelee kausittain sekä alueittain. Tärkeimpiä vaikuttavia tekijöitä ovat maanpinnan lämpötila, maan ja sen peitteen lämpötilaominaisuudet, maaperän kosteuspitoisuus ja lumipeite (French 2018). Arktisella alueella vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi korkeus merenpinnasta, rinteiden suuntaus, auringon säteily ja muut topografiset olosuhteet. Päiväntasaajan korkeimmilla vuorilla, Andeilla, sekä Afrikan ja Uuden-Guinean alueilla aktiivinen kerros on matalin, sillä alueilla ei juuri ole vuodenaikaisuutta, eivätkä säteilyolosuhteet muutu. Arktisilla ja subarktisella alueella aktiivisen kerroksen paksuus vaihtelee 60 senttimetristä 2 metriin, riippuen aktiivisen kerroksen pintamateriaaleista (Dobinski 2011). Huippuvuorten alueella sen syvyys on tyypillisesti 30 – 200 cm (French 2018).

2.2.2 Ikirouta maansitojana

Arktisten alueiden ikiroutan ominaisuuksia maansitojana, sen lisääntyvän sulamisen vaikutuksia sekä merkitystä maanvyörymien aiheuttajana on tutkittu laajasti. Maaperän hydrologiset ja fysikaaliset prosessit vaikuttavat suoraan rinnemateriaalien leikkauslujuuteen vaihtelemalla huokospainetta, koheesiota ja sisäistä kitkaa, minkä nettovaikutus voi pienentää sekä kallioperän, maaperän että sedimentin leikkauslujuutta (Patton ym. 2019). Ikiroutan sulaminen vuoristoisilla alueilla aiheuttaa todennäköisesti useita uusia maanvyörymiä ja altistaa aiemmin vakaita alueita maanvyörymärisille, sillä sulaminen vaikuttaa suoraan maaperän vesipitoisuuteen ja lujuuteen (Swanson ym. 2021).

Huippuvuorilla suoritetussa mallinnustutkimuksessa havaittiin, että aktiivikerroksen syveneminen ja veden kyllästävä maaperä olivat ratkaisevassa roolissa lokakuun 2016 suuressa maanvyöryssä Longyearbyenin kaupungin alueella. On myös osoitettu, että ikiroutan sulaminen ei vaadi välttämättä rankkasateita laukaistakseen maanvyöryjä, vaan pelkkä lämpeneminen ja sen aiheuttamat muutokset maaperän fysikaalisissa ominaisuuksissa voivat riittää maanvyörymien syntyyn (Ciorescu 2023).

2.3 Ilmastonmuutos

2.3.1 Arktinen amplifikaatio

Maapallon keskilämpötila on noussut noin 1,1 °C esiteollisesta ajasta (1850–1900) nykypäivään ja ilmaston lämpenemisen odotetaan jatkuvan tulevana vuosikymmeninä. IPCC:n (2018) mukaan lämpötilan arvioidaan saavuttavan 1,5 °C keskilämpötilan nousun välillä 2030–2052, mikäli nykyinen kasvihuonekaasujen päästökehitys jatkuu. Vuoteen 2100 mennessä lämpötilan nousu voi olla jopa 2 – 4,4 °C. Lisäksi on erittäin todennäköistä, että sademäärät erityisesti korkeilla leveysasteilla kasvavat, mikä lisää maanvyörymäalttiutta näillä alueilla (IPCC 2018).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset vaihtelevat suuresti alueittain, ja erityisesti arktiset alueet ovat herkkiä muutoksille. Viimeisen neljän vuosikymmenen aikana arktiset alueet ovat lämmenneet lähes neljä kertaa nopeammin kuin muu maailma. Tätä kutsutaan arktiseksi amplifikaatioksi (Rantanen ym. 2022). Ilmiö johtuu useista tekijöistä, kuten merijään ja lumen albedon takaisinkytkennästä, ilmakehän lämpökerrostuneisuudesta (engl. *lapse rate feedback*), Planckin säteilypalautteesta, ilmakehän käänteisistä lämpötilakerroksista (engl. *near-surface inversions*) sekä ilmakehän ja valtameren välisestä lämmönsiirrosta (Davy & Griewankt 2023). Jo 2 °C:n lämpeneminen arktisella alueella vähentää merkittävästi lumen ja merijään määrää, lisää roudan sulamista ja muuttaa alueen ekosysteemejä. Jos lämpötila nousee 4 °C, sulaminen etenee yhä pohjoisemmaksi (Overland ym. 2019).

Huippuvuorten alueella pitkän aikavälin mittaukset osoittavat keskilämpötilan kohoamista sekä sademäärän lisääntymistä koko Huippuvuorten alueella (Førland ym. 2011). Vuotuinen keskilämpötila

on Longyearbyenin lentokentällä on vuosina 1961–1990 ollut $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja vuosina 1981–2010 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vuosien 1989–2011 aikana talvilämpötila nousi noin $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosikymmenessä, ja keskimääräinen vuotuinen lämpötilan nousu on ollut $1.0\text{--}1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosikymmenessä. Sadanta puolestaan kasvaa noin 2–4 % vuosikymmenessä (Førland ym. 2011). Kokonaissademäärän on havaittu lisääntyvän erityisesti Huippuvuorten pohjoisosissa (Pelt ym. 2016).

2.3.2 Ilmastonmuutoksen vaikutukset maanvyörymiin

Korrelatiiviset tutkimukset osoittavat, että ilmastolliset muuttujat ovat maanvyörymien säätelytekijöitä (Borgatti & Soldati 2010; Gariano & Guzzetti 2016). Swanson ym. (2021) tutkimus ikiroudan sulamiseen liittyvistä maanvyörymistä toteaa, että useiden heidän tutkimiensä maanvyörymien laukaisimena olisi saattanut toimia 1970-luvulla $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosittainen keskilämpötilannousu. Myös tutkimus Niortuutin vuoren valtavasta maanvyörystä länsi-Grönlannissa vuonna 1952 on ehdottanut ilmastonmuutoksen olleen yksi merkittävä tekijä roudan sitoman noin 5,9 miljoonan kuutiometrin kiviaineksen irtoamiselle (Svennevig ym. 2023).

On arvioitu, että maanvyöryriski kasvaa jopa 11,9 %, erityisesti alueilla, joilla sekä kokonaissademäärä että sadetapahtumien poikkeuksellinen voimakkuus ja toistuvuus lisääntyvät (Yan ym. 2024). Arktinen amplifikaatio nostaa alueellista vuosittaista keskilämpötilaa nopeammin kuin maapallolla keskimäärin, mikä johtaa yhä laajempaan ikiroudan sulamiseen. Samanaikaisesti ilmaston lämpeneminen lisää sademääriä korkeilla leveysasteilla, mikä kasvattaa maaperän kyllästymistä (Orlowsky & Seneviratne 2012). Ilmakehän kosteuden kasvu ja vesihöyryn voimistunut kulkeutuminen napa-alueille voimistavat tätä kehitystä entisestään (IPCC 2018). Yhdessä nämä muutokset tekevät arktisista alueista entistä alttiimpia maanvyörymien aiheuttamille riskeille.

Havaintojen mukaan myös lumipeitteen kevät sulanta on aikaistunut noin viikolla 1990-luvun alusta 2010-luvulle (Maturilli ym. 2015), mikä pidentää sulaa kautta ja lisää maaperän altistumista mekaanisille ja hydrologisille prosesseille, kuten routakerroksen syvältä sulamiselle ja pintavalunnalle, jotka voivat edesauttaa maanvyöryjen syntymistä. On siis todettu, että ikiroudan sulaessa maanvyörymiä todennäköisesti esiintyy yhä suurempina sekä useammin (Patton ym. 2019; Swanson ym. 2021). Ilmastonmuutoksen tarkkoja vaikutuksia maanvyörymien esiintymistiheyteen, alueelliseen jakautumiseen sekä niiden suuruuteen ei silti vielä ymmärretä riittävän hyvin (Gariano & Guzzetti 2016).

2.4 Ennakointi- ja alttiusanalyysimenetelmät

2.4.1 Käytetyt menetelmät yleisesti

Maanvyörymäalittiutta voidaan mitata ja mallintaa monin eri menetelmin ja analyysein. Esimerkiksi edullisia, maailmanlaajuisesti saatavilla olevia satelliitti- ja ilmakuvia hyödynnetään tehokkaasti paikkatietojärjestelmien avulla maanvyörymien havaitsemiseen, seurantaan ja herkkyyden arviointiin (Khan ym. 2019; Wang & Li 2017). Kappaleessa 2.1.2 kerrottuja maanvyörymäalittiuteen vaikuttavia tekijöitä johdetaan useista eri aineistolähteistä, kuten satelliittikuvista, digitaalisista korkeusmalleista (DEM), ilmakuvista ja maastotyön avulla kerätystä tiedosta (Bahrain ym. 2014; Wang & Li 2017; Chen ym. 2016). Lisäksi analyyseissä voidaan käyttää erilaisia indeksejä, kuten sedimentin kuljetusindeksiä (engl. *Sediment Transport Index, STI*) ja virtausvoimaindeksiä (engl. *Stream Power Index, SPI*). Näitä tekijöitä ja niiden vaikutuksia voidaan arvioida alueellisen jakautumisen ja voimakkuuden kautta, ja niistä voidaan laatia maanvyörymäalttiuskarttoja (Khan ym. 2019).

Paikkatieto-ohjelmistoissa on laajasti hyödynnetty eri analyysejä, kuten esimerkiksi esiintymissuhdeanalyysiä (engl. *Frequency Ratio*) tai analyyttistä hierarkiaprozessia (engl. *Analytic Hierarchy Process Model, AHP*). AHP-menetelmässä maanvyöryyn vaikuttavia tekijöitä verrataan pareittain ja niille annetaan painot niiden suhteellisen tärkeyden mukaan. Menetelmä mahdollistaa johdonmukaisen ja tarkasti perustellun analyysin erityisesti silloin, kun tarkkaa havaintoaineistoa ei ole runsaasti saatavilla (Panchal & Shrivastava, 2022). Esiintymissuhdeanalyysi on kvantitatiivinen menetelmä, joka perustuu aiemmin tapahtuneiden maanvyöryjen ja niiden syytekijöiden tilastolliseen vertailuun. Menetelmässä lasketaan kunkin tekijäluokan esiintymistiheys maanvyöryalueilla suhteessa koko tutkimusalueeseen, ja näin saadaan maanvyörymäalttiuskartta (Khan ym., 2018).

2.4.2 Painotettu päällekkäisanalyysi

Painotettu päällekkäisyysanalyysi (engl. *weighted overlay analysis*) on menetelmä, jossa eri parametreille annetaan tietty painoarvo, perustuen niiden vaikutuksesta tutkittavaan ilmiöön. Vaikuttaville tekijöille määritellään painoarvot siten, että niiden summa on 100%. Analyysissä syötetyistä parametreista syntyy ensin yksittäiset teemakartat, joiden jokainen kerros muodostuu numeerisista arvoista. Analyysi yhdistää nämä teemakartat päällekkäin, hyödyntäen kutakin annettua painoarvoa, ja tuottaa lopputuloksena maanvyörymäalttiuskartan. Menetelmä sopii hyvin käytettäväksi kun tarkkaa havaintodataa maanvyörymistä ei ole saatavilla. Se mahdollistaa asiantuntija-arvioiden ja kirjallisuuteen perustuvat painotukset. Erilaiset tietolähteet eri tekijöistä voidaan yhdistää tuottamaan maanvyörymäalttiuskartta.

Painotettua päällekkäisanalyysiä on käytetty paljon maanvyörymäalttiusanalyysissä maailmanlaajuisesti (Arumugam ym. 2023; Awawdeh ym. 2018; Khatun ym. 2023; Shit ym. 2016).

Painotettua päällekkäisyysanalyysiä on käytetty sekä alueellisen ennakkoinnin parantamiseksi että eri parametrien, kaukokartoitusaineiston ja paikkatietojärjestelmien (GIS) hyödyllisyyden arvioimiseksi maanvyörymäalitusanalyysien laatimisessa (Arumugma ym. 2023). Tutkimuksissa on käytetty pitkältä kappaleessa 2.1.2 mainittuja tekijöitä (Shit ym. 2016; Bashrat ym. 2016; Awawdeh ym. 2018). Todennäköisyysluokittelujen laatimiseen on käytetty asiantuntien lausuntoja ja mielipiteitä (Bashrat ym. 2016).

