

Lauri Mäkelä

ROUTANOUSUN SUURUUTEEN VAIKUTTAVAT ILMASTOTEKIJÄT

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Juha Latvala
5/2021

Tiivistelmä

Lauri Mäkelä: Routanousun suuruuteen vaikuttavat ilmastotekijät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan routanousun suuruuteen vaikuttavia ilmastotekijöitä ja routimisen kehitystä. Suomen rataveron ratarakenteiden tulisi olla nykyohjeistuksen mukaan routimattomia. Merkittävä osa Suomen alkuperäisestä rataverkosta on rakennettu jo 1800 luvulla. Näitä kohteita on ehkä ajan saatossa korjattu, mutta onko alusrakenteille tehty mitään merkittäviä parannuksia, on arvoitus. Ehkä paikoitellen, ehkä ei. Ratojen tasaisuusvaatimukset ovat hyvin suuret, minkä vuoksi vähäinenskin routiminen aiheuttaa ongelmia raideliikenteelle. Tässä työssä tutkitaan ilmasto-olosuhteiden vaikutusta ratarakenteissa havaittuun routanousuun ja pyritään selvittämään miten muuttuva ilmasto vaikuttaa routimiseen. Lopuksi pohditaan myös millaiset olosuhteet ovat saatujen tulosten perusteella kaikkein kriittisimmät routimista ajatellen.

Opinnäytetyö on osittain kirjallisuustutkimus, joka perustuu aiheesta aiemmin tehtyihin tutkimuksiin, raportteihin ja opinnäytetöihin. Osa työstä on omia havaintoja routamittaustuloksista ja ilmastohavainnoista. Työn alkuosa koostuu teoriaosuudesta, jossa käsitellään routimisen syitä ja sen perusteita. Teoriaosuuteen kuuluu myös katsaus Suomessa käytettävistä radan rakenteiden routasuojauksesta ja radan rakennekerroksista. Työn loppuosa koostuu ilmasto- ja mittaustietojen esittelystä, niiden vertailusta ja havaintojen sekä johtopäätösten esittämisestä.

Työssä tarkastellaan pakkasmäärän, pakkasia edeltävien sateiden ja lumipeitteen vaikutuksia routanousuun ja roudan syvyyteen. Käytetty routamittaustieto on Varkauden mittauspisteeltä ja tämä mittauspiste valikoitui työhön merkittävien routaongelmiensa takia. Mittauspiste on osa Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikön vuosina 2008–2010 ratarakenteiden routaantumisen ja routimisen tutkimista varten rakentamaa seurantapisteistöä. Työssä havaitaan viitteitä ilmaston muutoksista ja routimisen muuttumisesta olosuhteiden mukana. Routamittaus- ja ilmastotietojen vertailun pohjalta saadaan hyvä kuva siitä millaiset olosuhteet ovat routimisen kannalta kaikki riskialtteimmat.

Opinnäytetyön yhteenvedona todettakoon, että vaikka ilmasto lämpenee ja talvet lauhtuvat, ei routimisen riski ratarakenteissa poistu. Talvien lauhtuessa routimisen luonne muuttuu ja lyhytaikainen routanousu todennäköisesti yleistyy. Tämä tarkoittaa sitä, ettei routanousu kestä koko talvea vaan se syntyy lyhyen kylmän jakson aikana ja sulaa taas ilman lämmitessä. Tällaiset lyhyetkin rataosuuksien tasaisuusvaatimukset rikkovat routavaurioita aiheuttavat ongelmia raideliikenteelle. Routimista on tutkittu aiemminkin paljon ja siitä on kirjoitettu useita raportteja ja opinnäytetöitä. Tässä työssä saatujen viitteiden pohjalta voidaan todeta, että tutkimuksille ja routimisen tarkkailulle on edelleen aihetta, sillä routimisessa tapahtuu muutoksia ilmaston muuttuessa.

