

Iida Koivistoinen

**ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUS
LUISKIEN STABILITEETTIIN**
Case Kaarilankulma

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kesäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

Iida Koivistoinen: Ilmastonmuutoksen vaikutus luiskien stabiliteettiin
The impact of climate change on slope stability
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Kesäkuu 2022

Ilmastonmuutos on aikamme suurimpia ympäristöllisiä haasteita. Rakennetun ympäristön suunniteltu kestoikä on keskimäärin sata vuotta, jolloin nykypäivän alati muuttuva ilmasto asettaa osaltaan haasteita tulevaisuuden tarpeiden hahmottamiselle. Tässä työssä tutkitaan ilmastonmuutoksen vaikutusta luiskien stabiliteettiin. Työn tavoitteena on selvittää, millä tavoin ilmasto- ja ympäristöolosuhteissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat pohjaolosuhteisiin ja stabiliteettia määritteleviin tekijöihin. Lisäksi työssä tarkastellaan ilmastollisten ja ympäristöllisten muutosten vaikutusta case-kohde As Oy Kaarilankulman pengerialueen sortuman syntyyn.

Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena käyttäen lähteinä kirjallisuutta, tutkimusraportteja, artikkeleja sekä tilastotietoja. Työssä esitellään ilmastonmuutoksesta aiheutuvat keskeiset muutokset ilmasto-olosuhteissa sekä ympäristössä. Suomen osalta muutosten havaittiin liittyvän olennaisesti keskilämpötilan kohoamiseen sekä hydrologiaan. Näiden muutosten vaikutuksia pohjaolosuhteisiin sekä maan lujuuteen tutkittiin kirjallisuuslähteitä hyödyntämällä. Havaittuja seurauksia pyrittiin havainnollistamaan case-kohteen sortumatapauksen avulla.

Tutkimus osoittaa ilmastonmuutoksen vaikuttavan alentavasti luiskien stabiliteettiin. Ennustettu vedenmäärän lisääntyminen maaperässä heikentää lujuutta huokosvedenpaineen lisääntymisen johdosta etenkin huonosti vettäläpäisevillä mailla. Vedenmäärän lisääntyminen maaperässä poikkeuksellisen leudon talven seurauksena todettiin myös olevan suurin riskitekijä case-kohteen sortuman synnyssä. Lisäksi stabiliteettia heikentävän eroosion riskin todettiin kasvavan valunnan ja virtaaman lisääntyä. Sään ääri-ilmiöt, kuten tulvat, tulee myös ottaa tulevaisuudessa huomioon stabiliteettia heikentävänä tekijänä.

Työn toteutuksessa haasteina havaittiin ilmastonmuutoksen ennustamisen epätarkkuus sekä muutosten vaikuttavuuksien arviointi. Ilmastonmuutoksesta johtuvat ilmiöt ja muutokset ovat hyvin paikallisia, sekä niiden todennäköisyyttä ennustetaan eri skenaarioiden avulla mallintamalla. Tällöin vaikutusten arviointiin sekä soveltamiseen liittyy epätarkkuutta. Kuitenkin epätarkkuudesta huolimatta ilmastollisten sekä ympäristöllisten tekijöiden vaikutus stabiliteettiin on kiistaton.

Avainsanat: ilmastonmuutos, ilmasto, stabiliteetti, luiska, vesi, hydrologia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ILMASTONMUUTOS	3
2.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus Suomessa	4
2.1.1 Ilmaston lämpeneminen	4
2.1.2 Hydrologiset muutokset.....	5
2.2 Suomen ilmastotilastot ja -ennusteet.....	6
3. ILMASTOLLISTEN MUUTOSTEN VAIKUTUS LUISKIEN STABILITEETTIIN	11
3.1 Stabiilitetti ja siihen vaikuttavat tekijät	11
3.2 Muuttuvien ilmasto-olosuhteiden vaikutus	14
3.2.1 Keskilämpötilan nousu	15
3.2.2 Sadannan lisääntyminen.....	16
3.2.3 Hydrologiset muutokset.....	19
4. CASE AS OY KAARILANKULMA.....	21
4.1 Yleistietoa kohteesta	21
4.2 Sortuma	22
4.3 Sortumaa edeltävät muutokset ympäristössä ja ilmastossa.....	24
4.4 Ympäristöllisten sekä ilmastollisten tekijöiden vaikutus sortumaan.....	26
5. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	31

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on yksi aikamme suurimmista ympäristöllisistä haasteista. Sen vaikutukset ovat laajat ja moniulotteiset, ja ne ilmenevät eri tavoin maantieteellisestä sijainnista riippuen. Merkittävimmät ilmastonmuutoksen seuraukset globaalilla tasolla ovat maapallon keskilämpötilan kohoaminen, merenpinnan tason nousu sekä äärimmäisten sääilmiöiden yleistyminen. Suomen kannalta tarkasteltuna suurimmat muutokset ovat sademäärän lisääntyminen sekä keskilämpötilan kohoaminen, mitkä puolestaan aiheuttavat sekä suoraan että välillisesti useita muita ilmastollisia sekä ympäristöllisiä muutoksia. Nämä olosuhteiden muutokset vaikuttavat olennaisesti myös rakennettuun ympäristöön sekä sen vaatimuksiin tulevaisuudessa.

Tampereen Kaarilassa tapahtui pergerluiskan sortuma helmikuussa 2020. Kyseessä oli stabiliteettisortuma, jossa Tuurnankadulla sijaitsevan rivitalon As Oy Kaarilankulman takapihan pengerluiska sortui yön aikana. Sortuma tapahtui liukupintaa pitkin kohti alhaalla sijaitsevaa Vaakkolammia (Länsivaara 2020). Mitä todennäköisimmin sortuma oli monen tekijän summa, mutta yksi merkittävimmistä riskitekijöistä oli poikkeukselliset ilmasto-olosuhteet. Sortumaa edeltävä talvi oli ollut poikkeuksellisen leuto sekä sademäärä runsas. Täysin suoraa linjaa vallinneiden ilmasto-olosuhteiden sekä ilmastonmuutoksen välille ei voida vetää, mutta Kaarilan tapaus on hyvä esimerkki siitä, millä tavoin ilmastolliset muutokset tulevat mahdollisesti tulevaisuudessa vaikuttamaan luiskien stabiliteettiin Suomessa.

Luiskien stabiliteettia on tutkittu laajasti niin lokaalisti kuin globaalistikin, ja kansainvälisellä tasolla ilmastonmuutoksen vaikutuksia stabiliteettiin on jo tutkittu. Suomen osalta verrattaiset tutkimukset ovat keskittyneet tarkastelemaan stabiliteettia lähinnä pohjaolosuhteiden, veden eroosion sekä laskentamenetelmien vaikutuksien kannalta. Olemassa olevia Suomen olosuhteisiin keskittyneitä tutkimuksia, opinnäyte- ja diplomitöitä ovat muun muassa *Kankaan alueen stabiliteetilaskelmat ja laskentaparametrien määrittäminen* (Tikkanen, S. 2012), *Laskentaohjeen esiselvitys, Vantaanjoen ja Keravanjoen stabiliteettitarkastelut* (Hukkanen, H. 2012), *Rantaluiskan vakavuuslaskelmat ja liukusortuman korjausmenetelmät* (Porre, J. 2013). Kansainvälisellä tasolla tutkimuksia löytyy useita niin stabiliteetista kuin ilmastonmuutoksen vaikutuksesta siihen.

Tämän työn tavoite on pyrkiä selvittämään, millä tavoin ilmastonmuutos vaikuttaa Suomen ilmasto-olosuhteisiin ja kuinka kyseiset muutokset vaikuttavat luiskien stabiliteettiin. Ennustettuja muutoksia ja niiden seurauksia pyritään havainnollistamaan case-kohteen,

As Oy Kaarilankulman, avulla. Luvussa 2 tarkastellaan ilmastonmuutosta, sen ennustusta ja vaikutusta erityisesti Suomen tasolla. Kolmannessa luvussa käsitellään stabiiliteettia, siihen vaikuttavia tekijöitä sekä tarkastellaan erityisesti muuttuvan ilmaston myötä tapahtuvien ympäristö- sekä pohjaolosuhteiden muutosten vaikutusta. Luvussa 4 käsitellään case-kohde As Oy Kaarilankulmaa, jonka avulla edellä käsitellyjä ilmastollisia olosuhteita ja niiden stabiiliteettiin vaikuttavia syy-seuraussuhteita pyritään tunnistamaan sekä havainnollistamaan sortumatapauksen avulla. Viimeisessä eli viidennessä luvussa muodostetaan yhteenveto sekä johtopäätelmät työn sisällöstä.

2. ILMASTONMUUTOS

Maapallon ilmasto-olosuhteet ovat muuttuneet ajan kuluessa luonnollisten tekijöiden vaikutuksesta aina jääkausista lämpimämpiin ajanjaksoihin. Merkittävin muutostekijä on ollut luonnollinen kasvihuoneilmiö, eli ilmakehän kyky pidättää lämpöä ilmakehän alimmissa kerroksissa (Saukkonen 2008, s.152). Kuitenkin muutaman vuosisadan aikana ihmisen toiminnalla on ollut merkittävä ulkoinen vaikutus kasvihuoneilmiön voimistumiseen. 1800-luvun jälkeen kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin ja metaanin, pitoisuudet kasvoivat huomattavasti muun muassa väestönkasvun, maatalouden kehittymisen sekä teollistumisen seurauksena. (Ilmatieteen laitos 1996; Nevanlinna 2008)

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) kuudennen arviointiraportin ensimmäisen osaraportin (2021) mukaan kasvihuoneilmiön voimistumisen vuoksi maapallon keskilämpötila on kohonnut 1800-luvun lopulta 2020-luvulle noin 1,1 °C, mikä on maapallon historiassa merkittävä muutos. Ilmaston lämpenemisellä on monia suoria sekä välillisiä vaikutuksia, mitkä näkyvät ympäri maailmaa aina yksilötasolle asti. Vaikutukset vaihtelevat suuresti tarkastelualueesta riippuen, mutta yleisesti voidaan todeta lämpötilan kohoamisen lisäksi vesistöjen lämpenemisen, jäätiköiden sulavan, merenpinnan nousevan sekä sään ääri-ilmiöiden yleistyvän ilmastonmuutoksen vaikutuksesta (IPCC 2021).

Lämpötilan ennustetaan yhä kasvavan, mutta kasvuennuste riippuu käytetystä skenaariosta. Nykyisin käytetyin tieteellinen skenaariomalli on RCP eli *Representative Concentration Pathway*, joka kuvaa kasvihuonekaasujen pitoisuuksien mahdollista kehityskulkua, joka puolestaan tuottaa vuosisadan lopulla tietyn säteilypakotteen. Pakotteen suuruutta kuvaa numero skenaarion perässä. (van Vuuren et al. 2011, s. 7, 12–13) RCP:n lisäksi käytössä on myös SSP eli *Shared Socioeconomic Pathways*, joka puolestaan kuvaa vaihtoehtoisia sosioekonomisia kehityspolkuja väestön, tulojen, teknologian ja kaupungistumisen osalta. Myös skenaariotyyppien yhdistelmiä on alettu käyttää yhä enemmän. (Suomen ympäristökeskus 2020) IPCC:n kuudennen arviointiraportin ensimmäisen osaraportin (2021) mukaan tarkasteluskenaariosta riippuen maapallon keskilämpötilan ennustetaan nousevan nykyisestä noin 1–4 °C (RCP2.6 – RCP8.5) vuosisadan loppuun mennessä.

2.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus Suomessa

Tutkimukset ovat osoittaneet ilmastonmuutoksen olevan voimakkainta pohjoisilla napalualueilla, joilla ilmasto lämpenee jopa kaksi kertaa nopeammin verrattuna koko maapallon keskiarvoon (Nevanlinna 2008). Suomessa keskilämpötila on kohonnut 1800-luvun puolivälin jälkeen jo yli kaksi astetta ja nousuennusteet vuosisadan loppuun ovat 3–7 °C tarkastellusta RCP-skenaariosta riippuen (Ruosteenoja et al. 2016). Nopea muutos näkyy tulevaisuudessa ilmastoluokkien siirtymisenä pohjoista kohti, mikä saattaa puolestaan aiheuttaa pohjoisimpien vyöhykkeiden katoamista tai huomattavaa supistumista. Vyöhykkeiden siirtyminen korreloi lämpimämpiä kesiä, leutoja talvia, sademäärien kasvua sekä ääri-ilmiöiden yleistymistä (Saukkonen 2008; IPCC 2021).