2.4.3 Maanvyörymäalituksen analysoinnin haasteet

Maanvyöryihin vaikuttavien tekijöiden valinta ja niiden painottaminen mallinnuksessa on haastavaa, sillä mahdollisia muuttujia on paljon, ja niiden merkitys vaihtelee sekä alueellisesti että maanvyörymätyypeittäin. Teoriassa asiantuntevan geomorfologin tekemä tärkeimpien muuttujien manuaalinen valinta on paras lähestymistapa, mutta käytännössä tämä on harvoin mahdollista ilman subjektiivisia valintoja, sillä käytettyjen muuttujien määrä on usein suuri (Costanzo ym. 2011). Eri tutkimuksissa samoilla muuttujilla voi olla erilainen merkitys: esimerkiksi topografinen kosteusindeksi (engl. *topographic wetness index, TWI*), maankäyttö tai geologisten siirrosten läheisyys eivät ole osoittautuneet merkittäviksi tietyissä tutkimuksissa, vaikka niitä usein käytetään alitusanalyysissä (Bui ym. 2016). Lisäksi vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutukset voivat vaihdella ajallisesti, mikä vaikeuttaa muuttujien yksiselitteistä painottamista (Swanson ym. 2021; Gariano & Guzzetti 2016). Tämän vuoksi monet tutkimukset hyödyntävät monikriteerisiä analyysimenetelmiä, kuten esiintymissuhdeanalyysiä tai painotettua päällekkäisyysanalyysiä, joiden avulla voidaan yhdistää useita muuttujia ja antaa niille suhteellinen painoarvo. Painoarvoja voidaan määrittää esimerkiksi asiantuntija-arvion tai muiden tilastollisten analyysien perusteella (Arumugam ym. 2023; Shit ym. 2016).

Maanvyörymien ennakkoinnin haasteisiin liittyy myös aineistojen laatu ja saatavuus, havaintojen puute sekä kysymykset mallien yleistettävyydestä alueellisesti sekä ajallisesti. Erityisesti arktisella alueella aineistojen puute, saatavuus, tarkkuus sekä kattavuus ovat suuri haaste. Arktiset olosuhteet, kuten monivuotinen routa, nopeat säävaihtelut ja vaikeakulkuinen maasto, rajoittavat kenttähavaintojen määrää ja laatua. Lisäksi pitkittäisseuranta-aineistot ovat usein hajanaisia, eikä tarkkaa tietoa maanvyöryjen esiintymisestä ole helposti saatavilla tai dokumentoitu. Tämä vaikuttaa suoraan mallien luotettavuuteen ja tekee riskikarttojen laatimisesta epävarmempaa, etenkin kun maankäyttö, ilmastonmuutos ja lämpenevä ikirouta muuttavat prosessien dynamiikkaa nopeasti. Arktisilla alueilla korostuu tarve kehittää yksinkertaisia, asiantuntija-arvioihin perustuvia menetelmiä, jotka soveltuvat myös rajallisiin aineistoihin.

3 Tutkimusalue

3.1 Ilmasto ja säteilyolosuhteet

Huippuvuorten alueella sääolosuhteet vaihtelevat alueellisesti paljon, mutta etelässä ja lännessä vallitsee selvästi leudompi ja kosteampi ilmasto, kun taas koillisosassa on kylmempää ja kuivempaa (Førland ym. 2011). Huippuvuorilla rankkasade voidaan määritellä päiväsateeksi, joka ylittää 20 mm (Førland ym. 2011; Serreze ym. 2015). Tällaisia päiviä esiintyy nykyilmastossa noin kerran vuodessa, mutta määrä voi kaksinkertaistua vuosisadan loppuun mennessä (Førland ym. 2011). Sademäärä on hyvin pieni maapallon eteläisempiin alueisiin verrattuna, mutta se voi aiheuttaa arktisessa ympäristössä vakavia seurauksia. Alueen lumiolosuhteet seuraavat vuodenaikojen vaihtelua. Lumen ensimmäinen pysyvä kertyminen tapahtuu keskimäärin syyskuun alussa, ja sulaminen ajoittuu kesäkuun alkuun (Pelt ym. 2016). Talvikauden sadanta tulee pääosin lumena, mutta ilmaston lämpeneminen kasvattaa yhä enemmän sateen osuutta myös lumettomana aikana (Førland ym. 2011).

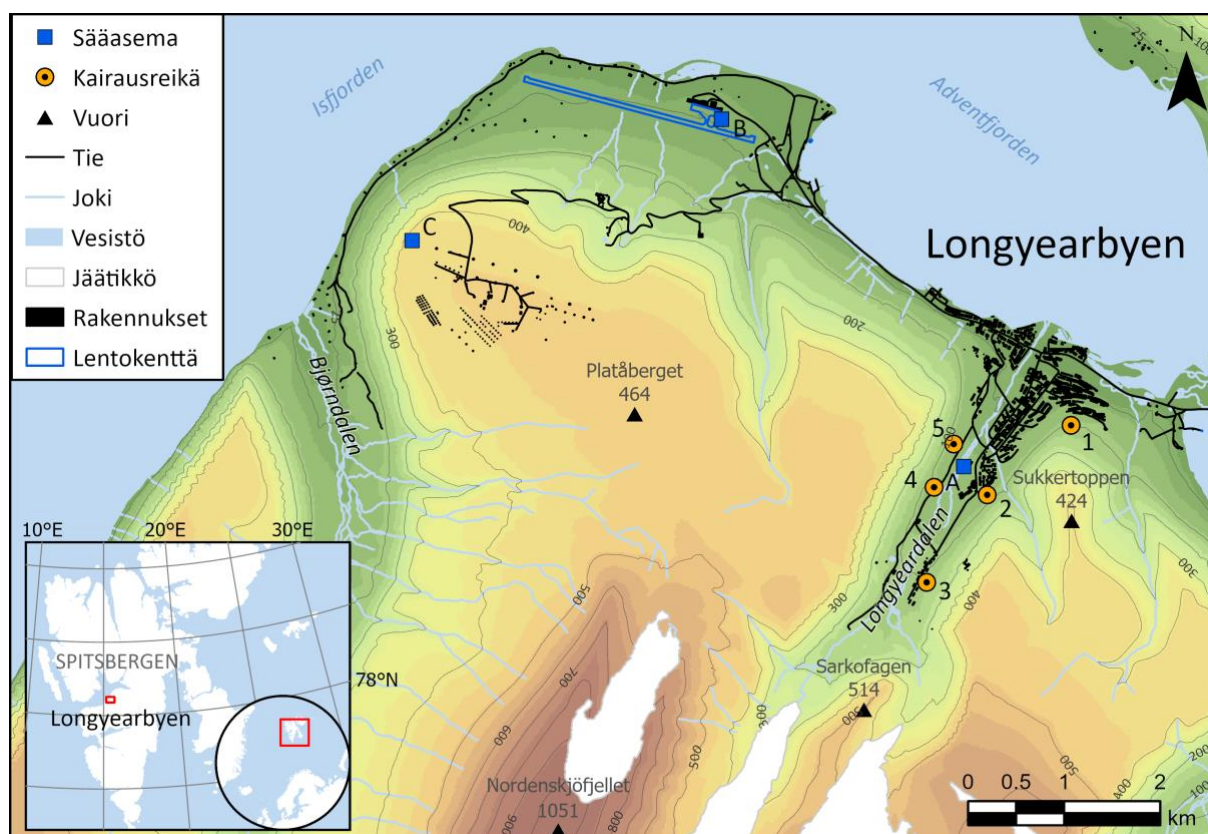
Huippuvuorten sijainti (noin 79° pohjoista leveyttä) luo erittäin voimakkaan vuodenaikaisvaihtelun säteilyolosuhteisiin. Alueella vallitsee kaamos loka–helmikuussa, jolloin auringonsäteily ei tavoita lainkaan maanpintaa, ja vastaavasti yöttömän yön aikaan huhti–elokuussa aurinko paistaa jatkuvasti horisontin yläpuolella (Maturilli ym. 2015). Tämän seurauksena lyhytaaltoisen säteilyn (auringonsäteilyn) määrä vaihtelee vuodenaikojen mukaan voimakkaasti ja sitä esiintyy ainoastaan keväästä syksyyn. Pitkäaaltoinen säteily, joka on peräisin ilmakehästä ja maanpinnasta, puolestaan vaikuttaa säteilybudjettiin ympäri vuoden, erityisesti talvella, jolloin pilvisuus ja ilmankosteus lisäävät alaspäin suuntautuvaa lämpösäteilyä. Säteilyolosuhteet vaikuttavat suoraan maanpinnan lämpötilaan, routaan ja lumen sulamiseen, jotka ovat keskeisiä tekijöitä maanvyörymäalittiuden kannalta. Esimerkiksi lumipeitteen sulaminen varhain keväällä alentaa maanpinnan albedoa ja kasvattaa nettoradiaatiota, mikä voi kiihdyttää maaperän sulamista (Maturilli ym. 2015).

3.2 Geologia ja jäätiköt

Longyeardalenin alueella esiintyy pääasiassa tertiäärisiä sedimenttikiviä, kuten hiekkakiveä, liusketta ja savikiveä, jotka ovat kerrostuneet vaakasuuntaisesti ja voivat heikentää rinteiden mekaanista vakautta verrattuna esimerkiksi magmakiviin (Elvevold ym. 2007). Rinteiden alaosissa ja laaksojen pohjilla esiintyy lisäksi solifluktiomateriaalia, lumivyörysedimenttejä, kivivyöryaineita sekä muta- ja kivivyöryjen kerrostumia, jotka voivat viitata alueen aktiivisiin geomorfologisiin prosesseihin ja lisääntyneeseen maanvyörymäalittiuteen (Rubensdotter, 2022). Kivilajien rakenteelliset ja vedenläpäisevyyteen liittyvät erot vaikuttavat suoraan niiden alttiuteen maanvyöryille, ja siksi alueellinen kivilajikartoitus on tärkeä osa riskinarviointia (Barton & Kværner, 2012).

Huippuvuorilla ilmaston eroavaisuudet eteläisten ja koillisten alueiden välillä näkyvät selvästi jäätiköiden massataseeseen ja jakautumiseen. Alueen suurimmat jäätiköt sijaitsevat kylmemmässä koillisosassa, kun taas Spitsbergenin leudommilla ja kuivemmilla alueilla jäätiköitä on huomattavasti vähemmän (Schuler ym. 2020). Noin 34 000 km² eli 57 % Huippuvuorten noin 60 000 km²:n maa-alasta on jäätiköiden peitossa (Nuth ym. 2013), mikä vastaa noin 10 % kaikista Arktiksen jäätiköistä, pois lukien Grönlannin mannerjäätikön.

Tutkimusalueen eteläpuolella sijaitsevat Longyearbreen ja Larsbreen -jäätiköt. Jäätiköt ovat Sarkofagenin huipun kummallakin puolella, Longyearbreen (kuva 1, vasen) ja Larsbreen (kuva 1, oikea) ovat myös suosittuja vapaa-ajankohteita. Näiden sekä viereisten vuorten sulamisvedet laskevat Longyeardalenin läpi virtaavaan Longyearelva-jokeen ja edelleen kohti Adventfjordenia, vaikuttaen alueen hydrologisiin ja geomorfologisiin prosesseihin (Rubensdotter 2022).