Avainsanat: routanousu, roudan syvyys, ilmaston muutos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. TEORIAA	2
2.1 Routiminen.....	2
2.1.1 Huokosveden jäätyminen.....	3
2.1.2 Osittain jäätynyt vyöhyke	4
2.1.3 In situ routanousu	5
2.2 Roudan syvyys ja routivuuteen vaikuttavat tekijät	6
2.3 Roudan syvyyden laskeminen.....	8
3. RATARAKENTEET JA NIIDEN ROUTASUOJAUS	10
4. MITTAUKSET	12
4.1 Mittaukset Suomen rataverkolla	12
4.2 Mittausmenetelmät.....	13
5. MITTAUSTULOSTEN JA ILMASTO-OLOSUHTEIDEN VERTAILU	15
5.1 Ilmastodatan esittely	15
5.2 Routamittausten ja ilmastodatan vertailu.....	16
5.2.1 Talvi 2010–2011	16
5.2.2 Talvi 2011–2012	18
5.2.3 Talvi 2012–2013	20
5.2.4 Talvi 2013–2014	22
5.2.5 Talvi 2014–2015	24
5.2.6 Talvi 2015–2016	26
5.2.7 Talvi 2016–2017	27
5.2.8 Talvi 2017–2018	29
5.2.9 Talvi 2018–2019	30
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	33
6.1 Sateiden vaikutus routanousuun	33
6.2 Lumipeitteen vaikutus routanousuun.....	33
6.3 Pakkasmäärän vaikutus routanousuun	34
6.4 Roudan syvyyden vaikutus routanousuun.....	34
6.5 Johtopäätökset.....	35
7. LÄHTEET.....	37

1. JOHDANTO

Routiminen on rakentamisessa jatkuvasti ajankohtainen ja tutkimisen arvoinen ilmiö. Ilman tietoa routimisen vaikutuksista väylien ja rakennusten pohjarakenteisiin olisi mahdotonta suojata rakenteita routimiselta ja sen myötä olisi mahdotonta rakentaa kestäviä rakennuksia tai liikenneväyliä. Routimista on tutkittu vuosien saatossa paljon, ja routimista seurataan jatkuvasti muun muassa ratarakenteista. Tämä kandidaatintyöni perustuukin kirjallisuuslähteiden lisäksi juuri ratarakenteista kerättyyn mittausdataan routanoususta.

Aluksi työssäni esitellään routanousuun, ratarakenteisiin ja ratarakenteiden routasuojaukseen liittyvää teoriaa. Tämän jälkeen esittelen routanousun mittausmenetelmiä työhöni valikoituneilla mittauspisteillä. Mittausmenetelmien esittelyn jälkeen analysoin mittaustuloksia ja vertaan niitä vallinneisiin sääolosuhteisiin. Lopuksi teen mittaustulosten ja sääolosuhteiden vertailusta johtopäätelmiä.

Kandityöni ensisijaisena tavoitteena on löytää merkittävimmät routanousun suuruuteen vaikuttavat ilmastotekijät ja tarkastella ilmastonmuutoksen mahdollisia vaikutuksia routimiseen. Mikäli mittaustulosten perusteella havaitaan routimisen kehittyvän tulevaisuudessa johonkin suuntaan, pohditaan myös sitä, tarvitseeko routimisen kehitys mahdollisesti huomioida ratarakenteiden routasuojauksessa. Mikäli kehityksen suuntaa ei pystytä arvioimaan, pohditaan minkälainen ilmaston kehittyminen olisi routimisen kannalta kaikkein kriittisintä.