2.1.1 Ilmaston lämpeneminen

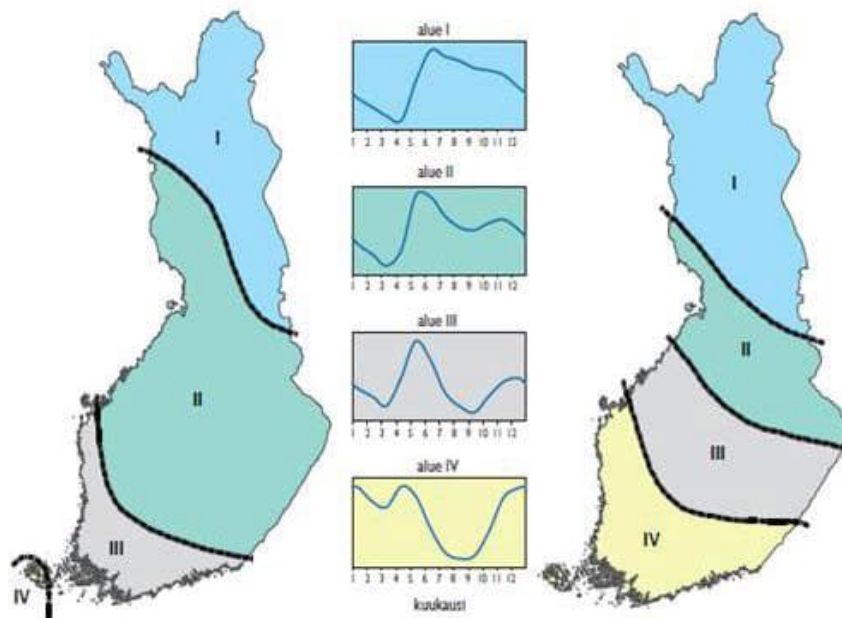
Ilmaston lämpenemisen vuoksi Suomen kesistä ennustetaan entistä lämpimämpiä, mikä käytännössä tarkoittaa hellejaksojen yleistymistä sekä pidentymistä. Pidentyneet hellejaksot saattavat aiheuttaa hetkittäistä kuivuutta, mutta toisaalta sademäärät tulevat nousemaan myös kesäisin. (Saukkonen 2008) Selkeimmin ilmaston lämpenemisen vaikutukset tulevat näkymään talvisin, sillä keskilämpötilan nousu on talvella kesää voimakkaampaa (Ruosteenoja et al. 2016, s. 28). Kohoava lämpötila aiheuttaa leutojen, lumettomien sekä sateisten talvien yleistymistä. Lisääntyvä sademäärä ei kuitenkaan korreloi suoraa lumimäärän kanssa, sillä sateet satavat lämpenemisen johdosta pääosin vetenä. Tämä näkyy jo etelässä lumettomuutena sekä keskiosissa ohentuneena lumipeitteenä. Kuitenkin pohjoisosissa alemman keskilämpötilan vuoksi lumimäärät saattavat puolestaan paikoin jopa alussa nousta. (Saukkonen 2008; Ruosteenoja et al. 2016)

Myöskin routivuudessa ennustetaan tapahtuvan tulevaisuudessa selkeitä muutoksia ilmaston lämmitessä. Saukkosen (2008) mukaan routajakson pituus lyhenee koko maassa, mutta esimerkiksi Etelä-Suomessa tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan routasyvyyden todeta kasvaneen lumettomuuden vuoksi. Kuitenkin pitkällä aikavälillä tarkasteltuna ilmaston lämpenemisestä johtuen roudan syvyys tulee keskimäärin väheneään noin puoleen koko Suomessa: vuosisadan lopulla vähenemän arvo vaihtelisi Lapin 30–40 prosentista lounaisaariiston 100 prosenttiin (Ala-Outinen et al. 2004, s. 24 [Venäläinen et al. 2000]; Gregow et al. 2011, s. 27).

2.1.2 Hydrologiset muutokset

Kohoavien keskilämpötilojen ja sademäärien lisääntymisen myötä ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan sekä suoraan että välillisesti myös valuntaan, vesistöjen virtaamaan ja kiertokulkuun. Esimerkiksi kesäisin sadepäivien määrän ei ennusteta lisääntyvän, mikä tarkoittaakin rankkasateiden yleistymistä lisääntyvien sademäärien myötä. (Saukkonen 2008) Talven lumettomuus sekä vetiset sateet tulevat lisäämään etenkin eteläosissa tulvariskiä. Vähälumiset talvet toisaalta vähentävät kevättulvien riskiä Pohjois-Suomea lukuun ottamatta (Korhonen 2007, s. 27). Tulvien lisäksi muita Suomessa ennustettavia ääri-ilmiöitä ovat kuivuuden lisääntyminen, voimakkaat tuulet sekä myrskyt (Saukkonen 2008). Muutokset saattavat heijastua pitkällä aikavälillä pinta- sekä pohjavesien pinnantasonvaihteluna sekä kiertokulun muutoksina. Varsinkin pienillä pohjavesialueilla vaikutukset tulevat näkymään suuria alueita nopeammin. (Silfverberg 2017; Orvomaa 2020).

Suomessa pohjavedet on jaoteltu käyttäytymisen ja muodostumisen perusteella neljään vyöhykkeeseen eli regiimiin. Regiimien havaittua siirtymistä vuodesta 1985 vuoteen 2003 sekä niiden pinnankorkeuden vuodenaikaisvaihtelua on havainnollistettu kuvassa 1. Ilmastonmuutoksen myötä regiimien ennustetaan siirtyvän edelleen kohti pohjoista kiertokulussa tapahtuvien muutosten seurauksena. (Ympäristöhallinto 2019)



Kuva 1. Pohjavesivyöhykkeiden kehittyminen vuodesta 1985 (vasen) vuoteen 2003 (oikea) sekä niiden pinnankorkeuden vuodenaikaisvaihtelut vyöhykkeittäin (Ympäristöhallinto 2019 [SYKE]).

Pohjavesien pintojen ennustetaan siis keskimääräisesti nousevan talvella ja alkukevällä, ja laskevan etenkin loppukesällä ja syksyllä. Kevään aikaistuessa sulamisvesien pohjavesivarastoja täydentävä vaikutus vähenee. Myöskin kesäkauden sekä sen kuivusjaksojen pidentyminen, haihdunnan määrän lisääntyminen sekä kasvukauden pidentyminen vaikuttavat pohjaveden pinnankorkeuksiin alentavasti. Pidemmät ja sateisemmän syysjaksot hidastavat routimista, mikä edesauttaa pohjavesivarastojen täydentymistä pitempään. Lisäksi talvikauden lyhentyminen sekä sen aikana toistuvat lumen sulamisjaksot lisäävät pohjavesivarastojen täydentymistä. (Ympäristöhallinto 2019; Orvoma 2020)

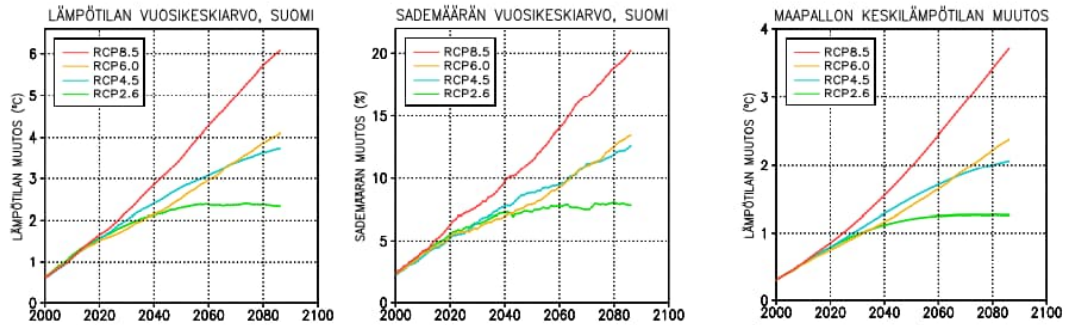
Pintavesien osalta vaikutuksia pinnantasoihin, virtaamaan ja valuntaan on hankala ennustaa muutosten paikallisuuden ja yhteisvaikutusten takia. Kuitenkin suurten keskusjärvien, kuten Saimaan, Päijänteen ja Näsijärven pinnankorkeuksien oletetaan nousevan talvella nykyistä korkeammalle. (Korhonen 2007, s. 27) Kesäkauden pidentyminen saattaa taasen lisätä pinnantasoa alentavaa haihduntaa, mutta toisaalta sateiden lisääntyminen voi paikallisesti nostattaa pinnantasoa. Tulvien osalta vähenevät lumimäärät vähentävät kevättulvien riskiä varsinkin Etelä- ja Keski-Suomessa lähes 50 %, mutta toisaalta lähitulevaisuuden lumiset talvet kasvattavat tulvariskiä Pohjois-Suomessa jopa 20 %. Kesän ja syksyn osalta tulvariskien arviointi on hankalaa, mutta sadetulvien arvioidaan yleistyvän varsinkin pienissä vesistöissä ympärivuotisesti. (Korhonen 2007, s. 27)

Suomen ympäristökeskuksen toteuttamassa WaterAdapt-hankkeen loppuraportissa (2012) todetaan valunnan muutosten olevan maltillisempia kasvaviin sademääriin nähden lisääntyvän haihdunnan vuoksi. Valunnan keskimääräinen kasvuennuste vuosisadan loppupuolelle on mediaanillisesti 7 %, mutta muutokset ovat kuitenkin paikallisia, jolloin valunnan määrä voi paikoin olla runsaampi tai jopa vähentyä. (Veijalainen et al. 2012, s. 24) Kuitenkin suhteellisesti valunta ja virtaamat kasvavat talvella koko Suomessa. Kesävaluntojen ja -virtaamien ennustaminen on haastavaa lisääntyvän haihdunnan, mutta myös rankkasateiden yleistymisen myötä. Maltillisilla ilmastoskenaarioilla kesävaluntojen ja -virtaamien oletetaan paikoin jopa vähenevän. (Korhonen 2007, s. 27; Veijalainen et al. 2012, s. 24)

2.2 Suomen ilmastotilastot ja -ennusteet

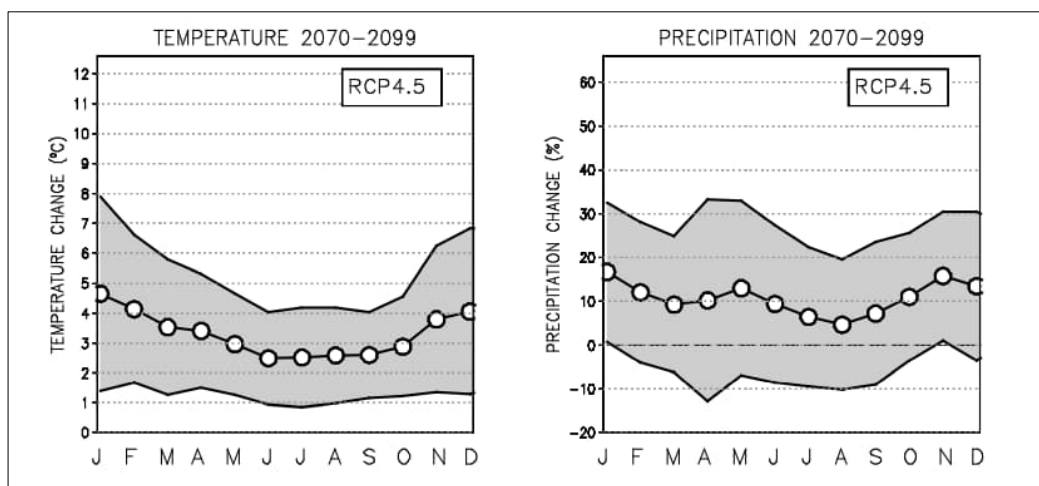
Ilmasto on muuttunut maapallon historian aikana useasti luonnollisten syiden seurauksena. Tällöin muutokset ovat tapahtuneet hitaasti verrattuna nykyiseen ulkoiseen, ihmisen toiminnan aiheuttamaan ilmastomuutokseen: teollistumisen jälkeinen ilmaston nopea lämpeneminen on tapahtunut muutamassa vuosisadassa. Tulevaisuuden ennusteet

muutosnopeudelle perustuvat edellä mainittuihin päästöskenaarioihin. IPCC:n kuudennen arvioreportin ensimmäisen osareportin (2021) mukaan Pohjois-Euroopassa saavutetaan 2 °C lämpötilan nousun raja mahdollisesti jo 2030-luvulla, ja lämpötilan ennustetaan nousevan yli viisi astetta vuosisadan loppuun mennessä SSP5-8,5-skenaarion mukaan.

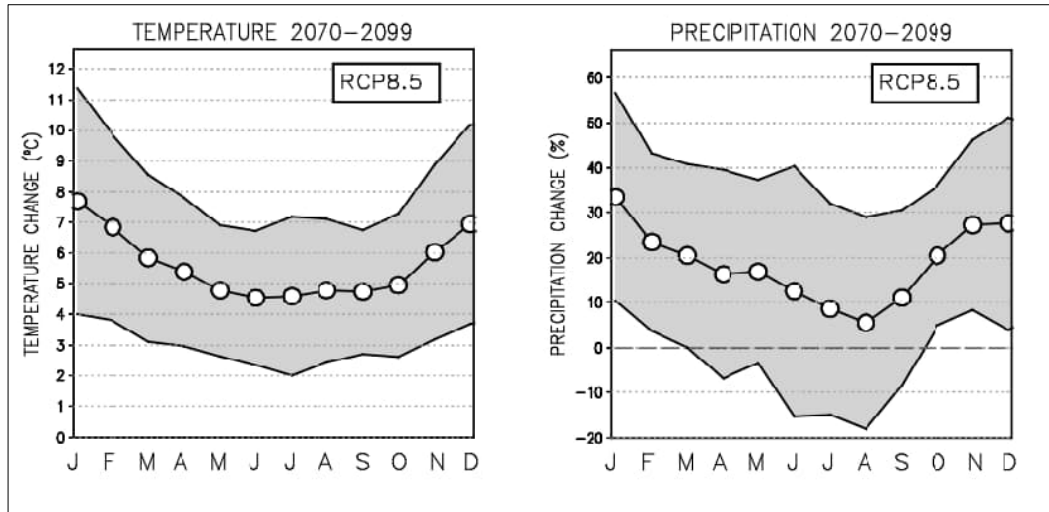


Kuva 2. Suomen keskilämpötilan (°C) ja sademäärän (%) sekä maapallon keskilämpötilan (°C) ennustettu muutos ajanjaksolle 2000–2085 käyttäen vertailujaksona 1971–2000 keskiarvoja sekä 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa neljälle eri RCP-kehityspolulle (Maa- ja metsätalousministeriö 2014, s.11 [Ruosteenoja et al. 2016]).