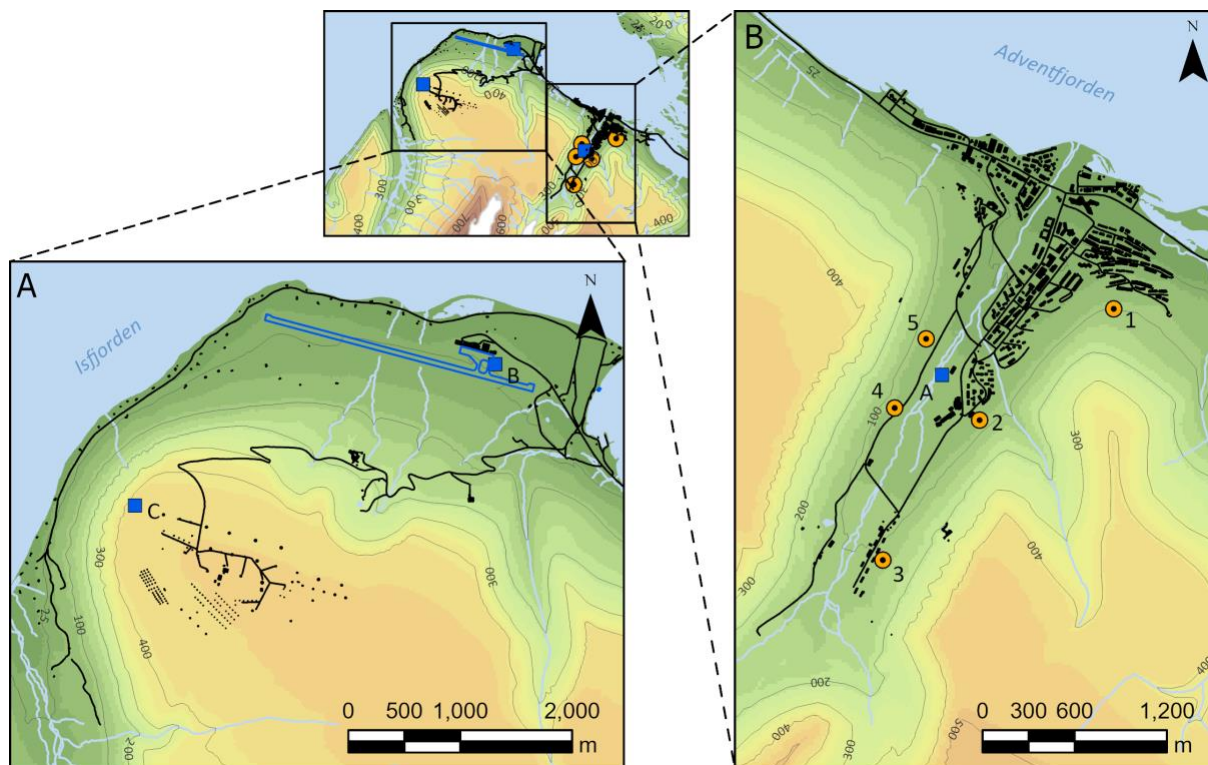
Lähde: Aluekartta Norwegian Polar Institute; Maailmankartta: Opendatasoft

Kuva 1. Longyearbyenin kylä Huippuvuorilla. Tutkimusalue keskittyy rakennettuun ympäristöön Longyeardalenin ja Platåbergetin alueella. Tutkimuksessa käytetyt sääasemat (A-C) ja kairausreijät (1-5) on merkitty symbolein. Kartalla näytetyt jäätiköt ovat vasemmalta oikealle: Plåtabreen, Longyearbreen ja Larsbreen.

3.3 Maankäyttö ja rakennettu ympäristö

Valtaosa rakennuksista Longyearbyenissä sijaitsee Longyeardalenissa (kuva 1). Longyeardalenin alue voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: tiheästi asuttu pohjoisosa ja eteläisempi Nybyen, jossa asutus on harvempaa. Longyearbyenin kaupunkialue ulottuu lännessä lentokentän suuntaan, jonka alueella on myös yksittäisiä hajanaisia asuinrakennuksia. Platåbergetin alueella sijaitsee suuri satelliittiasema, mutta ei lainkaan pysyvää asutusta. Itään päin kaupunkialue jatkuu Adventdalenin laaksoon haja-asutuksen, koiratarhojen ja vanhojen kaivosrakennusten sekä teollisuusrakennusten muodossa. Bjørndalenin suuntaan on haja-asutusta.

Longyearbyenin rakentaminen on aiemmin perustunut oletukseen pysyvästä routakerroksesta, mutta ikeiroudan lämpeneminen ja aktiivikerroksen syveneminen ovat heikentäneet maaperän kantavuutta (Meyer 2023). Tämä on johtanut siihen, että useita rakennuksia on jouduttu evakuoimaan ja purkamaan, eikä uusia rakennuksia enää sallita tietyillä riskialueilla. Suojarakenteita, kuten vyöryesteitä, on rakennettu olemassa olevien rakennusten suojaamiseksi. Lisäksi paikallishallinto on ottanut käyttöön uusia riskienhallintakäytäntöjä ja sopeutumistoimia. Tässä tutkimuksessa tarkastelen kylää kahtena erillisenä osana. Kuvassa 2A on kuvattu tästä edes tutkielmassa länsialueeksi kutsuttu alue, ja kuvassa 2B Longyeardaleniksi kutsuttu alue.



Kuva 2. Aluejako länsialueeseen (A) ja Longyeardalenin alueeseen (B).

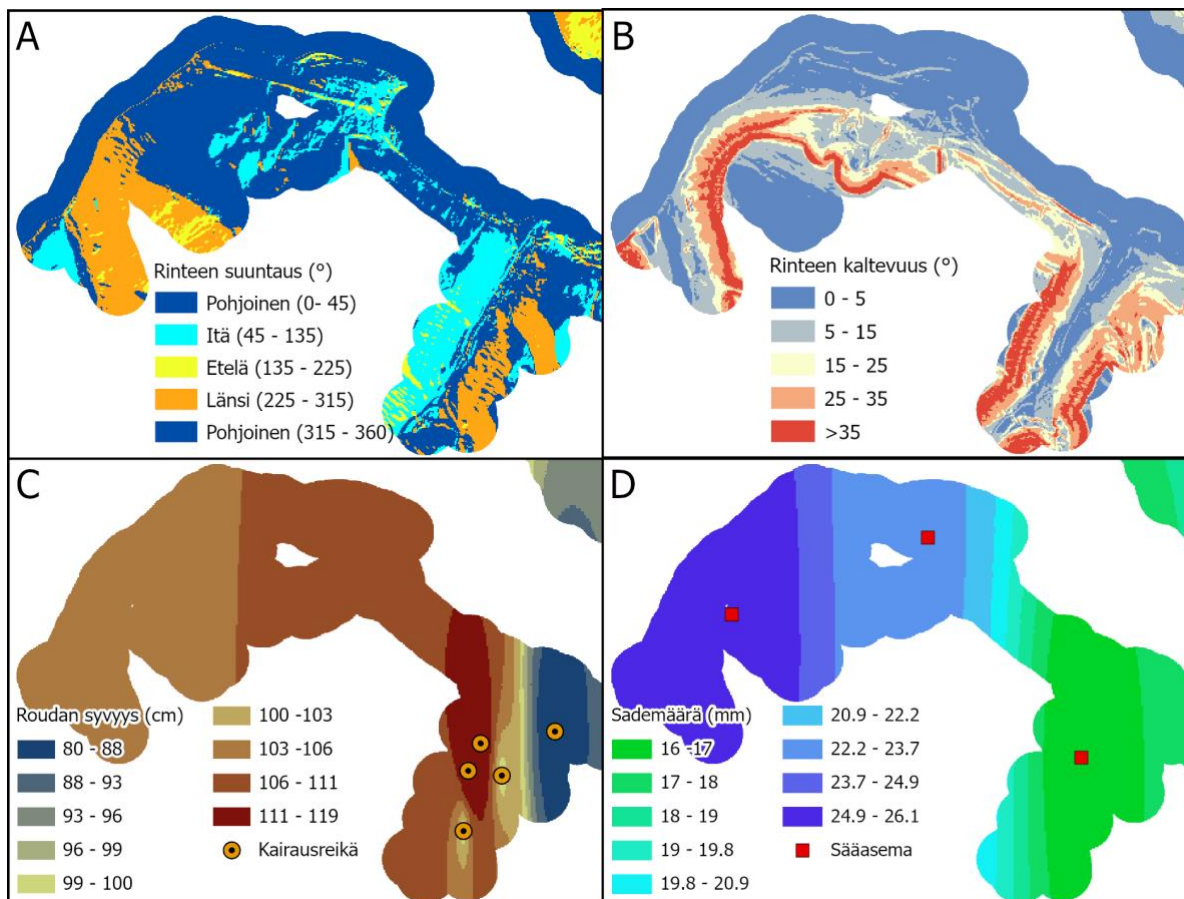
4 Aineistot ja menetelmät

4.1 Korkeusaineisto

Tutkimusalueen korkeusaineisto (engl. *Digital Elevation Model, DEM*) on vuonna 2014 julkaistu 20 metrin resoluution rasteriaineisto, jonka on tuottanut Norwegian Polar Institute. Aineisto on ladattu sivustolta <https://data.npolar.no/> 15.8.2024. Laskin aineistosta rinteiden kaltevuuden (engl. *Slope*) 0° - 90°, sekä rinteiden suuntauksen (engl. *Aspect*) asteissa 0° - 365°. Rinteiden suuntaukset määrittelin vielä niin, että pohjoinen on luoteesta (315°) koilliseen (45°), itä on koillisesta kaakkoon (135°), etelä on kaakosta lounaaseen (225°) ja länsi on lounaasta luoteeseen (taulukko 1). Rinteiden kaltevuuden sekä suuntauksen uudelleenluokittelin (engl. *Reclassify*) taulukon 1. mukaisesti viiteen eri todennäköisyysluokkaan maanvyörymäältiuteen perustuen. Uudelleenluokittelun tulokset rinteiden kaltevuudelle ja suuntaukselle on esitelty kuvassa 3A ja 3B.

Taulukko 1. Analyysissä käytettävien aineistojen todennäköisyysluokittelu maanvyörymäältiuden kannalta, sekä analyysissä käytetyt painoarvot jokaiselle eri muuttujalle.

Muuttujat	1	2	3	4	5	Painoarvo
Sademäärä (mm/d)	0-5	6-10	11-15	16-20	>20	10%
Roudan syvyys (cm)	0-50	51-100	101-150	151-200	>200	10%
Rinteiden jyrkkyys (°)	0-5	6-15	16-25	26-35	>35	60%
Rinteiden suuntaus (°)	315–45°	-	45–135°, 225–315°	-	135–225°	20%



Kuva 3. Rinteen suuntaus (A), rinteen kaltevuus (B), roudan syvyyden interpoloinnin (C) sekä sademäärän interpoloinnin (D) tulokset tutkimusalueella. Tutkimusalueelle on luotu tiestöstä ja rakennuksista 500 metrin puskurialue, jolle analyysi suoritetaan.

4.2 Roudan syvyys

Tutkimusalueella maaperän lämpötiladataa on saatavilla kuudesta kairausreistä eri puolilta Longyeardalenin aluetta (kuva 1). Kairausreijissä on lämpötilasensoreita vaihtuvien intervallien 10 – 50 cm välein. Reikien syvyydet vaihtelevat 300 – 700 cm. Mittaukset ovat 2 h resoluutiolla. Kairausreikiä ylläpitää University Centre in Svalbard (UNIS), ja lämpötiladata on ladattu <https://tap.where2o.com/> nettisivuilta 20.1.2025.

Maaperän lämpötila-aineisto on ladattu kaikista kairausreijistä päivältä 8.9.2024. Suodatin lämpötiladatasta roudan syvyyden valitsemalla kunkin reijän maksimi syvyyden, jossa lämpötila on $>0^{\circ}\text{C}$. Mittauspisteessä 1 tämä oli 80 cm syvyydessä, pisteissä 2 ja 3 100 cm syvyydessä ja pisteissä 5 ja 4 120 cm syvyydessä. Suoritin aineistolle interpoloinnin (engl. *Inverse distance weighting, IDW*), jonka tulokset on esitelty kuvassa 2C. Tämän jälkeen uudelleenluokittelin (engl. *Reclassify*) interpoloinnin tulokset taulukon 1. mukaisesti viiteen eri todennäköisyysluokkaan. Lopuksi aineisto muutettiin kokonaisluvulliseksi työkalulla INT. Vasta lopullisen analyysin suoritusvaiheessa routa- sekä sademäärä -aineisto luokiteltiin taulukon 1. mukaisesti perustuen maanvyörymälttiuteen.

Taulukko 2. Sademäärän ja routa-aineiston uudelleenluokittelut. Kumpikin aineisto luokiteltiin viiteen luokkaan aineiston arvojen mukaisesti. Painotetussa päällekkäisyysanalyysissä routa- sekä sademäärä - aineistot luokiteltiin taulukon 1. arvojen mukaisesti.