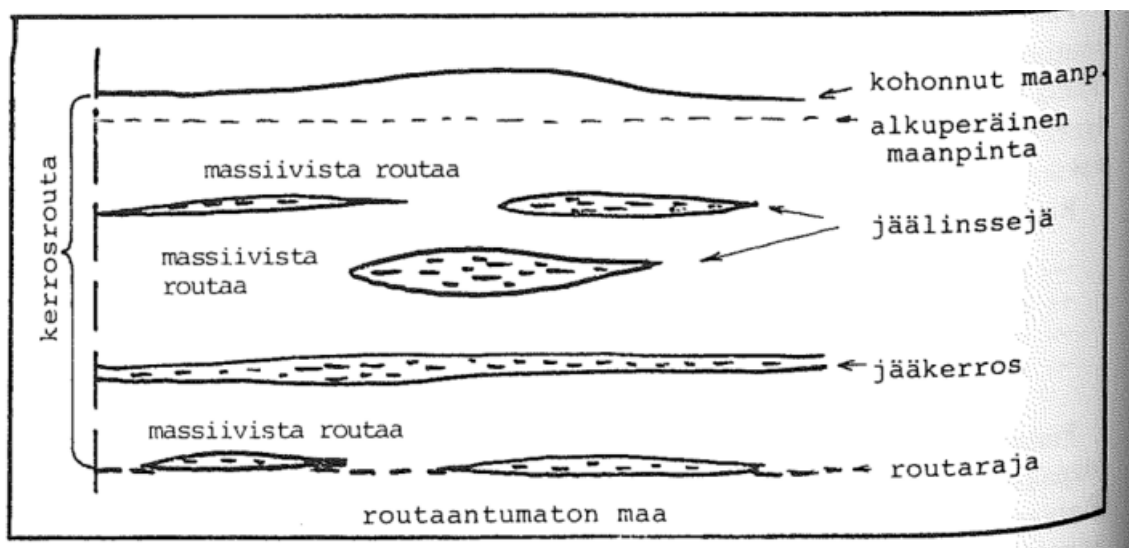
2. TEORIAA

Tässä kappaleessa käsitellään tutkimusaiheeseen liittyvää yleistä teoriaa. Jotta tutkimuksen myöhemmässä vaiheessa voidaan analysoida mittaustuloksia ja tehdä niistä johtopäätöksiä, on ensin tunnettava routimisen yleinen teoria. Tutkimus keskittyy rautatieympäristöön ja aluksi esitellään yleisimmät rautatierakenteet ja niiden routasuojausmenetelmät.

2.1 Routiminen

Routaantuminen tarkoittaa yksinkertaisuudessaan maa-aineksen sisältämän huokosveden jäätymistä. Routaantumista tapahtuu kaikissa maalajeissa, mutta vain osa niistä routii. Maan routaantumista alkaa tapahtua, kun ilman lämpötila laskee alle 0 °C. Maa-aineksen routiminen aiheutuu maassa olevan veden jäätymisestä. Jäätyessään vesi laajenee ja mikäli laajenemiselle ei ole tilaa, aiheutuu muodonmuutoksia, jolloin on kyse maan routimisesta. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 65) Jäätyminen aiheuttama huokosveden tilavuuden kasvu aiheuttaa maan pinnan nousua, jota kutsutaan routanousuksi.

Routatyyppejä on neljää erilaista: pintarouta, onkalarouta, massiivinen routa ja kerrosrouta. Pintarouta, jota kutsutaan myös rousteeksi, tarkoittaa pystysuoria jääneulasia ja sälöjä maan pinnassa. Onkalarouta puolestaan syntyy, kun vesi jäätyy löyhän tai muokatun maan pintakerroksen onkaloiden seinämiin. Onkalaroutaa esiintyy usein esimerkiksi peltomaissa. Massiivinen routa syntyy in situ routimisesta ja sillä tarkoitetaan talvikauden aikana syntyvää routakerrosta, jonka kokonaistilavuus ei muutu, vaikkakin maahuokosissa jäätyvä vesi laajenee n. 9%. (Penttilä 2012, s. 23.) Kerrosroutaksi kutsutaan sitä, kun vaakasuorat jääkerrokset ja jäälinssit vuorottelevat massiivisesti routaantuneiden- ja osittain sulien maakerrosten kanssa. Kerrosrouta aiheuttaa suurta ja epätasaista routanousua ja kuvassa 1 on esitetty sen rakenne. (Murto 2012, s.4.)



Kuva 1. Kerrosroutan rakenne. (Murto 2012, s.6).

Veden jäätyminen routivassa maakerroksessa aiheuttaa tähän maakerrokseen eräänlaisen kuivausvaikutuksen, minkä vuoksi vesi alkaa alemmista sulista ja kosteista

maakerroksista nousta jäätyvään kerrokseen. Jäälinsit syntyvät routivan maan routarajalle sulasta maasta imeytyvästä vedestä ja edellä mainitun ilmiön ansiosta jäälinsit saavat lisää vettä kasvaakseen. (Penner, 1962) Silttimaalajeilla kapillaarinen imu on suurinta ja hiekkamaalajeilla puolestaan jo liian pientä, jotta jäälinsit saisi imettyä vettä sieltä. Savella kapillaarinen imu on kyllä suurta, mutta veden virtausnopeus savessa on pieni. Maa-aineksen routiminen aiheuttaa ylempiin maakerroksiin voimavaikutuksen tai jännityksen, jota kutsutaan routimispaineeksi. Kaikki routanousu ei aina johdu pelkästään jäälinsseistä vaan myös maa-aineksessa olevan huokosveden in situ jäätyminen voi aiheuttaa myös routanousua. Routimiselle on määritelty kolme perusedellytystä, joiden kaikkien on toteuduttava, muutoin routimista ei tapahdu:

1. Vesi
2. Pakkanen
3. Routiva materiaali

(Penttilä 2012, s. 22.)