Kuvassa 2 on esitettyä Suomen keskilämpötilan (vasen kuvaaja) sekä sademäärän (keskimäinen kuvaaja) muutos ajan suhteen eri RCP-skenaarioilla ennustettuna. Lisäksi oikealla on esitetty vertailun vuoksi maailman keskilämpötilan muutos, jonka muutosnopeus on huomattavasti hitaampi Suomeen verrattuna. Ilmasto lämpenee huomattavimmin napa-alueiden läheisyydessä, mikä tarkoittaa Suomen keskilämpötilan nousevan 1,5–2 kertaa nopeammin kuin maapallolla keskimäärin (Ilmasto-opas 2017).



Kuva 3. Keskilämpötilan (°C) (vasen) ja keskimääräisen sademäärän (%) (oikea) muutoksen kuukausittainen vaihtelu RCP4,5-skenaarion mukaan Suomessa jaksolla 2070–2099 vertailujakson ollessa 1971–2000 (Ruosteenoja et al. 2016, s. 27, liite s. 11).



Kuva 4. Keskilämpötilan (°C) (vasen) ja keskimääräisen sademäärän (%) (oikea) muutoksen kuukausittainen vaihtelu RCP8,5 skenaarion mukaan Suomessa jaksolla 2070–2099 vertailujakson ollessa 1971–2000 (Ruosteenoja et al. 2016, s. 27, liite s. 11).

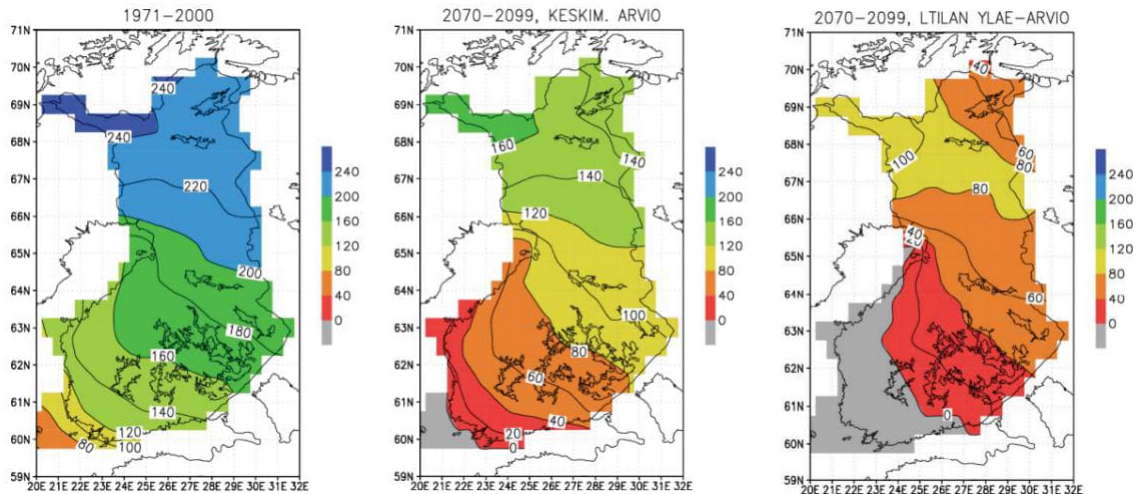
Kuvassa 3 ja 4 on esitetty ennustettuja keskilämpötilan sekä keskimääräisen sademäärän muutoksia vertailujaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099 kuukausitasolla Suomessa. Ennusteet on esitetty käyttäen keskivertopäästöjen RCP4,5-skenaariota (kuva 3) sekä runsaiden päästöjen RCP8,5- skenaariota (kuva 4). Kuvaajien käyrä esittää 28 maailmanlaajuisten ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa ja harmaa alue tuloksista laskettua 90 % todennäköisyysväliä. (Ruosteenoja et al. 2016 s. 27, liite s. 11)

Tuloksista huomataan lämpötilojen muutosten olevan voimakkainta talvikuukausina (lokakuusta helmikuuhun). Lämpötilan muutoksen todennäköisyysväli on myös huomattavasti suurempi talvikuukausina kesäkuukausiin verrattuna varsinkin RCP4,5-skenaariolla mallinnetussa ennusteessa. Suuri todennäköisyysväli johtunee Suomen keskimääräisen lämpötilan suuresta paikallisesta vaihtelusta. Lämpenemisen ennustetaan olevan voimakkainta maan pohjoisosissa, sillä auringonsäteilyn heijastumista avaruuteen edistävää lumi- ja jääpeitteen määrä vähenee. Lisäksi ilmakehään siirtyy napa-alueen merestä enemmän lämpöä ja kosteutta, sillä sen jäätyminen hidastuu. Tämä johtaa myös pilvisyyden lisääntymiseen, mikä puolestaan estää lämpösäteilyn heijastumista avaruuteen. (Ilmasto-opas 2017)

Ruosteenoja et al. (2016 s. 28) tutkimuksen mukaan sademäärien ennustetaan kasvavan ympäri vuoden (oikealla kuvissa 3 ja 4). Huomattavinta muutos on talvella, jolloin RCP8,5-skenaariolla sademäärän ennustetaan kasvavan jopa 30 % vuosisadan loppuun mennessä (oikealla kuvassa 4). Sademäärän muutoksen todennäköisyysväli (kuva 3 ja 4) on kuitenkin suhteellisen suuri, joka liittyy sateen ennustamisen haasteisiin. Sade-

määräjakaumien tarkka sekä keskimääräinen mallintaminen on hankalaa suuren ajallisen ja paikallisen vaihtelun vuoksi (Ilmasto-opas 2017). Kuvien 3 ja 4 sademäärien muutosten todennäköisyysvälien perusteella voidaan kuitenkin todeta sademäärien kasvavan talvisin alueesta riippumatta todennäköisyysvälin ollessa nollan yläpuolella. Kevät- ja kesäkausina tapahtuva haihdunnan lisääntyminen saattaa olla syynä todennäköisyysvälin suureen kokoon, jolloin sateiden paikallisuus sekä intensiteetti vaikuttavat oleellisesti sadannan vaikuttavuuteen määrän ohella. Todennäköisyysvälit havainnollistavat hyvin epävarmuutta, joka liittyy ilmastonmuutoksen mallintamiseen. Suomelle ominainen luonnollisesti vaihteleva ilmasto aiheuttaa myös osaltaan haastetta ennustettavuuteen (Ilmasto-opas 2017).

Ilmatieteen laitoksen selvityksen (Gregow et al. 2011, s. 27) mukaan routakerros ohenee huomattavasti ilmastonmuutoksen seurauksena. Kuva 5 havainnollistaa roudan syvyyden (cm) vähenemistä lumettomilla alueilla eri lämpötilaennusteilla mallinnettuna. Vasemmalla on vertailujakson 1971–2000 suurimmat roudan syvyydet, keskellä ennustejakson 2070–2099 suurimmat syvyydet käyttäen lämpötilannousun mediaaniarvoa sekä oikealla ennustejakson 2070–2099 suurimmat syvyydet käyttäen hyvin nopeaa lämpötilan nousua. (Gregow et al. 2011, s. 28–29)



Kuva 5. Suurimmat roudan syvyydet (cm) vertailukaudella 1971–2000 (vasemmalla) sekä ennustekaudella 2070–2099 käyttäen mallintaessa lämpötilan ennustetun nousunopeuden mediaaniarvoa (keskellä) sekä voimakasta arvoa (oikealla) (Gregow et al. 2011, s. 28–29).

Keskimääräisellä lämpötilannousuennusteella mallintaen roudan syvyyden ennustetaan vähenevän lumettomilla alueilla vertailukaudelle 2070–2099 mennessä lounaisrannikolla jopa 100 %, Keski-Suomessa noin 50 % sekä pohjoisosissa noin 40 % aivan pohjoisinta käsivartta lukuun ottamatta, jossa muutos on noin 30 %. (Gregow et al. 2011, s. 27)

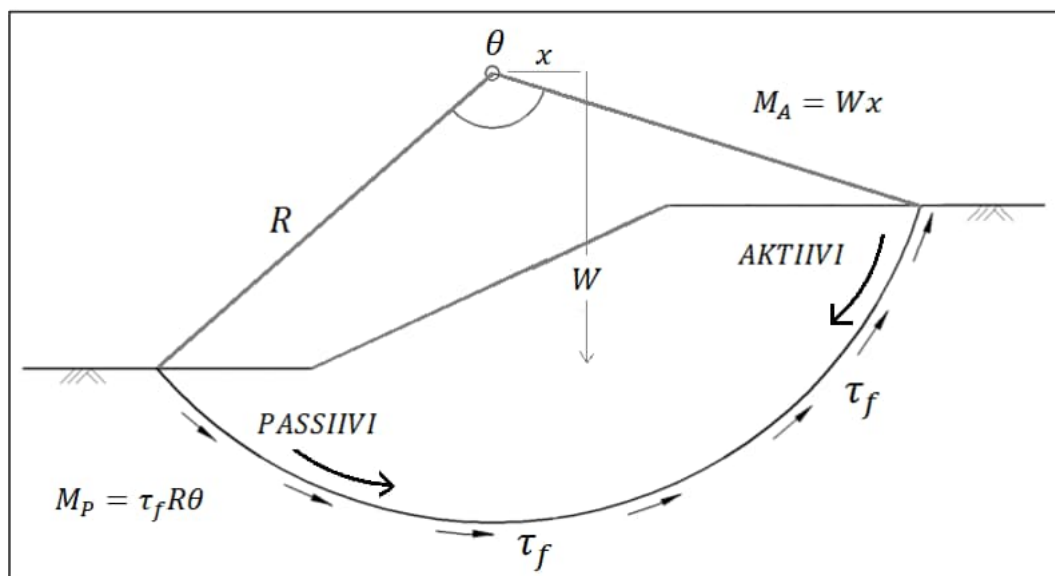
Lämpötilan nousun ollessa hyvin voimakasta, Lounais-Suomen lumettomat alueet olisivat ennustetusti pääosin kokonaan roudattomia. Pohjois-Suomen osalta roudan syvyys vähenisi yli 50 % vertailujakson 1971–2000 syvyyksiin verrattuna. (Gregow et al. 2011, s. 28–29)

3. ILMASTOLLISTEN MUUTOSTEN VAIKUTUS LUISKIEN STABILITEETTIIN

3.1 Stabiliateetti ja siihen vaikuttavat tekijät

Rakennettaessa luonnonluiskille, tai rakennettaessa penkereitä tai leikkausluiskia, maan stabiliateetti eli vakavuus on yksi tärkeimmistä mitoitusvaikuttavista tekijöistä. Stabiliateetilaskelmat perustuvat maapohjan vakavuustarkasteluun, jossa tutkitaan maa-aineksen leikkauslujuuden kapasiteettia suhteessa vallitsevaan leikkausjännitykseen. Mikäli rakenteeseen kohdistuva leikkausjännitys on maa-aineksen leikkauslujuutta suurempi, rakenteen kantokyky pettää eli se saavuttaa murtorajatilan. Tällöin seurauksena on sortuma murtovyöhykettä eli liukupintaa pitkin.

Kuvassa 6 on yksinkertaistettu tilanne, jossa liukupinnalla vaikuttavasta maan leikkauslujuudesta τ_f ja liukupinnan passiivipuolella (kuvassa 6 keskipisteen vasen puoli) olevasta maan painosta syntyvä passiivimomentti (M_P) pyrkii vastustamaan aktiivipuolella (kuvassa 6 keskipisteen oikea puoli) olevasta maan painosta W syntynyttä aktiivimomenttia (M_A). Sortuma siis tapahtuu, kun luiskan yläpuolen aktiivimomentti on alapuolen passiivimomenttia suurempi. (Jääskeläinen 2011, s. 206; Jaakkonen 2013, s.14) Varsinaisessa liukupinta-analysissä luiska jaettaisiin pienempiin tarkasteluosiin, jolloin kuvassa 6 esitetty yksinkertaistettu laskentaidea ei kuvaa todellista stabiliateettitarkastelua.



Kuva 6. Yksinkertaistettu tilanne liukupinnan aktiivi- ja passiivimomentin toiminnasta (muokattu lähteestä Jaakkonen 2013, s.14 & Naderi 2013 figure 3).

Maan leikkauslujuus perustuu maarakeiden välisiin vuorovaikutusvoimiin, jotka pitävät rakeet yhdessä. Näitä koossapitäviä voimia ovat koheesio ja kitka, joiden mukaan leikkauslujuutta voidaankin kuvata niin kutsutulla Coulombin yhtälöllä

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan(\varphi) , \quad (1)$$

jossa τ_f on leikkauslujuus, c koheesio, σ murtopinnalla vallitseva normaalijännitys ja φ kitkakulma (Jääskeläinen 2011, s. 100).

Koheesio muodostuu maarakeiden välisistä kiinnevoimista, hiukkasten välisistä sähköstaattisista voimista sekä huokosvesipartikkelien adheesiosta. Kitkavoima puolestaan riippuu yhtälön 1 mukaisesti jännitystilasta sekä kitkakulmasta. Maalajille ominaiseen kitkakulmaan vaikuttaa raemuoto, -koko sekä maan tiiveys. Kitkakulma on suurimmillaan, kun maa-aines on 100 % tiiviydessään, suhteistunutta sekä sen rakeet ovat mahdollisimman teräväsärmäisiä. Pienimmillään kitkakulma on maa-aineksen ollessa löyhää, mahdollisimman tasarakeista sekä raemuodoltaan pyöristynyttä. (Jääskeläinen 2011, s. 116) Yleisesti ottaen karkearakeisilla maa-aineksilla, kuten soralla ja murskeella, on suurempi kitkakulma kuin hienojakoisilla maalajeilla, kuten savella ja siltillä.