Luokka	1	2	3	4	5
Roudan syvyys	80-88	88-96	96-100	100-111	111-120
Sademäärä	16.6-18	18-20	20-22	22-24	24-26.1

4.3 Sademäärä

Useita eri ilmastomuuttujia on ladattavissa Norwegian Meteorology Institute:in ylläpitämältä *Norsk Klima Service Senter* -sivustolta. Aineistoa eri muuttujista on saatavilla useilla eri aikaresoluutiolla monelta sääasemalta. Latasin aineistot sademäärästä (mm) tunnin (1h) resoluutiolla ajanjaksolta 6.-9.7.2024 erikseen kolmelta eri asemalta; Keskustan sääasema (Longyear dalen Central), Lentokentältä (Svalbard Lufthavn) sekä Plåtabergetin huipulta (Plåtaberget). Aineisto on ladattu sivustolta <https://seklima.met.no/> 26.1.2025.

Suodatin aineistosta kokonaisen sademäärän 8h tunnin ajalta alkaen 7.7.2024 klo 12.00 ja loppuen 8.7.2024 klo 8.00. Sademäärät olivat seuraavat; Keskusta (kuva 1A) 16.6 mm, Lentokenttä (kuva 1B) 22.7 mm, ja Plåtaberget (kuva 1C) 26.1 mm. Suoritin aineistolle interpoloinnin (engl. *Inverse distance weighting, IDW*) (kuva 2D) ja uudelleenluokittelin (engl. *Reclassify*) interpoloinnin tulokset taulukon 2. mukaisesti viiteen eri luokkaan aineiston arvojen mukaisesti. Lopuksi aineisto muutettiin kokonaisluvulliseksi työkalulla INT. Kuten routa-aineisto, aineisto luokiteltiin päällekkäisyys-analyysissä taulukon 1. mukaisesti perustuen maanvyörymälttiuteen.

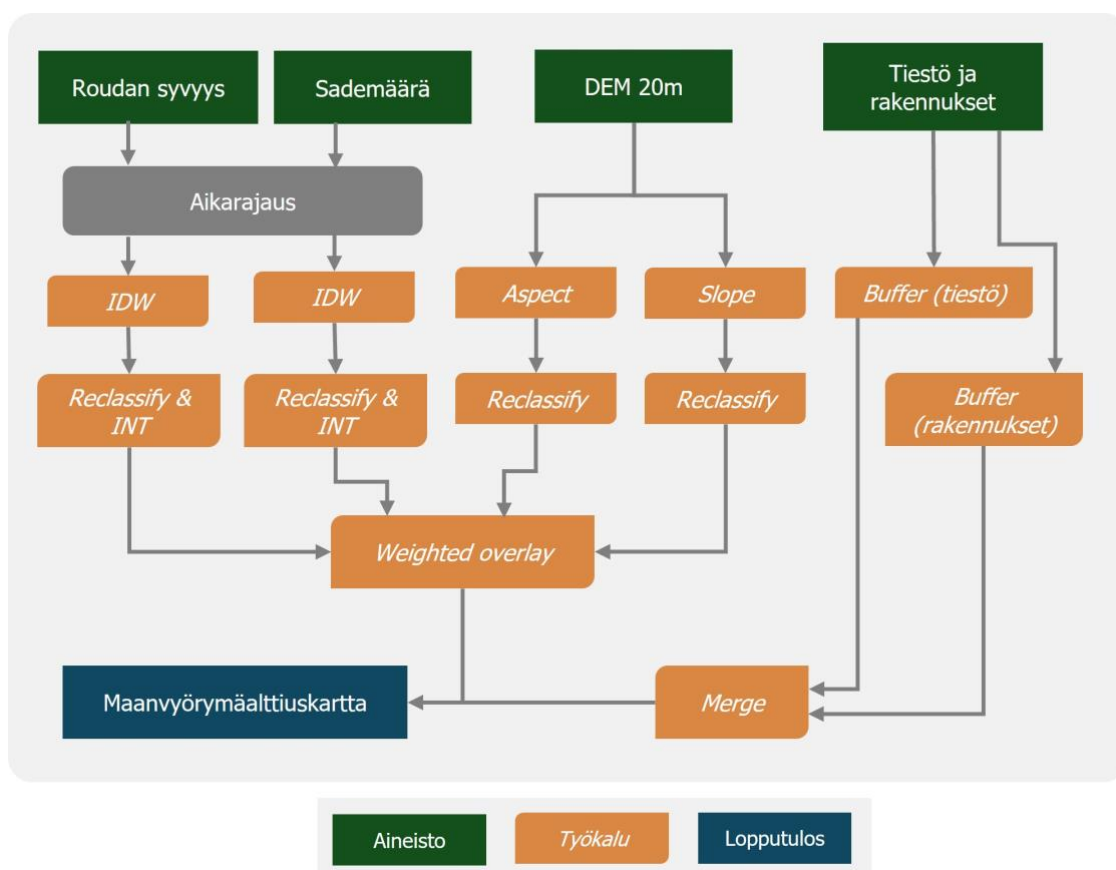
4.4 Maankäyttö ja rakennettu ympäristö

Tiedot alueen maankäytöstä ovat peräisin koko Huippuvuorten kattavasta 1:100 000 vektoriaineistosta, joka sisältää dataa rakennuksista, kaupunkialueesta, vesistöistä, maa-alueesta ja monista erilaisista alueen fyysisistä ominaisuuksista. Kaikki alueen ominaisuudet kuten vesistöt, joet, jäätiköt, korkeuskäyrät, maa-alueet ja tiestö on visualisoitu tästä aineistosta. Aineiston on tuottanut Norwegian Polar Institute, ja se on ladattu sivustolta <https://data.npolar.no/> 24.10.2024. Alueen rakennuksista käytin tarkempaa ja päivitetystä Open Street Map:in tuottamaa vektoriaineistoa, joka on ladattu sivustolta www.geofabrik.de 18.3.2025. Vektoriaineistosta muutin rakennukset pisteiksi, jonka avulla tarkastelin rakennuksien määriä eri todennäköisyysluokituksissa analyysin tuloksissa.

4.5 Painotettu päällekkäisyysanalyysi

Suoritin painotetun päällekkäisyysanalyysin (engl. *weighted overlay analysis*) neljälle aineistolle (rinteen jyrkkyys ja kaltevuus, sademäärä ja roudan syvyys) käyttäen uudelleenluokiteltuja aineistoja, sekä painoarvoja taulukon 1. arvojen mukaisesti. Päällekkäisyysanalyysissä routa- ja sademäärä -aineistoille annettiin uudelleen taulukon 1. mukainen todennäköisyysluokitus maanvyörymälttiuden mukaan. Rinteen kaltevuuden ja suuntauksen uudelleenluokittelussa käytettiin todennäköisyysluokkia taulukon 1 mukaisesti.

Tiestön ja rakennusten piste-aineistoille tehtiin omat 500 metrin puskurialueet (engl. *Buffer*), jonka jälkeen puskurialueet yhdistettiin toisiinsa (engl. *Merge*). Analyysi rajattiin tälle puskurialueelle, jotta tulokset näytetään vain 500m säteeltä osasta tiestöstä ja rakennuksista. Puskuri ei ole ottanut huomioon kaikkia visualisoituja rakennuksia, esimerkiksi Plåtabergetin satelliittikeskuksen kaikkia satelliittirakennuksia ei ole otettu huomioon. Kaikki oleelliset asuinrakennukset, sekä satelliittikeskuksen toimisto rakennukset on huomioitu. Vuokaavio yllä mainituista työvaiheista on esitelty kuvassa 4.



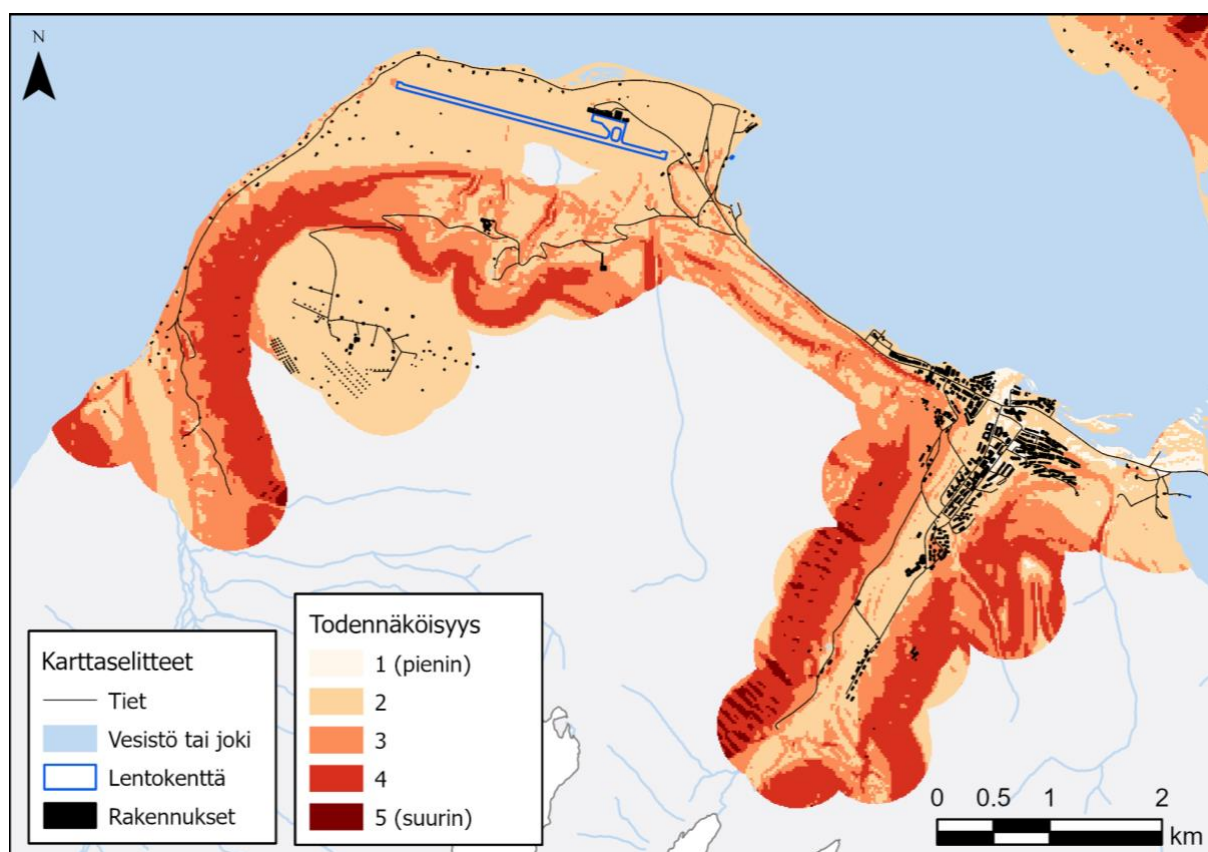
Kuva 4. Työvaiheet sisältävät neljän eri aineiston esikäsittelyn (interpolointi ja arvojen laskenta), aineistojen uudelleenluokittelun luokkiin 1-5, sekä lopullisen analyysin, joka rajataan tiestöstä ja rakennuksista luotuun puskurialueeseen.