Jäälinsit tarvitsevat muodostuakseen ja laajentuakseen vettä muodostumispaikalleen. Veden imun taustalla on kolme eri teoriaa, joita ovat primaarinen- ja sekundaarinen routanousuteoria sekä adsorptiovoimateoria. (Penttilä 2012, s. 23.) Primaarinen ja sekundaarinen routanousuteoria eroavat toisistaan siten, että primaarisessa teoriassa jäälinsit muodostuu ainoastaan routarajalla, kun taas sekundaarisessa teoriassa puolestaan linsit muodostuu hieman routarajan kylmemmälle puolelle. Adsorptiovoimateorian mukaan veden jäätyminen tapahtuu sekundaarisen teorian tavoin jäätyneen kerroksen yläpinnassa, mutta veden imuteoriat eroavat toisistaan.

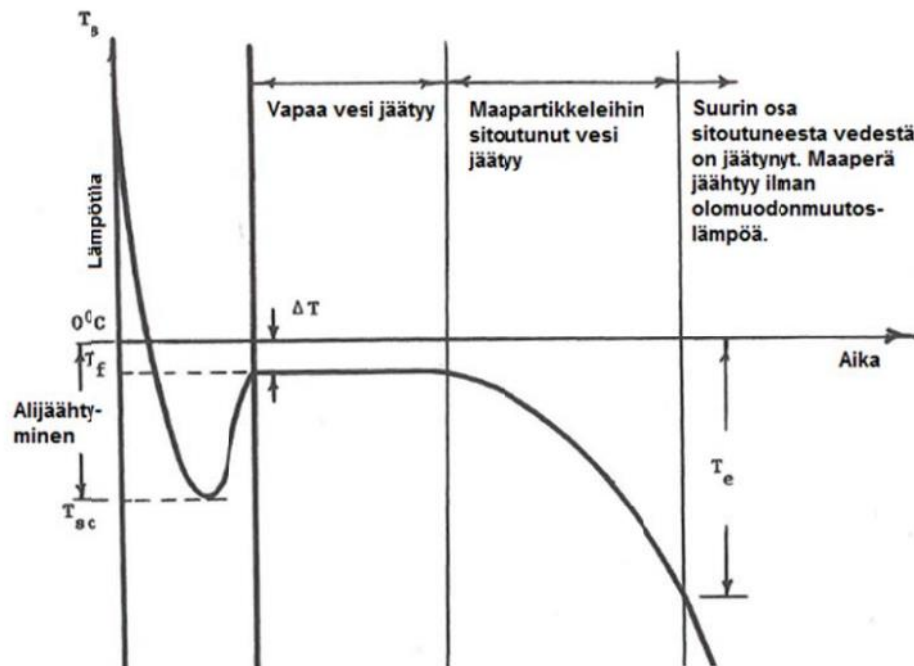
Tämän lisäksi, jotta huokosveden jäätymistä ja jäälinsin muodostumista voisi tapahtua, on lämpötilan oltava alle 0 °C. Näiden kahden kriteerin lisäksi maa-aineksen on myös oltava routivaa, sillä vaikka kaksi ensimmäistä kriteeriä täyttyisikin, niin jos maalaji ei ole routivaa, ei routimista voi tapahtua. (Penttilä 2012, s. 22.) Näiden kolmen tekijän lisäksi huokosveden laajentumisesta aiheutuvan routapaineen tulee olla suurempi kuin ylempien maakerrosten ja rakenteiden paine, jotta tapahtuisi routanousua, eli kyse olisi routimisesta (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 65).

2.1.1 Huokosveden jäätyminen

Ilman viilentyessä ilmaa lämpimämmästä maasta käynnistyy lämpövirtaus kylmään ilmaan. Virtauksen voimakkuuteen vaikuttaa ilman ja maan välisten lämpötilaerojen gradientti. Mitä suurempi lämpötilojen ero on, sitä voimakkaampaa on lämpövirtaus maasta ilmaan. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 44.) Normaalisti puhtaan veden jäätympiste ilmakehän paineessa on 0 °C, mutta maassa oleva vesi jäätyy käytännössä tätä alhaisemmissa lämpötiloissa. Isohakan opinnäytetyön (2013, s. 2) mukaan maassa olevan huokosveden alhaisempaan jäätympisteeseen vaikuttaa se, että osa vedestä on sitoutunut maapartikkeleihin, eikä näin ollen noudata puhtaan veden jäätympistettä. Jäätympisteeseen vaikuttaa veden suolapitoisuus, veden paine sekä huokosten ja huokosveden väliset pintavoimat.

Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu maan sisältämän huokosveden jäätympisprosessia ja lämpötilan muutoksia jäätympisen aikana. Kuten kuvassa näkyy, vapaankaan huokosveden jäätyminen ei ala ennen kuin vesi saavuttaa lämpötilan T_{sc} . Veden jäätympisen alettua, vapautuu jäätympisprosessissa lämpöä maahan, mikä aiheuttaa lämpötilan nousemisen. Kun suurin osa vapaasta vedestä on jäätympis, vähenee jäätympisestä vapautuvan olomuodonmuutoslämpönn määrä, minkä vuoksi lämpötila maassa alkaa laskea. Lämpötilan laskemisen myötä myös maapartikkeleihin sitoutunut vesi alkaa jäätyä, mutta tästä prosessista vapautuva ominaislämpö ei riitä

nostamaan maan lämpötilaa, vaan lämpötila jatkaa laskuaan. Vapaan veden ja suurimman osan maaraakeiden pinnalle sitoutuneesta vedestä jäädyttyä olomuodonmuutoslämpöä ei enää vapaudu ja tällöin maan viileneminen nopeutuu. (Isohaka 2013, s. 22.)



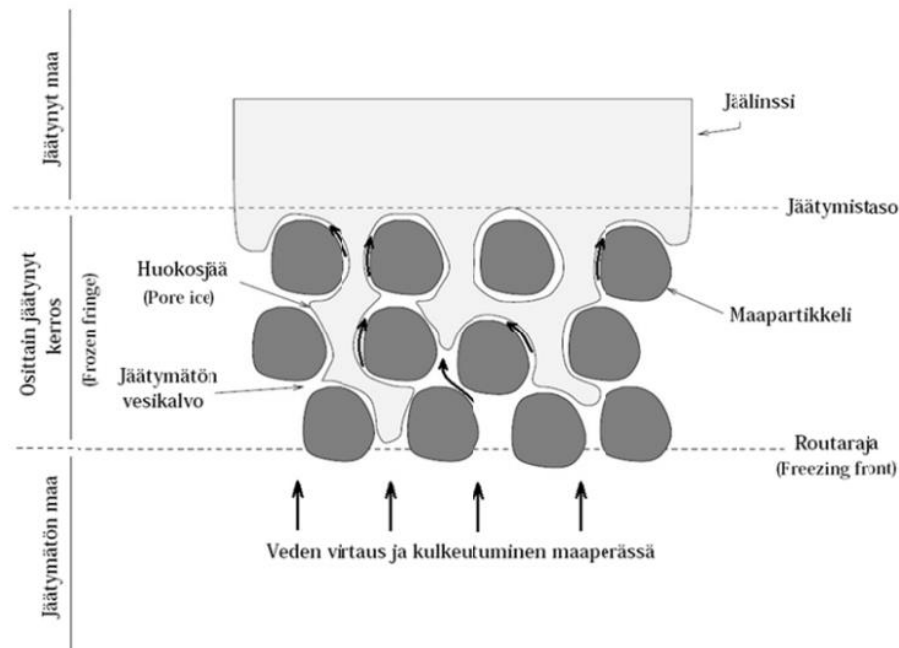
Kuva 2. Lämpötilan kehitys veden jäätyksen aikana (Isohaka 2013 s. 22, muokattu lähteestä Andersland & Ladanyi 2004).

Kuvasta huomataan, että aluksi maahuokosissa oleva vapaa vesi jäätyy, minkä jälkeen maapartikkeleihin sitoutunut vesi alkaa jäätyä ja lämpötila alkaa laskea. Tiukimmin maapartikkeleihin sitoutunut adsorptiovesi ei välttämättä jäädy lainkaan, joten routaantuneessakin maassa saattaa säilyä tietty määrä sulaa vettä. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 44) Jäätymätöntä vettä on alle 0 °C lämpötiloissa eniten hienorakeisissa maalajeissa. Tämä johtuu siitä, että hienorakeisilla maalajeilla on tyypillisesti suurempi ominaispinta-ala kuin karkearakeisilla maalajeilla (Metsovuori 2013, s. 10.) Ominaispinta-ala tarkoittaa maa-aineksessa olevaa raepinta-alaa. Veden sulana pysymiseen ominaispinta-ala vaikuttaa siten, että mitä enemmän on raepinta-alaa, sitä enemmän maapartikkelit pystyvät sitomaan adsorptioveettä suoraan pinnoilleen (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 88).