Koska kitkavoima perustuu raepaineeseen, eli maarakeiden väliseen puristusjännitykseen, vaikuttaa siihen olennaisesti maarakeiden välisissä huokosissa esiintyvä mahdollinen vesi. Huokosveden aiheuttama paine huomioidaan tehokkaan jännityksen määrittämisessä kaavan 2 mukaisesti:

$$\sigma' = \sigma - u , \quad (2)$$

jossa leikkauspinnalla vallitsevasta normaalijännityksestä σ vähennetään huokosvedenpaine u , jolloin saadaan leikkauspinnalla vallitseva tehokas jännitys σ' eli raepaine (Jääskeläinen 2011 s. 101). Tehokkaan jännityksen myötä kaava 1 voidaan esittää tehokkailla parametreilla yhtälön 3 mukaisesti

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi') , \quad (3)$$

jolloin leikkauslujuus τ_f määritetään käyttäen tehokkaita jännityksiä σ' vastaavaa tehokasta koheesiota c' sekä tehokasta kitkakulmaa φ' (Länsivaara 2021).

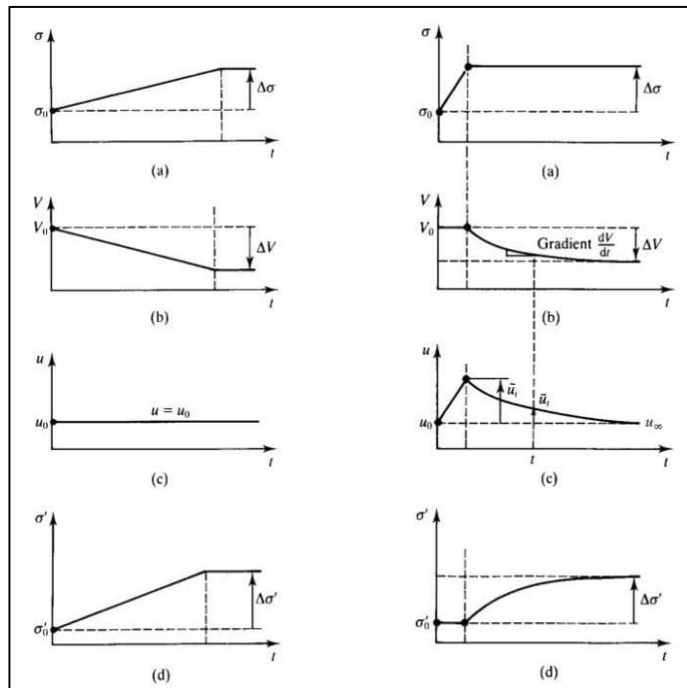
Tehokkaan jännityksen yhteydessä huomioonotettava huokosvedenpaine on usein hankala arvioida hienojakoisille maalajeille, kuten savelle ja hienolle siltille. Usein hienoja-

koisille maalajeille käytetäänkin kokonaisjännitysten menetelmää ($\varphi = 0$). Tällöin puhutaan suljetusta leikkauslujuudesta, eli maakerroksen oletetaan olevan niin vettä pidättävä, ettei huokosvedenpaine pääse tasaantumaan ympäristöönsä. Tällöin leikkauslujuus voidaan esittää muodossa

$$\tau_f = c_u, \quad (4)$$

jolloin leikkauslujuus τ_f riippuu ainoastaan suljetusta leikkauslujuudesta c_u (tai s_u), eli lujuutta pidetään vakiona riippumatta kokonaisjännityksistä. (Duncan et al. 2014, s. 19; Länsivaara 2021) Tällaista menettelyä käytetään usein lyhyen ajan tarkasteluissa hienojakoisille maille.

Kuitenkin maan todellista käyttäytymistä kuvaa avoimen tilan menetelmä, jossa pitkän ajan saatossa maakerroksessa tapahtuvat huokosvedenpaineen muutokset pääsevät tasaantumaan ympäristöön. Avointa tilaa kuvataan aina tehokkailla lujuusparametreilla (kaava 3). Tehokkaiden parametrien menetelmää käytetäänkin karkeille maille, kuten hiekalle ja soralle, sekä pitkän ajan tarkastelussa hienojakoisille maille. (Länsivaara 2021) Tehokkaiden parametrien laskentamenetelmä edellyttää kuitenkin huokosvedenpaineen suuruuden tuntemista, jotta tehokkaita parametreja voidaan käyttää suljetun tilan mallintamiseen. Kuvassa 7 on havainnollistettu avoimen ja suljetun tilanteen olosuhteiden kehittymistä kuormituksen alla ajan saatossa.



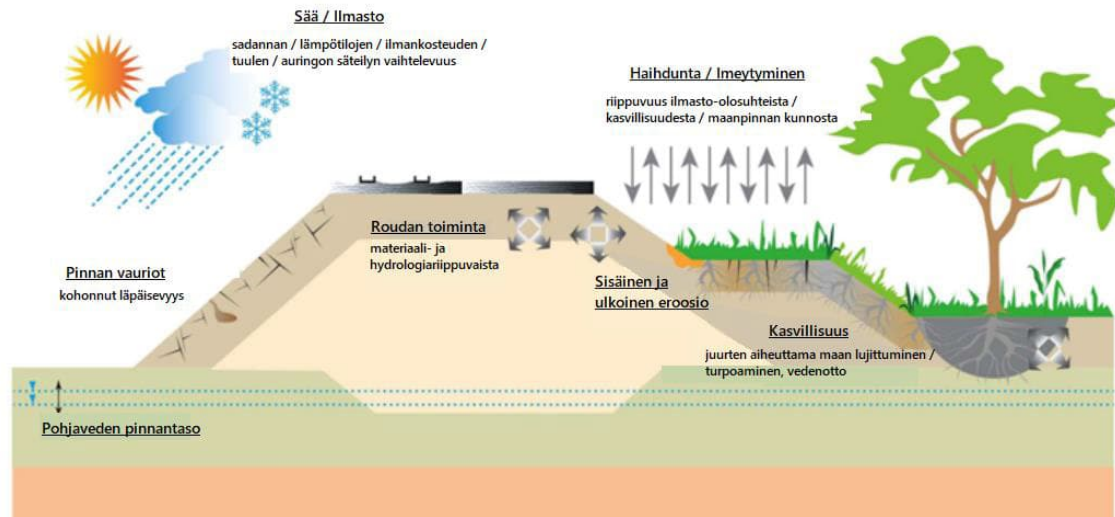
Kuva 7. Avoimen ja suljetun tilan olosuhteiden kehitys kuormituksen alla ajan saatossa. Oikealla avoin ja vasemmalla suljettu tila. (Länsivaara 2021 [Atkins 2007])

Avoimen tilan olosuhteissa kuormitus σ , tilavuudenmuutos V , tehokkaat jännitykset σ' sekä huokosvedenpaine u kehittyvät kuvan 7 mukaisesti ajan myötä maarakeiden tiiviydessä. Huokosvedenpaine pysyy vakiona kuormituksesta huolimatta hyvän läpäisevyyden myötä. Suljetun tilan olosuhteissa kuormituksen seurauksena huokosvedenpaine nousee voimakkaasti. Kuitenkin ajan saatossa huokosveden ylipaine tasaantuu avoimen tilan tavoin, ja maa tiivistyy konsolidaatiopainuman seurauksena ja maa lujittuu. (Jaakkonen 2013)

Huokosvedenpaine voi myös olla negatiivista. Maa-aineksen ollessa vain osittain kyllästynyttä, sen huokosissa on vettä lisäksi myös kaasua. Kaasukuplien ympärillä oleva veden pintajännitys aiheuttaa supistavan voiman, jolloin huokostilassa oleva vesi alipaineistuu pyrkiessään levittäytymään maarakeen pintaa pitkin. Alipaineen synnyttämä vetovoima, negatiivinen huokosvedenpaine, sitoo maarakeet toisiinsa, jolloin maa-aineksellemme kehittyy lujuttua. Tällaista täysin veden adheesioon perustuvaa lujuuden muodostumista kutsutaan näennäiseksi koheesioksi. Negatiivisen huokospaineen muodostama lujuus on siis riippuvainen maa-aineksen optimaalisesta vesipitoisuudesta, jolloin vaikutus häviää esimerkiksi kokonaan vedellä kyllästymisen tai haihtumisen seurauksena. (Hultén et al. 2005, s. 12; Jääskeläinen 2011, s. 59)

3.2 Muuttuvien ilmasto-olosuhteiden vaikutus

Murtorajatila siis saavutetaan, mikäli maan leikkauslujuus heikkenee tai leikkausjännitys kasvaa. Edellä kuvatun mukaisesti maa-aineksen koostumus, rakenne, läpäisevyys, tiiviyys sekä vesipitoisuus vaikuttavat olennaisesti sen leikkauslujuuteen sekä käyttäytymiseen. Ominaisuudet ovat siis osittain hyvin sidonnaisia ympäristöolosuhteisiin, jolloin muutokset ilmastossa sekä ympäristössä voivat olla hyvinkin kriittisiä stabiliteetin kannalta. Kuvassa 8 on havainnollistettu ympäristöllisiä tekijöitä sekä niiden välisiä yhteyksiä.



Kuva 8. Havainnollistus maaperän, ilmasto-olosuhteiden ja kasvillisuuden välisestä vaikutuksesta (muokattu lähteestä Tang et al. 2018 s. 157).

Ilmastolliset muutokset, kuten ilmaston lämpeneminen, sademäärien kasvu sekä ääri-ilmiöiden yleistyminen vaikuttavat niin suoraan kuin välillisestikin maaperän pohjaolosuhteisiin. Monet muutoksista ovat havaittavissa välittömästi, kun taas osa kehittyy ja ilmenee vasta ajan saatossa.

3.2.1 Keskilämpötilan nousu

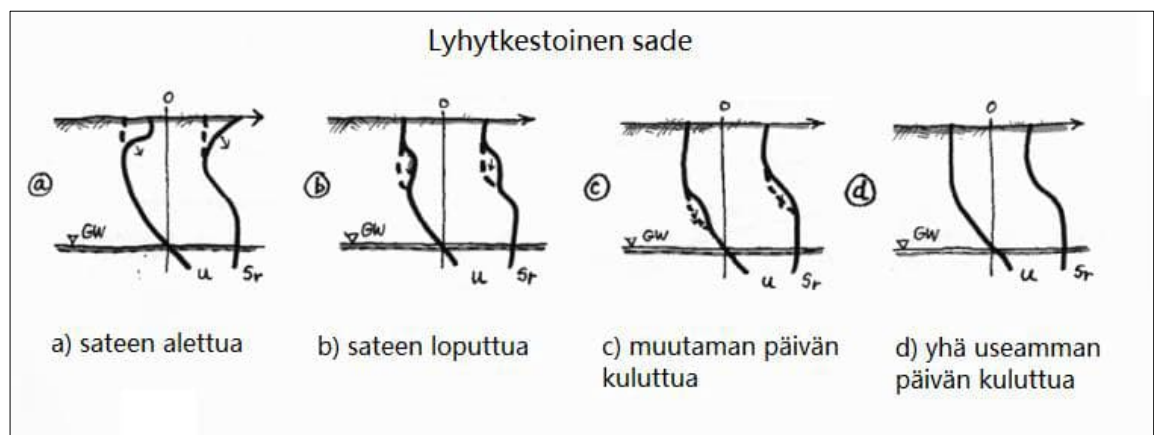
Kohoavan keskilämpötilan ei arvioida suoraa aiheuttavan haittavaikutuksia, mutta sen aikaansaamat ilmiöt kuten haihdunnan lisääntyminen, kasvillisuuden määrän vaihtelu, kasvukauden mahdollinen pidentyminen sekä vetiset talvet aiheuttavat muutoksia maaperässä ja pohjaolosuhteissa (Vardon 2014, s. 169). Kesäkausina yleistyvät pidentyvät hellejaksot lisäävät veden haihduntaa, sekä vaikuttavat pohjaveden kiertoon ja kertymiseen. Lisääntyvä veden haihdunta voi vähentää pintakerrosten näennäistä koheesiota, aiheuttaa maaperän kuivumista, halkeilua, eroosiota sekä kasvillisuuden vähenemistä (Vardon 2014, s. 171).