5 Tulokset

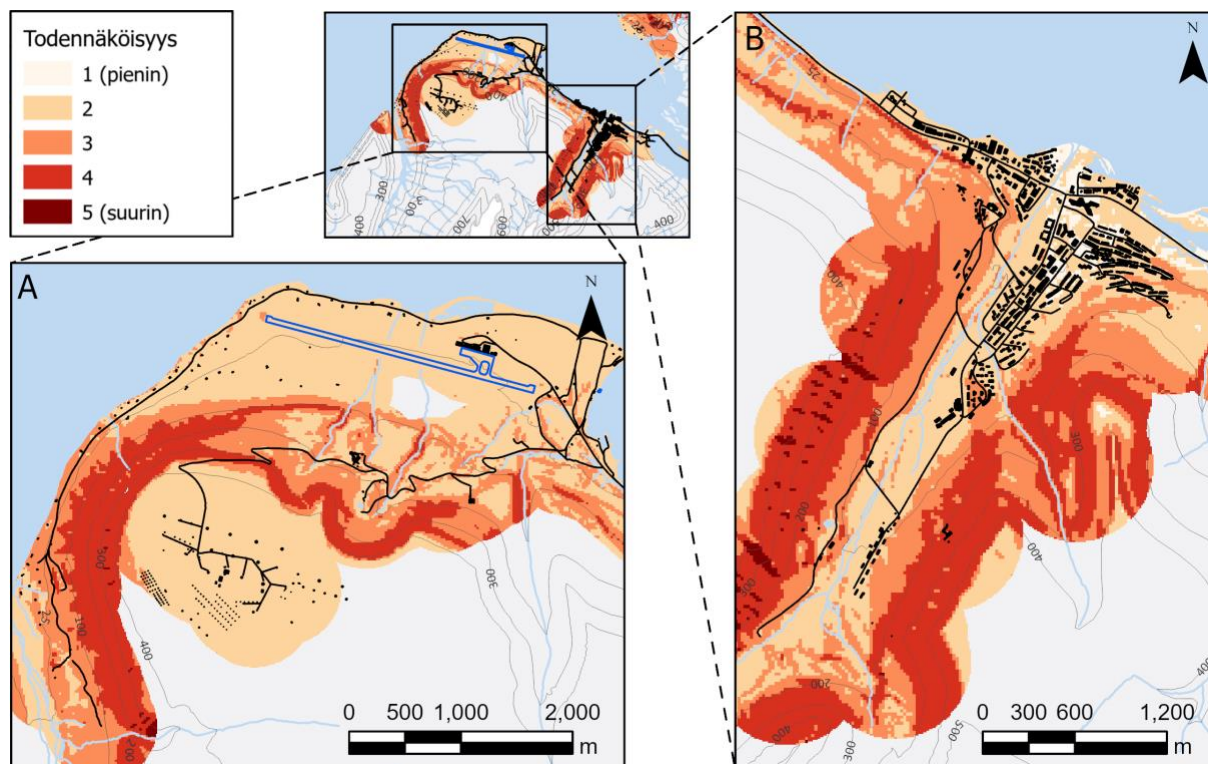
5.1 Maanvyörymäalttius alueellisesti

Maanvyörymän todennäköisyys Longyearbyenin kylässä vaihtelee alueellisesti (kuva 5). Pienimmän todennäköisyysluokan (luokka 1) alueet sijoittuvat pääosin Longyeardalenin pohjois- ja itäosiin, erityisesti Adventfjordin rantaviivan läheisyyteen. Toiseksi pienimmän todennäköisyyden (luokka 2) alueita esiintyy tasaisilla alueilla Longyeardalenin laakson pohjalla, lentokentän ympäristössä pohjoisrannikolla sekä Platåbergetin satelliittiasemalla. Suurimman todennäköisyyden alueet (luokat 3–5) sijoittuvat pääasiassa jyrkille rinteille, kuten Longyeardalenin ja Länsialueen rinteille.

Kaupunkialueen ulkopuolella (kuva 6A) esiintyy laajoja, tasaisia alhaisen todennäköisyyden alueita (luokka 2), erityisesti lentokentän ympäristössä ja Platåbergetin alueella. Näitä ympäröivät jyrkemmät rinteet, joilla todennäköisyys kasvaa luokkiin 3–4. Longyeardalenin alueella (kuva 6B) luokitukset vaihtelevat enemmän. Longyeardalenin länsirinteen etelään suuntautuvat osat kuuluvat korkeimpaan luokkaan (luokka 5), kun taas Longyeardalenin itärinne on pääosin luokkaa 3–4.



Kuva 5. Maanvyörymäalttius Longyearbyenin kylässä 8.7.2024. Luokitukset 1-5 kertovat maanvyörymän todennäköisyydestä pienimmästä (1) suurimpaan (5). Tulosten kanssa on visualisoitu alueen tärkeä infrastruktuuri. Muita huomioituja ominaisuuksia ovat vesistöt. Jokien uomat sekä alueen korkeusvaihtelut on visualisoitu tulosten kanssa kuvassa 6.



Kuva 6. Maanvyörymäalttius Longyearbyenin kylässä 8.7.2024 eroteltuna länsialueille (A) ja Longyeardalenin alueelle (B). Luokitukset 1-5 kertovat maanvyörymän todennäköisyydestä pienimmästä (1) suurimpaan (5). Tulosten kanssa on visualisoitu alueen tiestö, rakennukset, lentokenttä, vesistöt, jokien uomat ja korkeuskäyrät.

Taulukossa 3 on eroteltu rakennusten osuus todennäköisyysluokittain koko tutkimusalueelle, sekä erikseen länsialueelle ja Longyeardalenin alueelle. Myös tiestön osuus on esitetty. Suurin osa rakennuksista (79,5%) sijaitsee luokituksella 2, sekä Longyeardalenin alueella että länsialueilla. Luokassa 2 on yhteensä 750 rakennusta, joista 285 kaupungin ulkopuolella ja 465 kaupungin alueella. Luokassa 3 on yhteensä 105 (11,1%) rakennusta, ja luokassa 1 ainoastaan 84 (8,9%), jotka kaikki sijaitsevat kaupunkialueella. Luokassa 4 on yhteensä neljä rakennusta, kaikki länsialueella, eikä luokassa 5 ole yhtään rakennusta. Tiestön kokonaispituus on 64 914 metriä, josta valtaosa sijoittuu luokkiin 2 (77,6 %) ja 3 (17,6 %). Luokassa 1 on noin 3 023 metriä tiestöä (4,6 %), luokassa 4 puolestaan 495 metriä (0,8 %), eikä luokassa 5 ole lainkaan tiestöä.

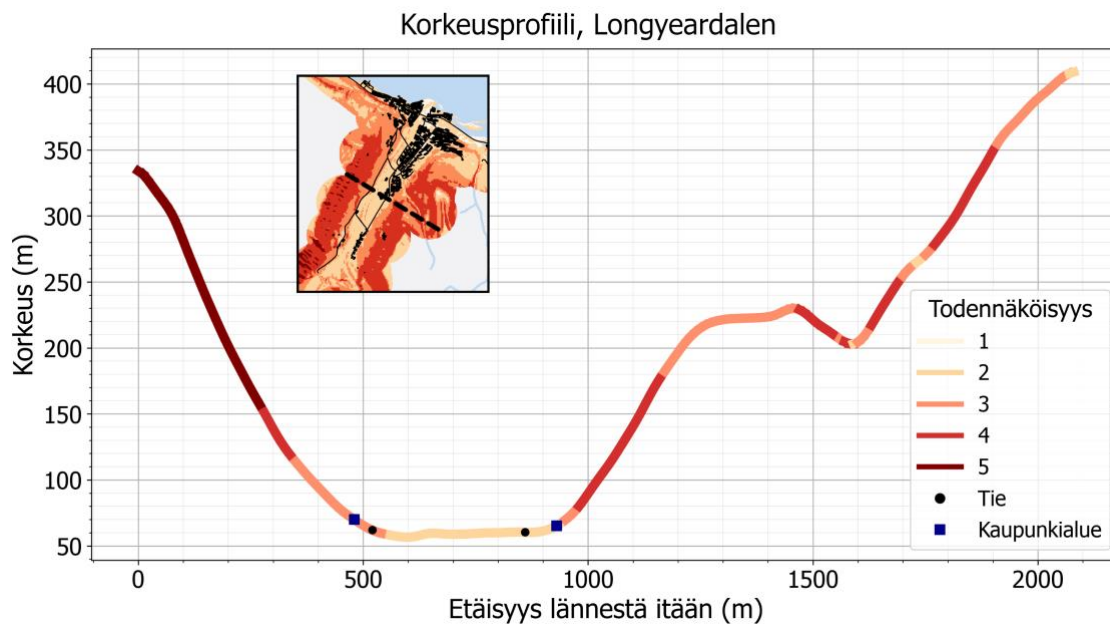
Rakennukset Longyeardalenissa keskittyvät laakson pohjoisiin osiin, erityisesti Adventfjordenin rannalle, ja asutus levittäytyy jonkin verran myös länteen kohti lentokenttää sekä itään kohti Adventdalenia. Laakson keskivaiheilla on myös yksi pienempi asutuskeskittymä kahden jokiuoman välissä, ja se sijoittuu kohtalaiselle riskiluokalle 3.

Taulukko 3. Rakennusten lukumäärät sekä prosenttiosuudet maanvyörymalttiuden todennäköisyysluokitusten mukaisesti. Luokitukset on jaettu sekä kaupungin ulkopuolella että kaupunkialueen sisäpuolella oleviin rakennuskiin, sekä kaikkiin rakennuksiin yhteensä sekä tiestöön. Analysoinnissa ei ole huomioitu vuonon toisella puolella rakennuksia (Kuva 4).

Todennäköisyys- luokitus	Rakennukset lukumäärä (kpl) ja tiestö (m) / prosenttiosuus (%)							
	Länsialue		Longyeardalen		Kaikki rakennukset		Tiestö	
1	0	-	84	13.9	84	8.9	3023	4.6
2	285	84.3	465	76.9	750	79.5	50385	77.0
3	49	14.5	56	9.3	105	11.1	11506	17.6
4	4	1.2	0	-	4	0.4	495	0.8
5	0	-	0	-	0	-	0	-
Yhteensä:	338	100	605	100	943	100	64914	100

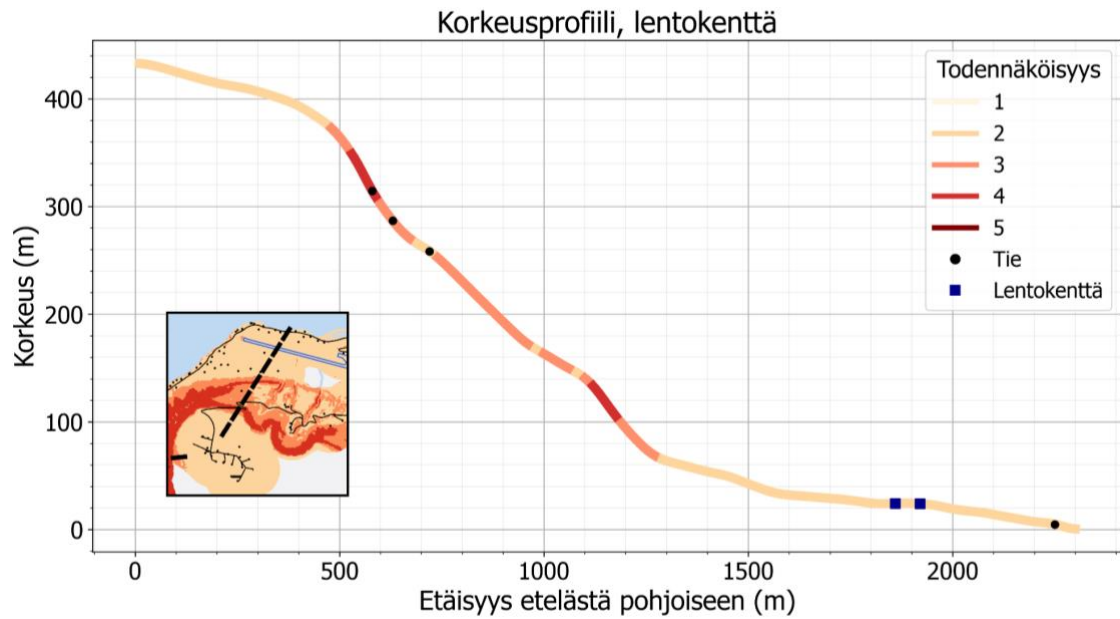
5.2 Korkeusprofiilit 1-3

Korkeusprofiili Longyeardalenista (kuva 7) havainnollistaa alueen topografiaa ja todennäköisyysluokituksen jakautumista alueelle. Profiilin korkeus vaihtelee noin 50 metristä yli 400 metriin. Alavimmalla kohdalla laakson pohjalla esiintyy pääosin todennäköisyysluokkia 1 ja 2, kun taas jyrkemmillä rinteillä riskiluokitus kohoaa luokkiin 4 ja 5. Kaupunkialue sijoittuu laakson pohjalle ja profiilin poikkileikkaavat kaksi tietä kulkevat todennäköisyysluokkien 2 ja 3 alueella. Lännestä itään tarkasteltaessa profiili alkaa hyvin jyrkällä rinteellä, joka on kaikkein riskialtein alue maanvyörymälle Longyeardalenin alueella sen koon ja korkean luokituksen (luokka 5) vuoksi. Luokitus vaihettuu luokkiin 4 – 2 sitä mukaan kun rinne loivenee. Todennäköisyysluokitus kasvaa taas rinteiden noustessa laakson pohjalta, noin 1000 m etäisyyden kohdalla. Noin 1500 m kohdalla korkeusprofiilissa on notkahdus joen uoman myötä, kunnes rinne taas jyrkkenee huippua kohti.