Kasvillisuuden väheneminen lisää maan vesipitoisuutta, sillä kasvien juuret imevät sekä pidättävät vettä varsinkin maan pintakerroksissa. Kasvillisuus myös ehkäisee pinnan eroosiota estämällä maa-aineksen liikkumista virtaavan veden mukana. Kasvillisuuden väheneminen saattaa myös heikentää paikallisesti maan lujuutta, sillä etenkin puiden juurien levittäytyminen rinteissä vaikuttaa olennaisesti maaperän lujuuden alueelliseen kehittymiseen lisäämällä maaperän vetolujuutta ja koossapysyvyyttä. (Vardon 2014, s. 171; Schwarz 2015, s. 2103)

Keskilämpötilan kohoaminen on huomattavinta talvikausina, joka tarkoittaa leutojen sekä vetisien talvien yleistymistä. Maan routaantuminen ja roudan syvyys vähenee pakkasjaksojen lyhentyessä tai puuttuessa kokonaan. Tällöin roudan aiheuttama näennäinen lujuus jää saavuttamatta, ja maaperä on alttiimpi sään ja ympäristön vaikutuksille. Lisäksi talven lämpötilojen vaihtelu nollan molemmin puolin saattaa edesauttaa roudan epäedullista kehittymistä. Ilmatieteen laitoksen mittauksen mukaan (Gregow et al. 2011, s. 119–20) selvisi, että talvikausien lyhyiden lauhojen jaksojen aiheuttama lumen sulaminen sekä vetiset sateet eivät välttämättä aiheuta roudan sulamista, vaan voivat jopa edistää roudan nopeaa syvenemistä, mikäli pakkasen kiristyy leudon jakson päätyttyä. Roudan nopea syveneminen yhdessä pitkien lauhojen jaksojen aiheuttaman sulamisen kanssa saattavat aiheuttaa halkeilua sekä luiskan pinnalla että pinnan alla, mikä puolestaan edistää veden imeytymistä maahan (Tang et al. 2018, s. 159, 162).

3.2.2 Sadannan lisääntyminen

Sademäärän kasvu vaikuttaa merkittävästi pohjaolosuhteisiin. Sadannan lisääntyminen kasvattaa vähitellen maan kosteuspitoisuutta, joka puolestaan vaikuttaa olennaisesti sen leikkauslujuuteen. Kosteuspitoisuuden noustessa maarakeiden välinen kontaktivoima heikkenee, sillä maarakeiden huokokset täyttyvät vedellä. Huokosveden lisääntyminen kasvattaa huokosvedenpainetta, joka puolestaan pyrkii puskkemaan maarakeita poispäin toisistaan. (Hultén et al. 2005 s. 12)



Kuva 9. Huokosvedenpaineen (u) ja kyllästymisasteen (s_r) muutos silttikerroksessa lyhytkestoisen sateen vaikutuksesta (muokattu lähteestä Hultén et al. 2005).

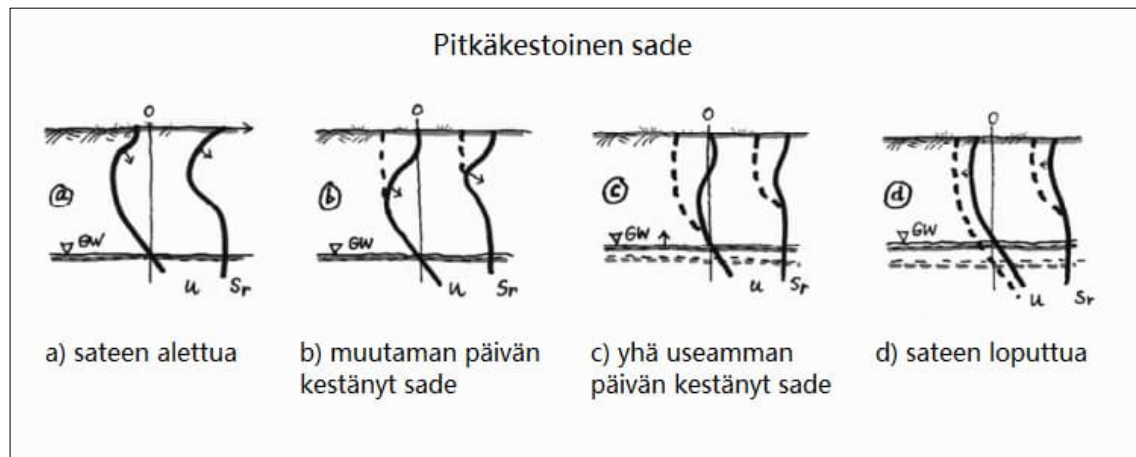
Pohjaveden pinnan yläpuolella sadannasta johtuva huokosvedenpaineen kasvu aiheuttaa maan pintakerroksissa näennäisen koheesion vaikutuksen heikkenemistä ja jopa kaatamista (Hultén et al. 2005 s. 13). Optimaalisesta vesipitoisuudesta eli negatiivisesta

huokosvedenpaineesta riippuvainen näennäinen koheesio aikaansaa lujuutta, joka perustuu veden adheesioon. Tällöin sateen vaikutuksesta, kyllästysasteen s_r noustessa, negatiivinen huokosvedenpaine tasoittuu kohti nollaa, ja näennäisen koheesio vaikutus heikkenee tai lakkaa kokonaan kyllästysasteen suuruudesta riippuen (kuva 9, kohta a). Vesi kulkeutuu maakerroksessa alaspäin aiheuttaen paikallisia, vähitellen pieneneviä muutoksia huokosvedenpaineessa ja kyllästymisasteessa syvyydestä riippuen (kuva 9, kohdat b ja c). Lopulta vähäinen sademäärä suodattuu kokonaan ympäristöönsä aiheuttamatta juurikaan muutoksia syvällä maakerroksessa (kuva 9, kohta d). Hultén et al. (2005 s. 28) mukaan luiskat, jotka ovat ympäristöolosuhteiden osalta valmiiksi alttiita huokospaineolosuhteiden muutoksille, voivat muuttua epävakaaiksi pienilläkin muutoksilla.

Sateen vaikutuksesta myös maan paino eli kuormitus kasvaa, sillä kyllästynyt maa painaa huomattavasti kuivaa maata enemmän (Duncan et al. 2014, s. 16). Etenkin leutojen talvien seurauksena maan kosteuspitoisuus lisääntyy entisestään, sillä maan routaantuminen sekä roudan syvyys vähenee. Roudan puutteesta johtuen routaantumisen aiheuttama näennäinen lujuus jää kehittymättä sekä vedenläpäisemättömyys saavuttamatta. (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 111, 174) Tällöin lisääntyvien talvisateiden johdosta aiemmin luiskaa pitkin pintavaluntana poistuneet sadevedet pääsevätkin imeytymään suoraan luiskan pintakerrokseen sekä mahdollisiin halkeamiin (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 174). Veden imeytymisestä aiheutuva kuormituksen kasvaminen yhdessä heikentyneen lujuuden kanssa aiheuttaa epäsuotuisia muutoksia stabiliteettiin. (Duncan et al. 2014, s. 16) Maan painon kasvu lisää sorruttavan aktiivimomentin suuruutta, kun taas heikentynyt lujuus laskee paikallaan pitävän passiivimomentin arvoa.

Kesäkausiin sadannan vaikutukset eivät aiheuta yhtä suoranaisia vaikutuksia kuin talvella, sillä lisääntynyt haihdunta sekä mahdollinen kasvillisuus lisäävät maan vesipitoisuuden säätelyä (Tang et al. 2018, s. 163). Toisaalta yleistyvät rankkasateet saattavat koitua ongelmaksi myös kesällä aiheuttaen äkillisen vesipitoisuuden nousun lisäksi eroosiota (Ala-outinen et al. 2004, s. 34–35, 39). Hultén et al. (2005, s. 33) mukaan sademäärän lisääntyessä luiskan pinnalla tapahtuvan eroosio riski kasvaa. Rankkasateiden aiheuttama pintavalunnan kasvaminen aiheuttaa maa-aineksen kulumista ja kulkeutumista (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 171, 173). VTT:n ilmastomuutosselvityksen (Ala-outinen et al. 2004 s. 39) mukaan eroosiota ja sortumia voi tulevaisuudessa tapahtua korkeustasoilla, joilla vastaavia ei ole aikaisemmin esiintynyt.

Rankkasateet saattavat vaikuttaa maan pintakerrosten lisäksi myös syvempiin maakerroksiin. Pitkäkestoinen tai voimakasintensiivinen sade voi vaikuttaa pohjavedenpintaa nostattavasti. Pitkäkestoisen sateen aiheuttamaa vaikutusta huokosvedenpaineeseen, kyllästymisasteeseen sekä pohjaveden pintaan on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Huokosvedenpaineen (u), kyllästymisasteen (s_r) sekä pohjaveden pinnan (GW) muutos silttikerroksessa pitkäkestoisen sateen vaikutuksesta (muokattu lähteestä Hultén et al. 2005).

Pitkäkestoisen sade vaikuttaa huokosvedenpaineeseen sekä kyllästymisasteeseen lyhytkestoista sadetta huomattavimmin. Edellä käsitellyn mukaisesti pitkään jatkuneen tai erittäin intensiivisen sateen seurauksena negatiivisen huokosvedenpaineen aiheuttama näennäinen koheesio häviää, sillä pintakerroksessa kehitty huokosveden ylipainetta kyllästysasteen lähestyessä 100 prosenttia. Sateen jatkuessa vesi tunkeutuu yhä syvemmälle maaperään, jolloin maa kyllästyy yhä pidemmältä matkalta saavuttaen lopulta pohjaveden pinnan (kuva 10, kohta c). Sateen loputtua vesi pyrkii poistumaan maakerroksesta suodattumalla pohjavedeksi sekä haihtumalla pintamaasta. Pohjavedenpinta voi pysyvästi nousta koko maakerroksessa tapahtuneen kyllästymisen seurauksena (kuva 10, kohta d). (Hultén et al. 2005, s.14)

Pohjavedenpinnan nousu kasvattaa huokosvedenpainetta, joka pyrkii puskemaan maakeita pois päin toisistaan (Hultén et al. 2005, s. 12). Sateiden vaikutus pinnantasoon riippuu olennaisesti sademäärän lisäksi pohjavedenpinnan sijainnista; mitä lähempänä maanpintaa pinnantasoo sijaitsee, sitä nopeammin muutokset saattavat ilmetä. Pohjaveden vaikutusta stabiiliteettiin käsitellään enemmän seuraavassa kohdassa 3.2.3.

3.2.3 Hydrologiset muutokset

Useiden selvitysten (Hultén et al. 2005; Dijkstra & Dixon 2010; Vardon 2014) mukaan ilmastonmuutoksen aiheuttamat hydrologiset muutokset, kuten pohjaveden pinnantason sekä huokosvedenpaineen vaihtelu, tulevat merkittävästi heikentämään luiskien stabiiliteettia nykytilanteeseen verrattuna. Varsinkin nopeat ja lyhytaikaiset muutokset, kuten rankkasateet, johtavat selkeästi vakausolosuhteiden heikkenemiseen. Varsinkin näennäisen koheesion osalta maaperän vesipitoisuuden ennustettu lisääntyminen heikentää olennaisesti sen vaikutusta. (Hultén et al. 2005, s. 28)

Sademäärien kasvu vaikuttaa maan kosteuspitoisuuden kasvamisen lisäksi olennaisesti myös pohjavesiin kuvan 10 mukaisesti. Pohjaveden tason muutokset vaikuttavat luiskien stabiiliteettiin aiheuttaen vaihtelua tehokkaissa jännityksissä. Maa-aineksen ollessa vedenpinnantason alapuolella, huokokset ovat täysin kyllästyneitä vedellä. Vallitseva huokosvedenpaine heikentää tehokkaiden jännitysten vaikutusta. (Duncan et al. 2014, s. 15) Varsinkin luiskan alaosassa passiivipuolella oleva korkea pohjavedenpinta tai sen nousu heikentää vastapenkereen tehokasta painoa veden aiheuttaman nosteen myötä. Tehokkaan painon pienentyessä rakenteen lujuus heikkenee ja paikallaan pitävän passiivimomentin suuruus pienenee.

Toisaalta pohjaveden pinnan äkillinen lasku aiheuttaa huokosvedenpaineen laskua, jolloin tehokkaat jännitykset kasvavat. Nopealla muutosvälillä karkearakeisen ja suodattavan maa-aineksen osalta tehokkaiden jännitysten kasvaminen parantaa lujuutta, mutta hienojakoiset, huonosti vettäläpäisevät maakerrokset eivät ehdi tasata huokosvedenpainetta nopean pohjaveden pinnan laskun tahdissa, mikä vaikuttaa heikentävästi maakerroksen leikkauslujuuteen. (Duncan et al. 2014, s. 16–17) Lisäksi pohjavesien pintojen lasku saattaa johtaa epäsuotuisiin maaperän painumiin (Maa- ja metsätalousministeriö 2012, s. 100).