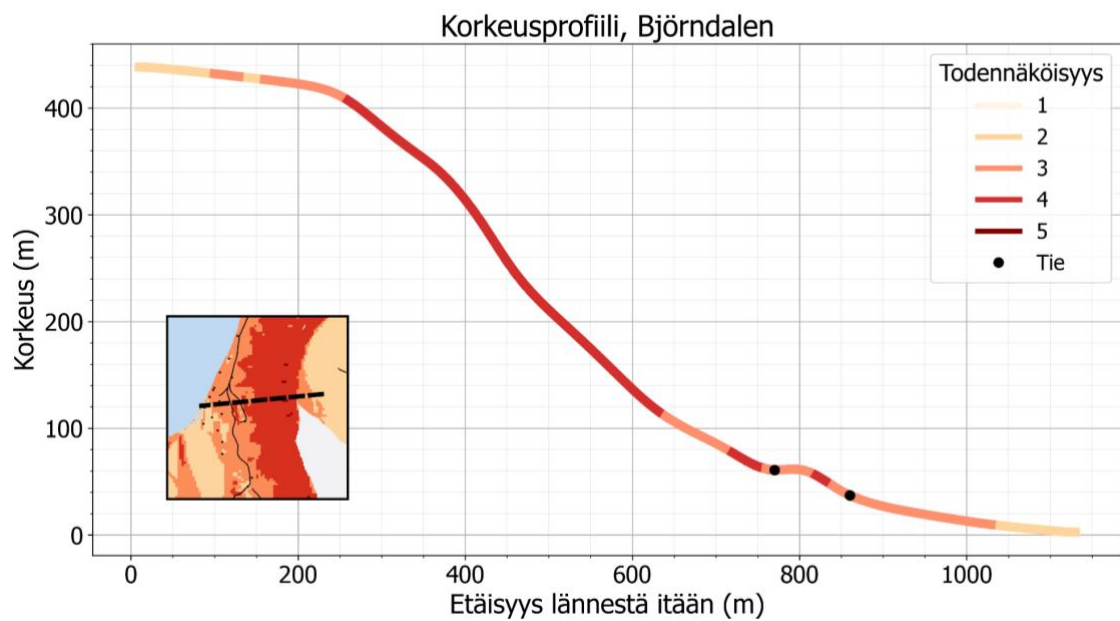


Kuva 7. Korkeusprofiili maanvyörymäalittiudesta Longyeardalenin eteläosasta. Poikkileikkaus on kuvattu kartalla, ja profiilia luetaan lännestä itään. Profiilin on lisätty kaupunkialueena pidetyn alueen rajat, varsinainen kaupunkialue sijoittuu siis laakson pohjalle.

Myös Platåbergetiltä pohjoisrannikolle ylettyvältä korkeusprofiililta on havaittavissa se, että jyrkemmät rinteet ovat korkeamman todennäköisyyden alueita (kuva 8). Mitä loivempi alue on, sitä pienempi todennäköisyysluokitus on. Huomattavaa on se, että tällä alueella yksi tiestön osista kulkee todennäköisyysluokituksella 4, joka on korkein luokitus millekkään tiestön osuudelle (taulukko 3). Lentokenttä ja sen ympäröivä alue on laajaa, tasaista aluetta matalan todennäköisyyden luokituksella (luokka 2). Korkeusprofiili Björndalenin alueelta (kuva 9) havainnollistaa samat ilmiöt, kuin muut korkeusprofiilit. Alue on erityisen mielenkiintoinen, koska siellä on vakituista asutusta, mutta rantaviiva on hyvin lähellä jyrkkää rinnettä.



Kuva 8. Korkeusprofiili alkaa Platåbergetin päältä, satelliittiaseman läheisyydestä, ja jatkuu pohjoisrannikon rantaviivaan saakka. Tiestö on merkattu mustilla pisteillä ja lentokentän alueen rajat sinisin neliöin. Pieni indeksikartta näyttää poikkileikkauksen sijainnin, ja sitä tulee lukea etelästä pohjoiseen.



Kuva 9. Korkeusprofiili Björndalenin alueelta. Tiestö on merkattu mustilla pisteillä. Pieni indeksikartta näyttää poikkileikkauksen sijainnin, ja sitä tulee lukea idästä länteen, kun korkeusprofiilia luetaan lännestä itään.

6 Keskustelu

6.1 Maanvyörymäalttiuden merkitys arktisilla alueilla

Maanvyörymäalttiustutkimukset ovat globaalisti merkittäviä alueiden maankäytön ja infrastruktuurin suunnittelun sekä yhteiskunnan turvallisuuden kannalta. Arktisella alueella lämpenevän ilmaston aiheuttama riski maanvyörymiin kasvaa (Yan ym. 2024; Patton ym. 2019; Swanson ym. 2021), mikä heikentää arktisten yhteisöjen turvallisuutta. Maanvyörymät voivat aiheuttaa mittavia taloudellisia ja inhimillisiä kustannuksia, ja erityisesti asuttujen alueiden riskitekijät on tunnistettava ja niitä on seurattava aktiivisesti. Huippuvuorten alue on yksi nopeiten lämpiviävistä alueista koko maapallolla (Matruilli ym. 2013), mikä tekee ilmiöstä tällä alueella erittäin ajankohtaisen.

Tiedon puute arktisilla alueilla on edelleen suuri haaste. Harva asutus, vaikeakulkuinen maasto, ennalta-arvaamattomat sääolosuhteet ja mittausresurssien rajallisuus vaikuttavat siihen, kuinka tarkasti alueita voidaan kartoittaa ja ilmiöitä voidaan analysoida. Pitkittäisseuranta-aineistot ovat usein puutteellisia, eikä tarkkaa tietoa maanvyöryjen esiintymisestä ole systemaattisesti dokumentoitu (Swanson ym. 2021).

Arktisella alueella pelkästään ilmaston mallintaminen on vaikeaa, koska siellä tapahtuu monimutkaisia palautemekanismeja, jotka vaikuttavat säteilyn kulkuun (Davy & Griewankt 2023; Pithan & Mauritsen 2014). Lisäksi vuodenaikojen vaihtelut ja muut ilmaston dynaamiset prosessit ja meren jääpeitteen muutokset tekevät mallinnuksesta erityisen haastavaa (Pithan & Mauritsen 2014). Tämän lisäksi ikiroudan mallintamisessa on omat haasteensa. Perinteiset mallinnukset eivät kykene huomioimaan kaikkia ikiroutaan liittyviä fysikaalisia prosesseja, kuten ikiroudan sulamiseen vaativaa lämpöenergiaa ja sen aiheuttamia muutoksia maaperän ominaisuuksiin, kuten lämmönjohtavuuteen ja lämpökapasiteettiin (Wang et al. 2017; Overduin ym. 2019). Tämän vuoksi mallinnus edellyttää kehittyneitä malleja, jotka ottavat huomioon sekä lämmön että veden liikkeen. Tällaisia malleja on toistaiseksi kehitetty vain vähän, eikä niitä ole vielä laajasti käytössä arktisissa olosuhteissa (Wang et al. 2017; Overduin ym. 2019).

Viime vuosina arktisten alueiden tutkimus on kasvanut huomattavasti, erityisesti ilmastonmuutoksen kiihdyttämien ympäristöllisten, sosiaalisten ja poliittisten muutosten vuoksi (Łuszczuk ym. 2020). Kansainvälinen kiinnostus, geopoliittiset näkökulmat sekä tutkimusmenetelmien teknologinen kehitys ovat johtaneet siihen, että arktista aluetta tutkitaan nykyisin entistä monitieteisemmin ja strategisemmin (Łuszczuk ym. 2020). Huippuvuoret on noussut keskeiseksi tutkimusalueeksi, sillä se toimii herkkänä mittarina arktisille ympäristömuutoksille (Schuler ym. 2020) ja tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden seurata muun muassa ikiroudan tilaa, hydrologisia muutoksia ja luonnonkatastrofien riskejä. Longyearbyenissä riskienhallinta perustuu pääosin institutionaaliseen yhteistyöhön viranomaisten, tutkijoiden ja paikallisyhteisön välillä. Päätöksenteossa hyödynnetään riskinarviointien, havainnointien ja

merkityksenantoprosessien kautta kerättyä tietoa, ja tavoitteena on tehdä tietoon perustuvia ratkaisuja muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa (Johannessen ym. 2024). Riskienhallinnan prosessit sisältävät teknistä analyysia sekä tilannekohtaisia havaintoja, mutta paikallisen tiedon ja kokemuksen järjestelmällinen hyödyntäminen on edelleen riittämätöntä. Kaksisuuntainen riskiviestintä ja yhteinen merkityksenanto ovat keskeisiä kehittämiskohteita, sillä ne voivat lisätä luottamusta ja yhteisön sitoutumista toimenpiteisiin. Tiedollisia aukkoja on vielä erityisesti ilmatoriskien tunnistamisessa ja tulkinnassa osana yhteiskunnan turvallisuutta sekä epävarmuuden hallinnassa riskienhallinnan eri vaiheissa. Longyearbyenin riskienhallintaa onkin kehitettävä kokonaisvaltaisemmaksi, jotta se vastaisi paremmin ilmastonmuutoksen aiheuttamiin monimutkaisiin uhkiin arktisessa ympäristössä.

6.2 Maanvyörymäalttius alueellisesti

Suurin osa Longyearbyenin rakennuksista ja tiestöstä sijaitsee matalan riskin alueilla, pääosin luokissa 1 ja 2, jotka tässä tutkimuksessa edustavat turvallisimpia vyöhykkeitä. Longyeardalenin laakson eteläosat osoittautuvat selvästi muita alueita alttiimmiksi. Erityisesti eteläinen asutuskeskittymä, eli Nybyenin alue, joka altistuu viereisten rinteiden maanvyörymäalttiuden korkeimmille riskiluokituksille (luokka 5). Nämä korkeimman riskiluokituksen saaneet rinteenosat voidaan tutkimuksen perusteella selittää sillä, että rinteenosat ovat jyrkkiä ja ne ovat suunautuneet etelään. Vaikka laakson pohjalla on leveä tasankoalue, joka erottaa rinteiden asutuksesta, riski Nybyenissä on silti olemassa. Lisäksi aluetta uhkaa myös se, että laakson eteläosat keräävät todennäköisesti runsaasti sulamisvettä jäätiköiltä ja vuorilta, mikä lisää maan epävakautta (Swanson ym. 2021; Patton ym. 2019). Myös Longyeardalenin itäreunalla kulkeva jyrkkä rinne saa korkeita luokituksia (3–4), mikä lisää tiheään asutun alueen haavoittuvuutta. Vaikka yksittäisiä asutuskeskittymiä esiintyy myös riskialttiimmilla alueilla, suurin osa rakennuksista (88,4 %) Longyeardalenin alueella sijoittuu mataliin riskiluokkiin 1 ja 2.

Tiestön osalta suurin osa (81,6 %) väylistä sijoittuu matalan riskin alueille (luokka 1 ja 2), mikä on turvallisuuden kannalta positiivista. Huomattavana poikkeuksena on Longyeardalenin länsireunan alapuolella kulkeva päätie, joka on kaupungin keskeinen liikenneväylä jalankulkijoille, pyöräilijöille ja autoilijoille. Tämä tie oli osallisena vuoden 2016 maanvyörytapauksessa (Wang 2017) ja sijoittuu korkeampaan riskiluokkaan (3). Toinen merkittävä riskiväylä on tie, joka johtaa Bjørndaleniin, alueelle, jossa esiintyy asutusta ja jonka yläpuolella on jyrkkä rinne. Vaikka rinteiden suuntaus on pohjois- ja länsipuolelle, rinteiden jyrkkyys lisää maanvyörymärisiä. Tie Platåbergetin satelliittiasemalle kulkee myös jyrkkien rinteiden läheisyydessä, mutta sen käyttöaste on vähäinen, joten sen riskitaso käytännössä on pienempi. Länsialueen ja Longyeardalenin yhdistävä tie aivan Adventfjordin rannalla on logistisesti kriittinen, sillä se yhdistää kaupungin lentokenttään ja satamaan. Vaikka analyysissä ei käsitelty koko rinnettä joka voisi vaikuttaa tämän väylän turvallisuuteen, ei sen ympäröivillä alueella havaittu merkittäviä riskiluokituksia. Topografisesti viereinen rinne vaikuttaa olevan samankaltainen muiden länsialueiden rinteiden kanssa, mikä viittaa maltilliseen riskitasoon.

Kokonaisuudessaan Longyearbyenin tiestö ja rakennettu ympäristö sijoittuvat suurimmaksi osaksi turvallisille alueille. Kuitenkin laakson eteläosissa sekä yksittäisillä rinteiden alapuolisilla alueilla esiintyy selkeitä riskialueita, jotka vaativat erityistä huomiota infrastruktuurin suunnittelussa ja ylläpidossa (Johannessen ym. 2024; Swanson ym. 2021).

6.3 Roudan ja rankkasateiden vaikutukset maanvyörymäalittiuteen

Tutkimuksen tärkeimpiä havaintoja on se, että korkeamman ikiroudan aktiivisen kerroksen syvyyden alueilla riskiluokitukset olivat alhaisempia. Erityisesti kairausreijän 1, joka sijaitsee Sukkertoppenin varjoisalla puolella, lämpötiladata osoitti selvästi matalamman (20 – 40 cm) aktiivisen kerroksen kuin muut kairausreijät. Tämä viittaa siihen, että muun muassa varjoisuus ja pienempi säteily määrä saattavat suojata alueen maaperää sulamiselta ja pitävät sen vakaampana. Tätä ei voida kuitenkaan todeta varmaksi ilman tarkempia jatkotutkimuksia, sillä mittauspisteen ikiroudan syvyyteen voi vaikuttaa useita muitakin tekijöitä. Tutkimustulosten havainto kuitenkin tukee käsitystä siitä, että aktiivisen kerroksen syvyys toimii merkittävänä indikaattorina maanvyörymäalittiudelle. Mitä syvempi aktiivinen kerros, sitä heikompi on maaperän kantavuus ja sitä suurempi maanvyöryriski (French, 2018; Dobinski, 2011). Tutkimuksen tulokset eivät tue suoranaisesti sademäärän alueellisen jakautumisen merkitystä maanvyörymäalittiuteen, sillä koko alueella sademäärä oli korkea (>16 mm). Voidaan kuitenkin todeta, että alueilla joilla sademäärä on korkeampi ja maan kosteuspitoisuus on suuri, joko sateen tai sulamisveden seurauksena, on alttiimpi maanvyörymälle (Ran ym. 2018; Swanson ym. 2021).

Aiemmat tutkimukset arktisilta alueilta osoittavat samanlaisia tuloksia. Maanvyöryjen todennäköisyys kasvaa selvästi tilanteissa, joissa maaperä on vettynyt, joko runsaan sademäärän, lumen sulamisen tai ikiroudan sulamisen seurauksena (Ma ym. 2006; Arghius ym. 2011). Myös pelkkä aktiivisen kerroksen syveneminen voi johtaa maanvyöryihin ilman rankkasateitakin, mikä korostaa ikiroudan muutosten merkitystä (Swanson 2021; Patton 2021). Tämä vastaa laajempaa tieteellistä ymmärrystä, jonka mukaan ilmastonmuutoksen myötä sekä sademäärien kasvu että ikiroudan sulaminen ovat keskeisiä tekijöitä arktisten alueiden lisääntyvässä maanvyöryalittiudessa (IPCC, 2018; Rantanen ym., 2022; Ciorescu, 2023).

Tulevaisuudessa, Longyearbyenin alueen maanvyörymäalittius tulee todennäköisesti kasvamaan merkittävästi ilmastonmuutoksen seurauksena. IPCC:n (2018) mukaan arktisella alueella lämpötilan nousu voi olla 6–8 °C vuoteen 2100 mennessä, mikä johtaa ikiroudan sulamisen kiihtymiseen sekä aktiivisen kerroksen syvenemiseen (Rantanen ym., 2022; French, 2018). Tämä muuttaa maaperän fysikaalisia ominaisuuksia, mikä lisää massaliikuntojen todennäköisyyttä (Patton ym., 2019). Samanaikaisesti sademäärien lisääntyminen ja rankkasateiden yleistyminen korkean leveysasteen alueilla (IPCC, 2018; Orłowsky & Seneviratne, 2012) lisäävät maaperän kosteuspitoisuutta, mikä voi laukaista maanvyörymiä erityisesti alueilla, joilla routa ei enää toimi maaperää sitovana tekijänä

(Swanson ym., 2021; Ciorescu, 2023). Lisäksi, kuten Gariano & Guzzetti (2016) toteavat, ilmastonmuutos ei vaikuta vain maanvyörymien esiintymistiheyteen, vaan myös niiden maantieteelliseen jakautumiseen ja kokoluokkaan. Onkin todennäköistä, että tulevaisuudessa maanvyörymäalttiutta esiintyy yhä laajemmilla alueilla, myös nykyisin vakaiksi luokitelluilla alueilla, mikä korostaa tarvetta päivittää riskiluokituksia ja varautumistoimia jatkuvasti ilmastollisten muutosten myötä.

6.4 Epävarmuustekijät

Tämän tutkimuksen lopputuloksiin vaikuttavat merkittävästi omat subjektiiviset valintani tutkijana, niin muuttujien valinnassa, kuin menetelmällisissä ratkaisuisissa. Maanvyörymäalttiuteen vaikuttaa suuri määrä erilaisia tekijöitä, jotka ovat keskenään monimutkaisessa vuorovaikutuksessa, ja joiden painoarvot vaihtelevat paljon sekä ajallisesti että alueellisesti, mutta myös eri maanvyörymätyyppien mukaan. Kaikkien olennaisten muuttujien huomioon ottaminen edellyttää useiden asiantuntijoiden poikkitieteellistä yhteistyötä, kenttätutkimusta, sekä laaja-alaista alue- ja geologiatuntemusta. Koska tämä työ on rajallinen niin ajallisesti kuin resurssillisestikin, rajasin tutkimuksen neljään valitsemaani keskeisimpään muuttujaan: rinteen jyrkkyys, suuntaus, sademäärä ja ikeroudan aktiivisen kerroksen syvyys. Tämä rajaus oli maanvyörymiin vaikuttavien tekijöiden kannalta kattavin valinta, joka mahdollisti tutkimuksen toteuttamisen annetussa ajassa ja käytettävissä olevilla resursseilla.

Useita olennaisia muuttujia jäi analyysistä väistämättä pois. Esimerkiksi etäisyys jokiuomiin, joka näkyi tuloksissa jo nyt epäsuorasti, olisi ollut tärkeä lisä. Samoin etäisyys tiestöön olisi syventänyt tarkastelua, mikäli tutkimuksessa olisi painotettu suoraan infrastruktuuriin kohdistuvan riskin näkökulmaa. Myös alueen geologiset ominaisuudet, kuten litologian suuntautuneisuus, säteilyolosuhteet, tai historialliset maanvyöryt tulisi sisällyttää maanvyörymäalttiusanalyysiin.

Menetelmällisesti painotettu päällekkäisanalyysi soveltuu hyvin alttiusluokitteluun yleisesti, mutta tarkempien johtopäätösten tekemiseksi se tulisi yhdistää muihin lähestymistapoihin, kuten esiintymissuhdeanalyysiin tai alueellisiin prosessipohjaisiin mallinnuksiin (Arumugam ym. 2023). Lisäksi jokainen muuttuja tuo mukanaan omat epävarmuutensa tähän tutkimukseen. Esimerkiksi aktiivisen kerroksen syvyyden mittauspisteet kattoivat vain Longyeardalenin alueen, eikä lainkaan alueen länsiosia tai minkään rinteen yläosia, joissa roudan syvyys ja maaperän vesipitoisuus voi olla hyvinkin erilainen. Sadanta-aineisto oli laadukasta kolmelta pisteeltä, mutta laajempi alueellinen kattavuus olisi parantanut tulosten tarkkuutta.

Ajallisesti tutkimus antaa tilannekuvan vain yhdeltä päivältä (8.7.2024). Jotta alueen todellinen maanvyörymäalttius voitaisiin arvioida luotettavasti, olisi tarpeen tarkastella pidempää aikaväliä. Merkityksellisiä ja kiinnostavia ajankohtia ovat erityisesti kevään sulamiskausi, rankkasadetapahtumat

ja syksyn maksimaalisen aktiivikerroksen syvyyden aika, sillä näihin aikoihin maaperän kosteus ja veden kylläisyys on korkeimmillaan. Yhden päivän tarkastelu ei siis yksinään riitä kuvaamaan koko vuoden riskidynamiikkaa, mutta tarjoaa mahdollisuuden tarkastella sitä hetkellisen riskin näkökulmasta.

Tuloksia ei voida pitää absoluuttisena totuutena tai suoraan käytännön suunnittelua ohjaavana. On kuitenkin tärkeää todeta, että tutkimus vastaa tutkimuskysymyksiin erityisesti rankkasateiden ja aktiivisen kerroksen syvyyden vaikutuksista maanvyöryälytteen riittäväällä tarkkuudella. Kun tuloksia tarkastellaan kriittisesti ja yhdessä aiemman tutkimuskirjallisuuden kanssa, ne tarjoavat hyödyllistä tietoa alueellisten riskiluokkien jakautumisesta.

6.5 Jatkotutkimuksen tarpeet ja haasteet

Kuten tässä työssä on käynyt ilmi, jatkotutkimus arktisten alueiden maanvyörymäällytyksestä on sekä tarpeellista että ajankohtaista. Aiheet herättävät kasvavaa kiinnostusta kansainvälisesti, ja Huippuvuorten kaltaisilla alueilla tehdään jo runsaasti tutkimusta ilmastonmuutoksen vaikutuksista maaperän vakauteen (Łuszczuk ym. 2020; Schuler ym. 2020). Tässä työssä tarkastelin erityisesti paikallisella tasolla aktiivisen kerroksen syvyyden ja sadannan yhteyttä maanvyörymäällytteen onnistuneesti. Kuitenkin monia keskeisiä kysymyksiä jäi vielä avoimeksi. Esimerkiksi geologisten ominaisuuksien, jokiuomien ja infrarakenteiden tarkemman sijainnin sekä useiden muiden tekijöiden sisällyttäminen syventäisi ymmärrystä maanvyörymäällytyksestä alueella. Myös pitkän aikavälin aineistojen hyödyntäminen, kuten vuodenaikaisvaihteluiden ja toistuvien sään ääri-ilmiöiden tarkastelu, olisi tärkeää tulevaisuuden tutkimuksissa. Näin voidaan parantaa ymmärrystä siitä, miten riskialueet muuttuvat ajan myötä ja millaisia toistuvuuksia maanvyöryissä voidaan havaita.

Arktisen alueen tutkimushaasteet ovat edelleen merkittäviä. Maaperän ja ilmaston prosessit ovat voimakkaasti muuttuvia ja vaikeasti ennustettavia, mikä vaikeuttaa mallien tarkkuutta ja luotettavuutta (Pithan & Mauritsen, 2014; Łuszczuk et al., 2020). Datan saatavuus on rajallista, maastotyöt ovat logistisesti haastavia ja mittausresurssit usein vähäisiä (Overduin et al., 2019). Teknologian kehitys, kuten satelliittikuvantaminen ja paikkatietomallinnus, tarjoaa kuitenkin jatkuvasti uusia mahdollisuuksia näiden haasteiden ratkaisemiseen. Arktisen maaperän dynaaminen käyttäytyminen, erityisesti ikiroudan sulaminen ja sen vaikutukset maaperän vakauteen, vaatii jatkuvaa tutkimusta ja mallien päivittämistä (Wang et al., 2017; Schuler et al., 2020). Riskienhallintatyö on prosessi, joka ei pääty, vaan kehittyy jatkuvasti uusien havaintojen ja menetelmien myötä.

7 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa arvioin Longyearbyenin kylän maanvyörymäalittiutta yhdistämällä neljä keskeistä muuttujaa painotetulla päällekkäisyysanalyysillä. Tulokset osoittavat, että suurin osa infrastruktuurista ja rakennuksista sijaitsee matalan riskin alueilla, erityisesti luokituksissa 1 ja 2, mutta tietyt alueet, erityisesti Longyeardalenin eteläosat ja yksittäiset jyrkänteiden alapuoliset kohdat, ovat alttiimpia maanvyöryille.