Pohjaveden kiertokulun muutokset yhdessä lisääntyvän pintaimeytymisen sekä pohjaveden virtauksen kanssa voivat aiheuttaa hienorakeisten materiaalien kulkeutumista pohjaveden mukana aiheuttaen sisäistä eroosiota. Pohjavesien pintojen ennustetaan keskimääräisesti nousevan talvella ja alkukevällä roudan puutteen sekä vetisten sateiden ja lumen sulamisen seurauksena (Ympäristöhallinto 2019; Orvoma 2020). Varsinkin talvikaudella pohjavesien ollessa korkealla ja mahdollisen virtauksen lisääntyneenä maa-aines on alttiimpaa kulkeutumiselle. Pahimmillaan maa-aineksen kuljettuminen voi johtaa jopa suurten onteloiden syntyyn. (Hultén et al. 2005, s. 34) Onkalot voivat täyttyä vedellä, jolloin mahdollinen jäätymis-sulamissykli voi aiheuttaa onkaloiden laajentumista

sekä merkittävää halkeilua, joka puolestaan mahdollistaa veden tunkeutumisen syvemmälle maakerroksiin. (Tang et al. 2018, s. 166)

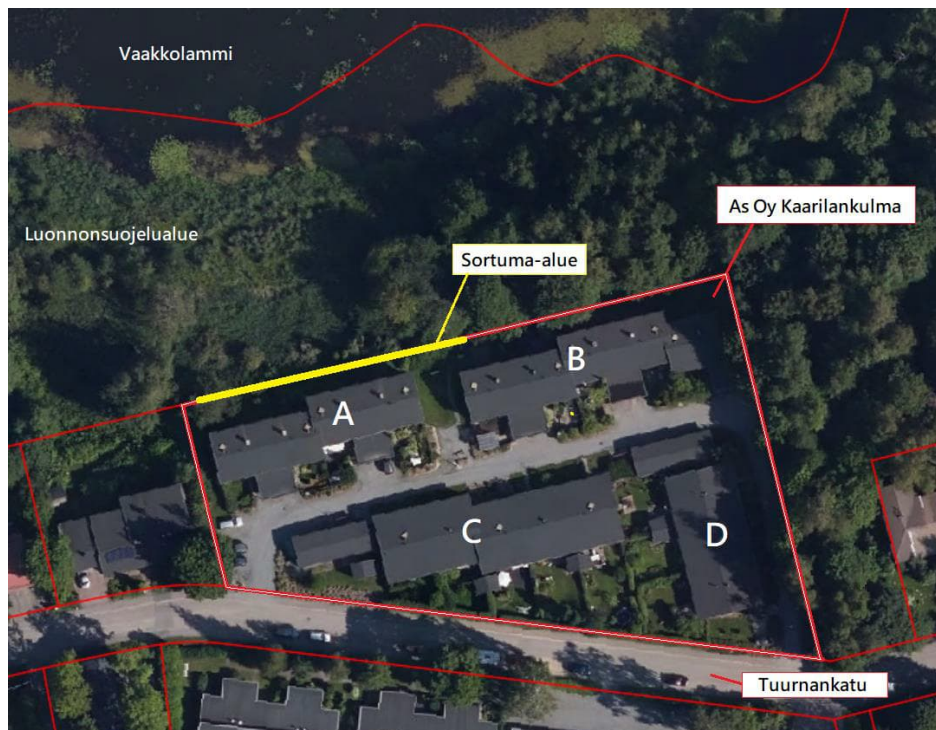
Pohjavesien ohella myös pintavesissä tapahtuvat muutokset aiheuttavat osaltaan eroosiota. Tang et al. (2018, s.165) mukaan varsinkin rakennetut luiskat ovat erittäin alttiita veden aiheuttamalle eroosiolle käyttöönoton alkuvaiheessa. Ilmastonmuutoksen myötä lisääntyvät sateet, virtaamat, valunnat sekä ääri-ilmiöt, kuten tulvat, lisäävät osaltaan eroosioriskiä. VTT:n selvityksen (Ala-Outinen et al. 2004, s. 35) mukaan virtaaman kasvuaessa uoman eroosio kasvaa verrannollisesti virtausnopeuden kuutioon. Virtaamien, valuntojen sekä pinnantasojen muutokset kuluttavat maaperää irrottamalla maa-ainesta ja kuljettamalla sitä mukanaan. Esimerkiksi jokiuomissa veden virtausenergian aiheuttama uoman ulkoreunan ja pohjan maa-aineksen syöpyminen jyrkentää luiskaa huomattavasti. (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 175) Luiskan jyrkkenemisen seurauksena sisäiset leikkausjännitykset kasvavat. (Duncan et al. 2014, s. 16) Aktiivimomentin kasvuaessa luiskan paikallaan pitävän passiivimomentin vaikutus heikkenee alaosan keventyessä. Ulkoisen eroosion aiheuttama luiskan jyrkkeneminen sekä sisäisen eroosion aiheuttamat jännitystilän ja lujuuden muutokset alentavat stabiliteettia huomattavasti (Hultén et al. 2005 s. 20; Vardon 2014 s.169; Tang et al. 2018, s.159).

Eroosion ohella pintavesien pinnantasojen vaihtelut voivat vaikuttaa luiskiin myös tuennallisesti. Luiskan alaosassa mahdollisesti esiintyvä pintavesi toimii vastapenkereen tavoin luiskaa tukevasti. Tällöin veden paino edesauttaa passiivimomentin vaikutusta, jolloin vedenpinnan laskiessa veden painon aiheuttama tuentavaikutus vähenee. Lisäksi pinnan laskiessa nopeasti, luiskan alaosan huokosvedenpaine ei välttämättä tasaannu samalla nopeudella maa-aineksesta riippuen. Tällöin huokosvedenpaine laskee leikkauslujuutta luiskan alaosassa, mikä osaltaan vähentää paikallaan pitävän passiivimomentin vaikutusta. (Duncan et al. 2014, s. 16–17) Varsinkin eroosion seurauksena jyrkentyneissä jokiuomissa veden tuoma tuki on kriittisessä asemassa. Esimerkiksi rankan sadejakson seurauksena kyllästyneen uomaluiskan paino on suurimmillaan, jolloin joen pinnantason nopea lasku lisää merkittävästi sortumariskiä. (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 177)

4. CASE AS OY KAARILANKULMA

4.1 Yleistietoa kohteesta

As Oy Kaarilankulma sijaitsee Länsi-Tampereella Kaarilassa, noin viiden kilometrin päässä Tampereen keskustasta. 1980-luvulla rakennettuun asunto-osakeyhtiöön kuuluu yhteensä neljä rivitaloa, joista talot A ja B sijaitsevat lähimpänä Vaakkolammin rantaa. Vaakkolammin ja kiinteistön tontin väliin sijoittuu kaupungin luonnonsuojelualue. Kuvassa 11 on havainnollistettu As Oy Kaarilankulman sijoittumista ympäristöön. Ilmakuvaan on merkattu punaisella kiinteistörajat sekä sortuma-alue keltaisella.

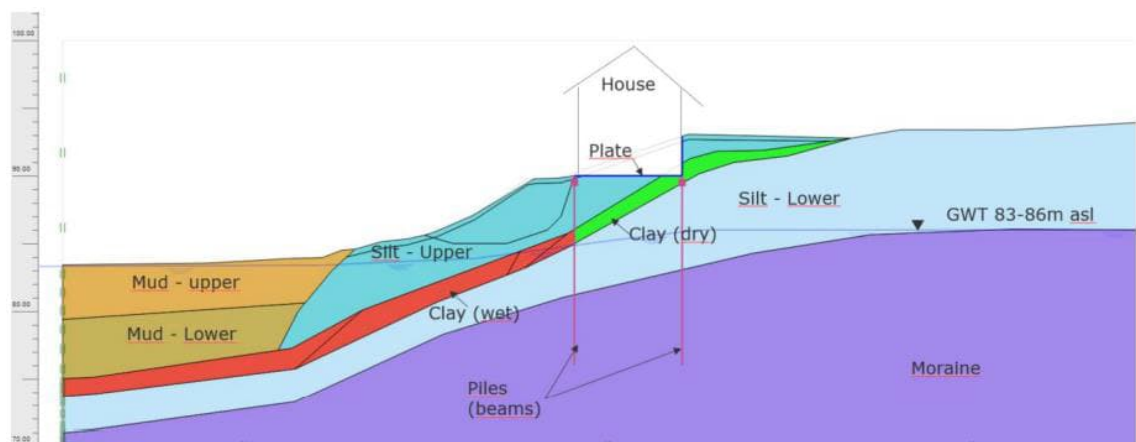


Kuva 11. Ilmakuva As Oy Kaarilankulman lähiympäristöstä (muokattu lähteestä Tampereen kaupungin karttapalvelu 2018).

Kiinteistön tontin pohjoisraja sijaitsee osittain rinteessä, joka viettää Vaakkolammin luonnonsuojelualueelle noin 33° kulmassa. Maanpinnan korkeus on rinteiden alapuolisella luonnonsuojelualueella noin tasolla +83,9 metriä ja talon A yläpihalla mitattuna +93 metriä. Kaksikerroksisen rivitalo A:n ylä- ja alapihan korkeusero on noin 3,5 metriä. (Ramboll Finland Oy 2020a)

Geologian tutkimuskeskuksen karttapalvelu Maankamaran mukaan (2021) As Oy Kaarilankulma sijaitsee muinaisella rantakerrostuma-alueella, joten ympäristön maaperä on

pääosin hietaa eli silttiä. Lisäksi kohdealueen läheisyydessä esiintyy turvetta ja savea. Kallio on kohdealueella noin 11 metrin syvyydessä, nousten kohti maan pintaa tontin itäpuolella. (GTK 2021) Tarkempaa tietoa kohteen maaperästä saatiin Ramboll Finland Oy:n toimesta tehdyistä sortuman jälkeisistä pohjatutkimuksista. Niiden perusteella noin 10 metrin etäisyydellä A-talon seinälinjasta maaperän todettiin koostuvan 3–4 metrin paksuisesta pehmeästä savikerroksesta sekä sen alapuolella olevasta sitkeästä savesta tai siltistä. Näiden kerrosten päällä oli osin sortuneesta penkereestä lähtöisin oleva 2–3 metrin paksuinen löyhä silttikerros. (Ramboll Finland Oy 2020a) Ramboll Finland Oy:n selvitysraportin (2020a) laskentamalli (kuva 12) havainnollistaa maakerrosten sijoittumista poikkileikkauksessa.



Kuva 12. Selvityksissä käytetty laskentamalli, joka havainnollistaa maaperän kerroksia (Ramboll Finland Oy 2020a).

Kuvan 12 mallinnetusta poikkileikkauksesta nähdään pehmeän savikerroksen alapinnan laskevan havaintojen mukaisesti hyvin nopeasti Vaakkolammia kohden mentäessä. Lisäksi päällimmäisen maakerroksen havaittiin muuttuvan erittäin pehmeäksi liejuksi tai turpeeksi, jonka paksuus oli noin 8 metriä 20 metrin etäisyydellä A-rakennuksen seinälinjasta. (Ramboll Finland Oy 2020a)

4.2 Sortuma

Sekä Ramboll Finland Oy:n asiantuntijat (2020a) sekä pohjarakentamisen ja geotekniikan professori Tim Länsivaara (2020) toteavat sortuman saaneen alkunsa luiskan alaosasta, Vaakkolammen rantakaistalta. Saavutetun murtorajatilan seurauksena maa siirtyi kohti Vaakkolampea saaden aikaan ketjureaktion. Tämän seurauksena muodostui liukupinta A-rakennukselle asti, mikä ilmeni asukkaiden havaitsemina halkeamina rakennuksen vierustalla. (Länsivaara 2020)

As Oy Kaarilankulman pyynnöstä halkeamia konsultoitiin Ramboll Finland Oy:n toimesta 13.2.2020. Asiantuntijat totesivat kyseessä olevan alkava liukupintasortuma, joka oli aiheuttanut liikettä rakennuksen lähellä sekä alaspäin että rinteeseen suuntaan. Halkeamat peitettiin pressuilla, joilla pyrittiin ehkäisemään ennustettujen sadeiden sadevesien pääsy halkeamiin. (Ramboll Finland Oy 2020a) Murtuminen kuitenkin eteni, kunnes leikkausjäännitys saavutti leikkauslujuuden koko liukupinnan matkalla, mikä johti maan sortumiseen muodostunutta liukupintaa pitkin 16.–17.2. välisenä yönä (Länsivaara 2020). Kuvassa 13 on ilmakehu sortuman laajuudesta Vaakkolammien suunnasta kuvattuna. Sortumapinta A-talon kohdalla on esitettyä kuvassa 14.



Kuva 13. Ilmakehu sortuman laajuudesta Vaakkolammilta päin kuvattuna (Ramboll Finland Oy 2020a).



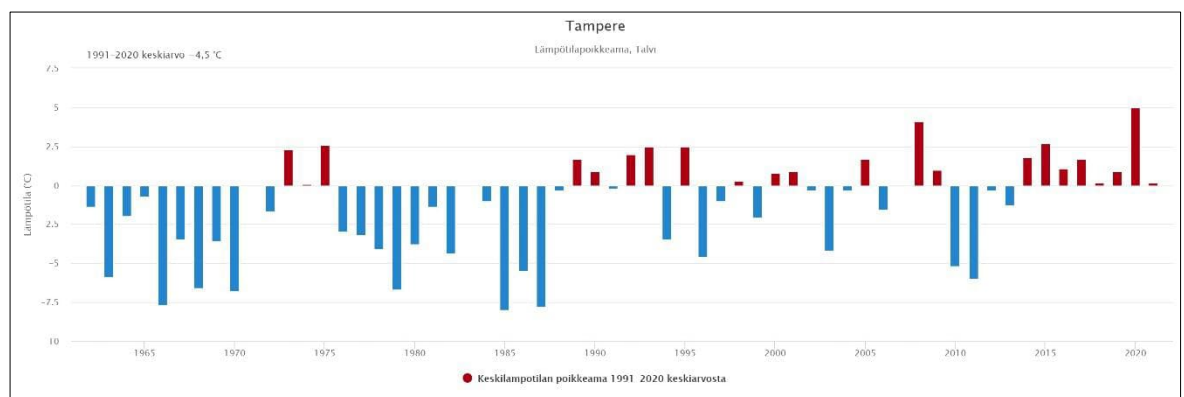
Kuva 14. Sortuma A-talon itäiseltä puolelta kuvattuna (Ramboll Finland Oy 2020a).