Aktiivisen kerroksen syvyys osoittautui merkittäväksi indikaattoriksi maaperän vakaudelle. Matalampi aktiivinen kerros esimerkiksi varjoisilla rinteillä, liittyi alempiin riskiluokituksiin. Yhden päivän tarkastelu tarjosi mahdollisuuden tarkastella hetkellistä riskiä rankkasadetapahtuman yhteydessä, mutta se ei riitä kattavan vuosittaisen maanvyörymäalittiuden arviointiin. Jotta maanvyöryjen toistuvuutta ja kehittymistä ymmärrettäisiin paremmin, olisi tarpeen tarkastella pitkän aikavälin dataa, sekä käyttää kattavampia aineistokokonaisuuksia. Olemassa olevan kirjallisuuden perusteella voidaan päätellä, että ilmastonmuutoksella on tulevaisuudessa merkittävä vaikutus Longyearbyenin alueen maanvyörymäalittiuteen. Keskilämpötilan nousun, ikeroudan sulamisen ja sademäärien kasvun yhteisvaikutus muuttaa maaperän vakautta heikentävään suuntaan. Tämä edellyttää ennakoivaa otetta riskinarviointiin sekä jatkuvaa seurantaa ja päivityksiä alueen maanvyörymäalittiuden kartoituksiin, jotta yhteiskunta voi varautua tehokkaasti muuttuviin olosuhteisiin.

Työn suurimmat epävarmuustekijät liittyvät subjektiivisiin valintoihin muuttujien valinnassa ja niiden painottamisessa. Tärkeitä maanvyörymäalittiuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi geologisia ominaisuuksia, jokiuomien läheisyyttä tai ihmistoiminnan vaikutuksia ei sisällytetty analyysiin. Kuitenkin valitut muuttujat edustavat niitä tekijöitä, jotka olivat parhaiten saatavilla ja analysoitavissa rajatuin resurssein.

Tutkimus ei anna absoluuttisia vastauksia, mutta se täyttää tarkoituksensa tuottamalla paikkatietoon perustuvan alustavan arvion alueellisesta maanvyörymäalittiudesta. Se vastaa tutkimuskysymyksiin ja antaa perustan jatkotutkimukselle. Samantyyppisten tutkimusten tuloksia voidaan hyödyntää suunnittelun tukena ja riskienhallinnan lähtökohtana erityisesti Longyearbyenin kaltaisilla ilmasto-olosuhteille herkillä alueilla. Maanvyöryjen ennakoinnin kehittäminen arktisilla alueilla vaatii yhä enemmän monialaista yhteistyötä ja tarkempia ja kattavampia havaintoaineistoja.

Kiitokset

Ensimmäisenä haluan kiittää ohjaajani Harri Tolvasta erinomaisesta ja tukevasta ohjaajan työstä, sekä selvästä aikataulutuksesta työn loppuun saattamisen takaamiseksi. Työryhmämme rento henki toimi tukena työskentelylle koko tutkimuksen ajan.

I would like to thank Professor Marius Jonassen from the University Centre in Svalbard (UNIS) for his encouragement, support, and valuable discussions during the process of choosing the topic for this research. I am also grateful to him for the excellent meteorology course, which sparked my interest in Arctic regions and in permafrost research.

I would also like to thank another UNIS professor, Ragnheid Skogseth, for the inspiring oceanography course and for her support in deepening my understanding and interest in the Arctic region.

Haluan esittää sydämelliset kiitokset kahdeksanhenkiselle ystäväporukalleni kannustuksesta ja vertaistuesta. Läsnäolonne teki prosessista kevyemmän ja merkityksellisemmän. Erityiskiitos poikaystävälleni kärsivällisyydestä, ymmärryksestä ja vankkumattomasta tuesta työn viimeistelyvaiheessa.

Kirjallisuus

- Arghiuş, V.-I., Arghiuş, C., Ozunu, A., Nour, E., Roşian, G. & Muntean, L.-O. (2011) The relation between the landslide activity and irregular rainfall and snowmelt in the Codrului Hills, Romania. *Environmental Engineering and Management Journal* 10(1) 3–6. <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>
- Arumugam, T., Kinattinkara, S., Velusamy, S., Shanmugamoorthy, M. & Murugan, S. (2023) GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using weighted overlay method in Wayanad: A part of Western Ghats, Kerala. *Urban Climate* 49. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101508>
- Awawdeh, M.M., ElMughrabi, M.A. & Atallah, M.Y. (2018) Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from North Jordan. *Environmental Earth Sciences* 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7910-8>
- Baharin, A. B., Mirnazari, J., Baharin, A., Mojaradi, B., Barat, Sattari, S. & Sattari, F. (2014) Using frequency ratio method for spatial landslide prediction. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 7(15) 3174–3180. <https://doi.org/10.19026/rjaset.7.658>
- Basharat, M., Shah, H.R. & Hameed, N. (2016) Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences* 9. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2308-y>
- Borgatti, L. & Soldati, M. (2010) Landslides as a geomorphological proxy for climate change: A record from the Dolomites (northern Italy). *Geomorphology* 120(1–2) 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.015>
- Bui, D. T., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B. & Revhaug, I. (2016) Spatial prediction models for shallow landslide hazards: A comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides* 13(2) 361–378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>
- Chen, W., Chai, H., Sun, X., Wang, Q., Ding, X. & Hong, H. (2016) A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. *Arabian Journal of Geosciences* 9(204). <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2150-7>
- Ciorescu, M. B. (2023) Slope stability assessment of Longyeardalen, Svalbard. Pro gradu - tutkielma. NTNU & DTU, Cold Climate Engineering Programme.

- Costanzo, D., Rotigliano, E., Irigaray, C., Jimenez-Perálvarez, J. D. & Chacón, J. (2012) Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the GIS matrix method: Application to the River Beiro basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12 327–340. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-327-2012>
- Cruden, D. M. (1991) A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 43(1). <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Davy, R. & Griewank, P. (2023) Arctic Amplification has already peaked. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace273>
- Dobinski, W. (2011) Permafrost. *Earth-Science Reviews* 108(1–2) 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.007>
- Elvevold, S., Dallmann, W. K. & Blomeier, D. (2007) *Geology of Svalbard*. Norwegian Polar Institute.
- Førland, E. J., Benestad, R., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J. E. & Engen Skaugen, T. (2011) Temperature and Precipitation Development at Svalbard 1900–2100. *Advances in Meteorology* 2011, 893790. <https://doi.org/10.1155/2011/893790>
- French, H. M. (2018) *The Periglacial Environment* (4th ed.). Wiley Blackwell.
- Gariano, S. L. & Guzzetti, F. (2016) Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews* 162 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Harris, S. A., French, H. M., Heginbottom, J. A., Johnston, G. H., Ladanyi, B., Sege, D. C. & van Everdingen, R. O. (1988) *Glossary of permafrost and related ground-ice terms* (Technical Memorandum No. 142) National Research Council of Canada.
- Hinzman, L. D., Kande, D. L., Gieck, R. E. & Everett, K. R. (1991) Hydrologic and thermal properties of the active layer in the Alaskan Arctic. *Cold Regions and Technology* 19 95–110.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11(2) 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- IPCC. (2018) *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R. & Chacón, J. (2007) Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: Examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards* 41(1) 61–79. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9027-8>

- Johannessen, S., Hancock, H., Wickström, S., & Albrechtsen, E. (2024) Risk governance of climate-related hazards in Longyearbyen, Svalbard: A review of risk governance approaches and knowledge gaps. *Climate Risk Management*, 43 100585. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100585>
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019) Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 22(1) 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>
- Khatun, M., Hossain, A.T.M.S., Sayem, H.M. ym. (2023) Landslide susceptibility mapping using weighted-overlay approach in Rangamati, Bangladesh. *Earth Systems and Environment* 7 223–235. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00312-2>
- Lee, K. T. & Ho, J. Y. (2009) Prediction of landslide occurrence based on slope-instability analysis and hydrological model simulation. *Journal of Hydrology* 375(3–4) 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.053>
- Liestøl, O. (1977) *Pingos, springs, and permafrost in Spitsbergen*. Norsk Polarinstitut Skrifter 141. Norsk Polarinstitut, Oslo, Norway.
- Ma, W., Niu, F., Akagawa, S. & Jin, D. (2006) Slope instability phenomena in permafrost regions of Qinghai–Tibet Plateau, China. *Landslides* 3(4) 260–264. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0045-0>
- Maturilli, M., Herber, A., & König-Langlo, G. (2015) Surface radiation climatology for Ny-Ålesund, Svalbard (78.9° N): Basic observations for trend detection. *Theoretical and Applied Climatology* 120(1) 331–339. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1173-4>
- Meyer, H. (2023) Physical and feasible climate change adaptation in Longyearbyen, Svalbard. *Arctic Review on Law and Politics* 14 44–65. <https://doi.org/10.1017/S0032247422000079>
- Nuth, C., Kohler, J., König, M., von Deschwanen, A., Hagen, J. O., Käab, A., Moholdt, G. & Pettersson, R. (2013) Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere* 7(5) 1603–1621. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1603-2013>
- Orlowsky, B. & Seneviratne, S.I. (2012) Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change* 110 669–696. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>
- Overduin, P. P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M. N., Ruppel, C., Vasiliev, A., Lantuit, H., Juhls, B., & Westermann, S. (2019) Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). *Journal of*

- Geophysical Research: Oceans* 124(6) 3490–3507.
<https://doi.org/10.1029/2018JC014675>
- Overland, J., Dunlea, E., Box, J. E., Corell, R., Forsius, M., Kattsov, V., Olsen, M. S., Pawlak, J., Reiersen, L.-O. & Wang, M. (2019) The urgency of Arctic change. *Polar Science* 21 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.008>
- Patton, A. I., Rathburn, S. L. & Capps, D. M. (2019) Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology* 340 116–128.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029>
- Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2022) Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal* 13(1) 101626. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Pelt, W.J.J. van, Pohjola, V.A., Pettersson, R., Marchenko, S., Kohler, J., Luks, B., Hagen, J.O. & Schuler, T.V. (2016) Multidecadal climate and seasonal snow conditions in Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121(11) 2100–2117.
- Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014) Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience* 7(3) 181–184.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2071>
- Ran, Q., Hong, Y., Li, W. & Gao, J. (2018) A modelling study of rainfall-induced shallow landslide mechanisms under different rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, 563 790–801. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.040>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. ym. (2022) The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment* 3 168.
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Rubensdotter, L. (2022) Geomorphological and geological characteristics of Longyeardalen, Svalbard.
- Schuler, T. V., Kohler, J., Elagina, N., Hagen, J. O. M., Hodson, A. J., Jania, J. A., Kääb, A. M., Luks, B., Małeckı, J., Moholdt, G., Pohjola, V. A., Sobota, I., & Van Pelt, W. J. J. (2020) Reconciling Svalbard Glacier Mass Balance. *Frontiers in Earth Science* 8 156.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00156>
- Serreze, M.C., Barrett, A.P., Stroeve, J.C., Kindig, D.N. & Holland, M.M. (2015). The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 9, 1617–1632.
- Shit, P.K., Bhunia, G.S. & Maiti, R. (2016) Potential landslide susceptibility mapping using weighted overlay model (WOM). *Modeling Earth Systems and Environment* 2 21.
<https://doi.org/10.1007/s40808-016-0078-x>

- Svennevig, K., Keiding, M., Korsgaard, N. J., Lucas, A., Owen, M., Poulsen, M. D., Priebe, J., Sørensen, E. V. & Morino, C. (2023) Uncovering a 70-year-old permafrost degradation induced disaster in the Arctic, the 1952 Niiortuut landslide-tsunami in central West Greenland. *Science of The Total Environment* 859(1) 160110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160110>
- Swanson, D. K. (2021) Permafrost thaw-related slope failures in Alaska's Arctic National Parks, c. 1980–2019. *Permafrost and Periglacial Processes* 32(1) 3–16. <https://doi.org/10.1002/ppp.2098>
- Wang, T., Krøgli, I., Boje, S., & Colleuille, H. (2017) Monitoring and forecasting local landslide hazard in the area of Longyearbyen, Svalbard – Early progress and experiences from the Autumn 2016 events. Poster presented at EGU General Assembly 2017, Geophysical Research Abstracts 19 EGU2017-18911. <https://www.researchgate.net/publication/338396272>
- Wang, Q. & Li, W. (2017) A GIS-based comparative evaluation of analytical hierarchy process and frequency ratio models for landslide susceptibility mapping. *Physical Geography* 38(4) 318–337. <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1294522>
- Wang, X., Wang, Z., Deng, X., Sun, B., Zhao, Y., & Fu, W. (2017) Coupled thermal model of wellbore and permafrost in Arctic regions. *Applied Thermal Engineering* 123 1291–1299. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.186>
- Yan, C. & Gong, D. (2024) Assessing framework of rainfall-induced landslide hazard considering spatiotemporal asymmetry in extreme precipitation indices under climate change. *Theoretical and Applied Climatology* 155 7961–7975. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05106-2>