Suurin paikallinen sortuma tapahtui talon A kohdalla, jossa liukusortuma oli sorruttanut kokonaan talon takapihalla olleen tasanteen sekä luiskan jättäen itäiselle puolelle viisi metriä korkean pystysuoran maaluiskan (kuva 14). Talon länsireunassa sortuma oli aiheuttanut portaittaisen muodostuman, joka päättyi noin neljä metriä talon reunasta olevaan kolme metriä korkeaan pystysuoraan maaluiskaan. Sortuman aiheuttamia siirtymiä ja vaurioita tarkastellessa havaittiin kyseessä olevan mahdollisesti kaksi erillistä liukupintaa. Toinen liukupinnoista oli aikaansaanut A-talon etuluiskan jyrkän ja lyhyen sortuman (kuva 14), kun taas toinen liukupinta oli laaja-alaisempi ulottuen Vaakkolammin rantaan asti. Laaja-alainen liukupinta havaittiin lammen rantaan muodostuneista ylös kohonneista massoista sekä yhtenäisestä leikkautumisvyöhykkeestä (kuva 13). (Ramboll Finland Oy 2020a)

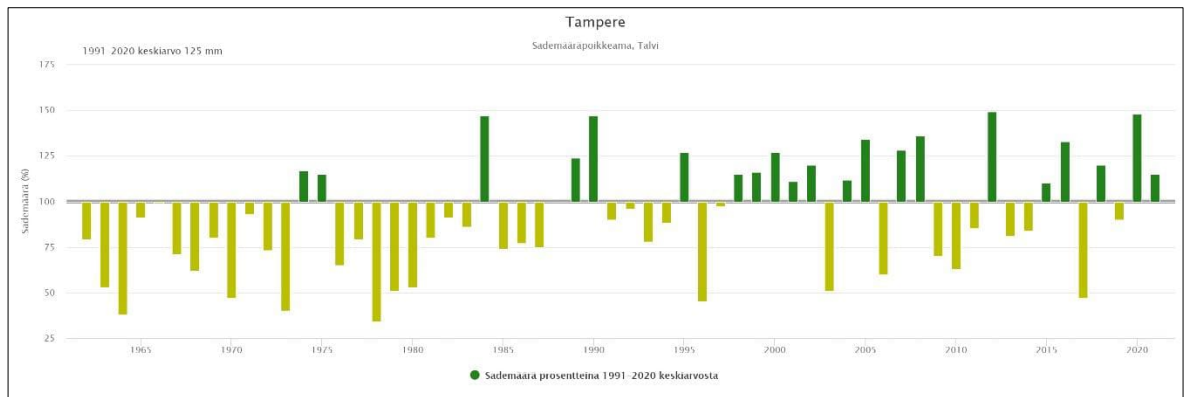
Sortuman jälkeisenä päivänä alueella aloitettiin Ramboll Finland Oy:n toimesta ympäristön ja rakennusten liikkeiden seuranta ja mittaukset. Tutkimusten aikana sortuma-alueen koko hieman laajeni A ja B talojen välissä (Ramboll Finland Oy 2020a).

4.3 Sortumaa edeltävät muutokset ympäristössä ja ilmastossa

Ilmatieteen laitoksen tutkija Ilari Lehtosen (2021) mukaan vuosien 2019 ja 2020 välinen talvikausi oli merkittävän leuto. Tilastollisesti talvikausi 2019/2020 oli mittaushistorian leudoin Etelä- ja Keski-Suomen osalta, mikä tarkoitti keskilämpötilan olleen eteläosissa noin 6–7 °C pitkän ajan keskiarvoa korkeammalla. (Lehtonen 2021) Poikkeuksellisen leudon keskilämpötilan seurauksena talvikausi 2019/2020 oli varsin lumeton, jolloin runsaat sateet satoivat pääosin vetenä. Kuvassa 15 ja 16 on esitetty Tampereen alueen tilastoitujen talvikausien keskilämpötilojen sekä sademäärien poikkeamia pitkän ajan keskiarvoista.



Kuva 15. Talvikausien keskilämpötilojen poikkeamat vertailujakson 1991–2020 keskiarvosta Tampereella vuodesta 1961 vuoteen 2021 (Ilmatieteen laitos 2021).



Kuva 16. Talvikausien sademäärien prosentuaaliset poikkeamat vertailujakson 1991–2021 keskiarvosta Tampereella vuodesta 1961 vuoteen 2021 (Ilmatieteen laitos 2021).

Poikkeuksellisen leuto talvikausi 2019/2020 erottuu selkeästi kuvasta 15. Pitkän ajan keskiarvon ollessa $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, talvikauden 2019/2020 keskilämpötilan poikkeama oli $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tampereella talvikauden 2019/2020 keskilämpötila oli siis $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Myös sademäärä oli huomattavan suuri kyseisellä talvikaudella. Sadanta poikkesi vertailukauden 125 mm keskiarvosta 148 % ollen kyseisellä jaksolla 185,0 mm (kuva 16). Kuten kuvasta 16 nähdään, sademäärät ovat tilastollisesti poikenneet ennenkin merkittävästi, mutta poikkeuksellisen korkean keskilämpötilan takia sateet satoivat pääasiassa vetenä. Myös sateiden intensiteetti ja jakautuminen vaikuttavat olennaisesti merkittävytyteen ilmastollisena tekijänä.

Sääolosuhteiden lisäksi Ramboll Finland Oy:n (2020a) toimesta sortuma-alueella tehtyjen tutkimuksien ja havaintojen pohjalta selvisi pohjaveden pinnantason olleen rinteessä huomattavasti korkeammalla ympäristöön verraten. Olemassa olevien pohjavesiputkien ja niiden havaintotietojen pohjalta pohjaveden pinnantasossa havaittiin luontainen laskusuunta Näsijärven vedenpinnan korkeudesta (+95) kohti Pyhäjärven vedenpinnan tasoa (+77), jonka johdosta Myös Vaakkolammin ranta-alueelle asennettujen pohjavesiputkien korkeusasemat vastasivat hyvin Vaakkolammin vedenpinnan korkeutta (+83,4). Kuitenkin lisätutkimusten yhteydessä sortuma-alueelle, rakennuksen A lähettyville asennetuissa kahdessa lisähavaintoputkessa pohjaveden pinnantason havaittiin olevan noin 3 metriä korkeammalla kuin GTK:n rekisterissä oli arvioitu. Pinnantaso sortuma-alueen putkissa oli 17.3.2020 tehdyn mittauksen mukaan +86,1..+86,2. (Ramboll Finland Oy 2020a)

Pinnantason kehitystä seurattiin Ramboll Finland Oy:n toimesta, ja korkeuden havaittiin pysyvän huomattavasti ympäristöä korkeammalla. Alimmillaan pohjaveden pinnantason mitattiin olevan +85,33 (2.10.2020), joka on Vaakkolammin tasoon verrattuna noin metrin

korkeammalla. Viimeisin mittaus suoritettiin 9.11.2020, jolloin vedenpinnan mitattiin vastaavan lokakuussa suoritettun mittauksen tulosta. (Ramboll Finland 2020b) Sillä kohteesta ei ole aikaisempaa mittausdataa, kyseessä saattaa olla paikallinen esiintymä läheisen kallioperävyöhykkeen johdosta (Ramboll Finland Oy 2020a). Toisaalta pinnantason kehitys saattaa olla yhteydessä hydrologisiin muutoksiin johtuen muuttuvista ilmastosta- ja ympäristöolosuhteista. Talvikauden aikana mitatut korkeat pinnantasot viittaavat pohjavesikierron ennustettuun kehitykseen talven aikaisen imeytymisen lisääntyessä (Ympäristöhallinto 2019; Orvomaa 2020) Tarkempi arvio vaatisi kuitenkin pidempää seuranta ja selvitystä, sekä vertailua kesäkauden pinnankorkeuksiin.

Myös Vaakkolammin pinnan todettiin olevan keskimääräistä korkeammalla. Vuodesta 2018 Tampereen kaupungin toimesta suoritettujen säännöllisten seurantojen mukaan korkein vedenpinnan havainto tehtiin tammikuussa 2020, jolloin pinnantaso oli tasolla +83,44. Alhaisin seurantajaksolla mitattu pinnantaso on ollut +83,03, josta tammikuinen ennätys poikkesi noin 40 cm. Vanhempien selvitysten ja aineistojen mukaan Vaakkolammin vedenpinnan korkeus on vaihdellut noin +83...83,2 tasoilla, jolloin vedenpinnan voidaan katsoa nousseen ajan saatossa. (Ramboll Finland Oy 2020a)

4.4 Ympäristöllisten sekä ilmastollisten tekijöiden vaikutus sortumaan

Ramboll Finland Oy:n selvitysten ja tutkimusten (2020a) perusteella sortumaan johtaneita syitä on useita, jolloin kyse on ollut riskitekijöiden yhteisvaikutuksesta. Luiskan jyrkkä kaltevuus ja maaperän siltti- ja savikerrosten ennestään heikko lujuus ovat osaltaan lisänneet sortumalle suotuisia olosuhteita. Kuitenkin rakennukset ja luiska ovat pysyneet liikkumattomina noin 40 vuotta, jolloin maaperässä ja olosuhteissa on täytynyt tapahtua merkittäviä muutoksia ennen sortuman syntymää. (Ramboll Finland 2020a)

Ramboll Finland Oy:n (2020a) asiantuntijoiden mukaan maaperässä tapahtuneet muutokset johtuivat mitä todennäköisimmin suuresta vesimäärästä maaperässä leudon ja sateisen talven seurauksena. Leudon talven seurauksena maan routaantuminen on ollut vähäistä, jolloin näennäistä lujuutta ei ollut päässyt kehittymään. Roudan ja lumen puute yhdessä leutojen kelien kanssa edesauttoivat sadevesien pääsyä suoraa maarakenteen läpäisevän maanpinnan läpi. (Ramboll Finland Oy 2020a) Lämpötilan vaihtelu nollan molemmin puolin on myös saattanut aiheuttaa roudan äkillistä kehittymistä, joka on puolestaan aikaansaanut epäsuotuisaa halkeilua maan pintakerroksessa (Gregow et al. 2011 s. 119–120; Ramboll Finland Oy 2020a). Halkeilujen kautta vettä on päässyt kulkeutumaan yhä enemmän ja syvemmälle maakerrokseen, mikä on saattanut aiheuttaa

jopa virtausta luiskan sisällä. Halkeamissa oleva vesi on oletettavasti jäätyessään laajentanut halkeamia edesauttaen suuremman vesimäärän kulkeutumista ja lujuuden heikkenemistä. (Gregow et al. 2011 s. 20; Ramboll Finland Oy 2020a)

Maarakeiden välisten huokosten täytyminen vedellä sateiden seurauksena on heikentänyt pohjaveden yläpuolisen maan negatiivisen huokospaineen eli näennäisen koheesion vaikutusta. Maahan imeytyneen veden myötä kasvanut huokosvedenpaine on osaltaan heikentänyt myös maassa vallinneita tehokkaita jännityksiä. (Hultén et al. 2005 s. 13) Lisääntyneen veden määrä on myös kasvattanut maan painoa huomattavasti, jolloin painosta aiheutunut kuormituslisä on kasvattanut aktiivimomentin suuruutta. Oletettavasti murtotilanteessa rinteiden yläosan maa on ollut täysin veden kyllästävä, jolloin alentuneen lujuuden myötä pehmeät maakerrokset eivät ole kestäneet runsaiden sateiden johdosta kasvanutta pengerkuormaa (Ramboll Finland 2020a).

Vaakkolammin korkea pinnantaso on puolestaan oletettavasti aiheuttanut vastapenkereenä toimineen ranta-alueen kuormitusvaikutuksen kevenemisen nosteen vaikutuksesta. Keventynyt vastapenkereen paino alentaa stabiliteettia heikentämällä paikallaan pitävän passiivimomentin vaikutusta. Vaakkolammin havaittu pinnantason vaihtelu on saattanut myös ajan saatossa kuluttaa ranta-alueen maa-ainesta jyrkentäen geometriaa, mikä osaltaan heikentää stabiliteettia.

Ramboll Finlandin Oy:n toimesta havaittu kohonnut pohjavedenpinta rinteiden puolella on osaltaan heikentänyt stabiliteettia huomattavasti. Tehtyjen laskentojen perusteella stabiliteetti heikkeni selkeästi, kun pohjaveden pinta mallinnettiin mitatulle tasolle Vaakkolammin pinnantason sijasta. (Ramboll Finland Oy 2020a) Pohjaveden korkea pinnantaso rinteessä saattaa johtua paikallisesta esiintymästä, mutta arvion vahvistaminen vaatisi aiempia seurantatuloksia tai lisäselvityksiä. Toisaalta poikkeuksellisen leuto ja sateinen talvikausi 2019/2020 on saattanut edesauttaa pohjaveden pinnan nousua lisääntyneen imeytymisen johdosta. Hypoteettinen pohjaveden äkillinen nousu on saattanut aiheuttaa pohjamaan maa-aineksen kyllästymisen vedellä, jonka seurauksena lisääntyneen huokosvedenpaineen johdosta maan lujuus on heikentynyt. Lisäksi pohjaveden mahdollinen virtaus kohti alemmaa Vaakkolammin tasoa on saattanut kuluttaa ja liikuttaa maa-ainesta maan sisällä heikentäen stabiliteettia. (Hultén et al. 2005 s. 12)

Sortumaan vaikuttaneita ilmastollisia ja ympäristöllisiä tekijöitä on siis useita. Kasvanut pengerkuorma pintamaan kyllästymisen seurauksena on yhdessä jyrkän geometrian kanssa kasvattanut aktiivimomentin suuruutta. Puolestaan heikentynyt vastapenkereen vaikutus, näennäisen koheesion heikkeneminen, pohjaveden korkea pinnantaso sekä

kasvanut huokosvedenpaine ovat osaltaan heikentäneet maan lujuutta sekä paikallaan pitävän passiivimomentin suuruutta merkittävästi. Osa tekijöistä, kuten korkea pohjaveden pinnataso sekä luiskan mahdollinen sisäinen eroosio, ovat saattaneet kehittyä ajansaotossa, jolloin stabiiliteetti on heikennyt vähitellen ajan myötä. Tällöin pienetkin muutokset kuormitustekijöissä ja lujuudessa ovat saattaneet sorruttaa rakenteen. Toisaalta suuret muutokset ilmasto- ja ympäristöolosuhteissa talven 2019/2020 tavoin saattavat olla kriittisiä stabiilillekin rakenteelle.

5. YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen myötä ilmasto-olosuhteet tulevat huomattavasti muuttumaan vuosisadan loppuun mennessä. Muutosten arviointiin ja ennustukseen liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta. Varsinkin Suomen osalta epävarmuutta lisää Suomelle ominainen, luonnollisesti vaihteleva ilmasto, jolloin muutosten suoraviivainen ennustaminen on haasteellista. Kuitenkin sadan vuoden aikavälillä arvioituna keskeisimmät muutokset tulevat Suomen osalta olemaan keskilämpötilan kohoaminen sekä sadannan lisääntyminen ympärivuotisesti. Selkeimmin muutokset tulevat näkymään talvikausina, jolloin leutojen ja vetisten talvien myötä myös routaantumisen ja roudan syvyys vähenee. Lisäksi muutokset tulevat vaikuttamaan maaperän vesipitoisuuteen sekä pohja- ja pintavesien pintojenta-soihin sekä kiertokulkuihin.

Muutokset ilmasto- ja ympäristöolosuhteissa tulevat vaikuttamaan luiskien stabiliteettiin heikentävästi. Suurin riskitekijä on kasvavan sadannan moninaiset vaikutukset. Varsinkin talvikausina roudan puuttuessa maaperään imeytyy enemmän vettä. Pintamaan kylästyminen kasvattaa maan painoa ja heikentää näennäistä koheesiota. Pohjavedenpinnan alapuolella huokosvedenpaineen kasvu pienentää tehokkaita jännityksiä, ja sitä kautta myös maan lujuutta.

Muita stabiliteettiin vaikuttavia ilmastollisia ja ympäristöllisiä muutoksia ovat kasvillisuuden määrä, kesäkausien kuivat jaksot sekä lisääntyvä ulkoinen ja sisäinen eroosio hydrologisten muutosten sekä ääri-ilmiöiden myötä. Kasvillisuus edesauttaa maan vesipitoisuuden säätelyä, eroosiokestävyyttä sekä lujuutta. Kesäkausien kuivat hellejaksot lisäävät haihduntaa, joka voi suurella kapasiteetilla vaikuttaa maan pintakerroksen näennäiseen koheesioon heikentävästi. Lisäksi hellejaksot voivat vaikuttaa etenkin pienten pohja- ja pintavesialueiden pinnantasoihin alentavasti. Vesien pinnantasojen vaihtelu sekä valuntojen ja virtaamien muutokset lisäävät eroosioriskiä niin ulkoisesti kuin sisäisesti.

As Oy Kaarilankulman pengerluiskan sortuma on havainnollistava esimerkki, kuinka ilmastolliset ja ympäristölliset olosuhteet ja niiden muutokset vaikuttavat merkittävästi luiskien stabiliteettiin. Kaarilan sortuman selvityksissä havaitut syy-seuraussuhteet ovat verrattavissa tässä työssä tarkasteltuihin ilmastonmuutoksen aiheuttamiin vaikutusmekanismeihin. Vaikka vallinneiden ilmasto-olosuhteiden ja ilmastonmuutoksen välille ei voida vetää täysin suoranaista ja yksiselitteistä linjaa, olivat talvikaudella 2019/2020 vallinneet olosuhteet tilastollisesti hyvin poikkeavat.

Ilmatieteen laitoksen tutkijan (Lehtonen 2021 s. 7) mukaan talvikauden 2019/2020 kaltaiset poikkeuksellisen leudot ja sateiset talvet tulevat yhä yleisimmiksi ilmastonmuutoksen myötä. Tällaisten poikkeusilmiöiden yleistyminen tulee oletettavasti vaikuttamaan rakentamisen laatuvaatimuksiin ja standardeihin, sillä rakenteet suunnitellaan lähtökohteisesti kestämään sata vuotta. Suunnittelun käyttöön saavuttamiseksi on erittäin tärkeää jo suunnitteluvaiheessa pyrkiä huomioimaan ilmasto-olosuhteissa tapahtuvat muutokset sekä niiden vaikutukset ympäristöön ja sen olosuhteisiin. Varsinkin vesialueiden, kuten järvien ja jokien, läheisyyteen luiskia suunniteltaessa tai niille rakennettaessa olisi suositeltavaa huomioida ja kartoittaa eroosion sekä mahdollisten ääri-ilmiöiden, kuten tulvien, todennäköisyys. Ennakoinnin myötä mahdollisiin muutoksiin, haasteisiin ja riskeihin osataan varautua paremmin, ja mahdollisten vaurioiden todennäköisyys pienenee.

LÄHTEET

Ala-Outinen, T. Harmaajärvi, I., Kivikoski, H., Kouhia, I., Makkonen, L., Saarelainen, S., Tuhola, M. & Törnqvist, J. 2004. Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennettuun ympäristöön. VTT Tiedotteita 2227. Saatavilla (viitattu 1.12.2021): <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2227.pdf>

Dijkstra, T.A. & Dixon, N. (2010). Climate change and slope stability: Challenges and approaches. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 4, 371-385. Saatavilla (viitattu 8.1.2022): <https://doi.org/10.1144/1470-9236/09-036>

Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 309 s. Saatavilla: TA710.D868 2014

Geologian tutkimuskeskus (GTK) (2021). Maankamara-karttapalvelu. Saatavilla: <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>

Gregow, H., Ruosteenoja, K., Juga, I., Näsman, S., Mäkelä, M., Laapas, M. & Jylhä, K. (2011). Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa. Raportteja 2011:5, Ilmatieteen laitos. Saatavilla (viitattu 7.1.2022): <http://hdl.handle.net/10138/28455>

Hultén, C., Olsson, M., Rankka, K., Svahn, V., Odén, K. & Engdahl, M. (2005). Släntstabilitet i jord. Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat. Deluppdrag I. SGI. Saatavilla (viitattu 7.1.2022): <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v560-1.pdf>

Ilmatieteen laitos (1996). Ilmastonmuutos: Tieteellinen arviointi (IPCC:n v. 1990 kolmiosaisen raportin käänös)

Ilmatieteen laitos (2021). Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. Saatavilla (viitattu 6.1.2021): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Ilmasto-opas (2017). Suomen muuttuva ilmasto. Tiedontuottajataho Ilmatieteen laitos. Saatavilla (viitattu 5.12.2021): <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Sixth Assessment Report, ensimmäinen osaraportti WG1 (The Physical Science Basis). Saatavilla sivustolla (viitattu 4.10.2021): <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Jaakkonen, J. (2013). Osavarmuus- ja kokonaisvarmuusmenettelyn vaikutus vanhojen kriittisten ratapenkereiden laskennalliseen varmuustasoon. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2013. Liikennevirasto. Saatavilla (viitattu 7.1.2022): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-51_osavarmuus_ja_web.pdf

Jääskeläinen, R. (2011). Geotekniikan perusteet, 3. painos. Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy. ISBN 978-952-5491-50-0

Korhonen, J. (2007). Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Suomen ympäristö 45/2007, Suomen ympäristökeskus. Saatavilla (viitattu 22.12.2021): <http://hdl.handle.net/10138/38428>

- Lehtonen, I. (2021). Record mild winter of 2019/2020 in most of Finland, FMI's Climate Bulletin: Research Letters, 1/2021, s. 4–7. Saatavilla (viitattu 28.12.2021): <https://doi.org/10.35614/ISSN-2341-6408-IK-2021-02-RL>
- Länsivaara, T. (2020). As Oy Kaarilankulma, Lausunto sortuman luonteesta. Saatavissa (viitattu 14.9.2021): <https://tampere.cloudnc.fi/fi-FI -> Toimielimet -> Yhdyskuntalautakunta -> Kokous 10.11.2020 > § 295 Asunto Oy Kaarilankulman vaatimus toimenpiteisiin ryhtymisestä osoitteessa Tuurnankatu 14 -> Liitteet>
- Länsivaara, T. (2021). Stability calculations theory part 1, Computational geotechnics. Tampereen yliopisto
- Maa- ja metsätalousministeriö (2012). Miten väistämättömään ilmastonmuutokseen voidaan varautua? Yhteenvedo suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Tampereen Yliopistopaino Oy. Saatavilla (viitattu 5.12.2021): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-453-682-0>
- Maa- ja metsätalousministeriö (2014). Kansallinen ilmastonmuutokseen sopeutumis-suunnitelma 2022. Saatavilla (viitattu 24.1.2022): <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80301/Kansallinen%20ilmastonmuutokseen%20sopeutumissuunnitelma%202022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Naderi, M. (2013). Determination of the critical slip surface in slope stability analysis. Saatavilla (viitattu 24.1.2022): <https://www.semanticscholar.org/paper/Determination-of-the-critical-slip-surface-in-slope-Naderi/946dcb34d6a04bbc7661d8e0f5db2d2c09cfa332>
- Nevanlinna, H. (toim.) (2008). Muutamme ilmastoja. Karttakeskus. Osa saatavilla (viitattu 4.10.2021): https://space.fmi.fi/MAGN/HN/ILMASTONMUUTOS-kirja/ilmasto_painon_pdf/455853_001_048.pdf
- Orvomaa, M. (2020). Pohjavedet ja ilmastonmuutos, Maailman vesipäivän seminaari 2020: ilmastonmuutos ja vesi. SYKE. Saatavilla (viitattu 6.10.2021): https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2020/11/WWD2020_OrvomaaMirjam.pdf
- Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (2016). Maan vesi- ja ravinetalous – Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys Oy. 2. täydennetty painos. Grano Oy, Helsinki, 2016. Saatavilla: <https://www.salaojayhdistys.fi/fi/2015/10/maan-vesi-ja-ravinetalous-ojitus-kastelu-ja-ymparisto/>
- Ramboll Finland Oy (2020a). As Oy Kaarilankulma, Tuurnankatu 14, Tampere, Pengerluiskan sortuma. Lausunto (7.4.2020).
- Ramboll Finland Oy (2020b). Geotekninen laskentareportti, Tuurnankatu 14, A-talo. Suunnitteluraportti (18.12.2020).
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. (2016). Climate Projections for Finland Under the RCP Forcing Scenarios, Geophysical Society of Finland, Helsinki. Saatavilla (viitattu 29.9.2021): http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2016_51_1-2_017_ruosteenoja.pdf

Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M. & Thormann, J.-J. (2015). Root reinforcement of soils under compression. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120, s. 2103–2120. Saatavilla (viitattu 7.1.2022): doi:10.1002/2015JF003632

Saukkonen, L. (2008). *Suomalainen sää: ilmastonmuutos ja ääri-ilmiöt*. Minerva kustannus Oy.

Silfverberg, P. (2017). *Vesihuollon suuntaviivat 2020-luvulle, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 44*, Helsinki. Saatavilla (viitattu 6.10.2021): https://valtioneuvosto.fi/documents/1410837/1516651/Vesihuollon+suuntaviivat+2020-luvulle_final_20170622.pdf/cb687a80-dd57-4733-88c7-f3962e4bf9f4

Suomen ympäristökeskus (2020). Tutkijat arvioivat ilmastonmuutoksen vaikutusten kuvaamiseen luotua menetelmää, Suomen ympäristökeskus SYKE (2013), Helsinki. Saatavilla (viitattu 3.11.2021): [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tutkijat_arvioivat_ilmastonmuutoksen_vai\(59125\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tutkijat_arvioivat_ilmastonmuutoksen_vai(59125))

Tampereen kaupungin karttapalvelu (2021). Saatavilla: <https://kartat.tampere.fi/oskari/>

Tang, A. M., Hughes, P. N., Dijkstra, T. A., Askarinejad, A., Brencić, M., Cui, Y. J., Diez, J. J., Firgi, T., Gajewska, B., Gentile, F., Grossi, G., Jommi, C., Kehagia, F., Koda, E., ter Maat, H. W., Lenart, S., Lourenco, S., Oliveira, M., Osinski, P., Springman, S. M., Stirling, R., Toll, D. G. & Van Beek, V. (2018). Atmosphere–vegetation–soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 51, s. 156–168. Saatavilla (viitattu 27.12.2021): <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2017-103>

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1):5–31. Saatavilla (viitattu 6.10.2021): <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Vardon, P. J. (2014) Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review. *Environmental Geotechnics*, volume 2, issue EG3. ICE Publishing. Saatavilla (viitattu 7.1.2022): <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.13.00055>

Veijalainen, N., Jakkila, J., Nurmi, T., Vehviläinen, B., Marttunen, M. & Aaltonen, J. (2012). Suomen vesivarat ja ilmastonmuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeuttaminen. WaterAdapt-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 16/2012, Suomen ympäristökeskus. Saatavilla (viitattu 22.12.2021): <http://hdl.handle.net/10138/38789>

Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Lahtinen, R., Heikinheimo, M. (2000). Ilmastonlämpenemisen vaikutus routaan lumettomilla paikoilla Suomessa. *Ilmatieteenlaitos, Meteorologia julkaisu* No. 43.

Ympäristöhallinto (2019). Pohjavesi ja ilmastonmuutos. Ymparisto.fi, Ympäristönhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Saatavilla (viitattu 22.12.2021): https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/Pohjavesien_tila/Pohjavesi_ja_ilmastonmuutos