2.1.2 Osittain jäätyneet vyöhykkeet

Jäätyneen maakerroksen ja routarajan väliin jää osittain jäätyneet vyöhykkeet, jossa suurin osa huokosvedestä on jäätyneet, mutta maapartikkeleiden pinnalla on ohut sulana pysynyt vesikalvo (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 68). Tämän sulana pysyvän vesikalvon kautta vesi pääsee virtaamaan sulasta maasta kasvavaan jäälinssiin ja jäätyneenä pysyvää kerrosta voidaankin pitää edellytyksenä veden kulkeutumiselle jäälinssiin (Isohaka 2013, s. 23). On todettu, että sulaa vettä ja jäätä sisältävä vyöhyke voi olla useita kymmeniä senttimetrejä paksu. Varsinainen osittain jäätyneet vyöhykkeet on kuitenkin huomattavasti tätä ohuempia. Osittain jäätyneen vyöhykkeen paksuus vaihtelee maalajin ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi siltille osittain jäätyneet vyöhykkeet on vain noin 2-4 mm paksu. (Isohaka 2013, s. 24). Alla oleva kuva 3 havainnollistaa, mitä osittain

jäätynyt kerros tarkoittaa ja miten se sijoittuu suhteessa routarajaan ja jäätymistasoon nähden.



Kuva 3. Osittain jäätyneet vyöhykkeet (Isohaka 2013, s. 24).

Kuvasta nähdään, kuinka jäälinssi syntyy jäätyneeseen mahan ja siihen virtaa vettä osittain jäätyneen vyöhykkeen läpi. Jäälinssin kasvua rajoittaa vesimäärä, joka on saatavilla. Jos sulasta maasta virtaa riittävästi vettä jäälinsin syntymispaikalle ja lämpötilagradientti pysyy muuttumattomana, jäälinssi voi kasvaa lähes loputtomasti. (Isohaka 2013, s. 25.) Kun vettä ei ole enää saatavilla tai sen virtaus jäälinssiin jostain muusta syystä loppuu, vähenee myös jäälinsin jäätymisestä muodostuva olomuodonmuutoslämpö, mikä voi aiheuttaa stabiilin tilan häiriintymisen ja routaraja voi jatkaa etenemistään (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 69.) Routarajan edetessä yhä syvemmälle lämpötila osittain jäätyneen vyöhykkeen yläosassa laskee ja sen vedenläpäisevyys heikkenee niin huomattavasti, että veden virtaus jäälinssiin loppuu käytännössä kokonaan. Tämän jälkeen vesi alkaa kertyä uuteen paikkaan edellisen jäälinssin alapuolelle, missä on saatavilla tarpeeksi vettä uudelle kasvavalle jäälinsille. (Isohaka 2013, s. 25.) Uuden linssin syntymiseen tai sen syntymispaikkaan vaikuttaa sen hetkisen osittain jäätyneen vyöhykkeen vedenläpäisevyys ja maaperässä saatavilla oleva vesi. Tämä prosessi toistuu ja uusia jäälinssejä syntyy niin kauan, kunnes routaraja pysähtyy.

2.1.3 In situ routanousu

Kun maan jäätyminen etenee tarpeeksi nopeasti, routarajalle ei ehdi imeytyä tarpeeksi vettä, jotta jäälinsien muodostuminen olisi mahdollista. Tällöin on kyseessä In situ routanousu, joka syntyy maan sisältämän huokosveden jäätyessä. In situ routanousua saattaa esiintyä routimattomassa kokonaan tai lähes kokonaan vedellä kyllästyneessä maassa, koska jäätyessään maan sisältämän huokosveden tilavuus kasvaa noin 9 %. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 65). Edellytys in situ routanousulle on, että jäätyessään huokosvesi ei enää mahdu maahuokosiin, eikä se pääse jäätyvän veden aiheuttaman paineen vaikutuksesta purkautumaan huokosista maan tilavuutta kasvattamatta.

In situ routanousua voidaan laskennallisesti arvioida kaavalla 1 (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 66):

$$\Delta h_i = 0,09 \times n \times \Delta X, \quad (1)$$

jossa n on maakerroksen huokoisuus ja ΔX on tarkasteltavan kerroksen paksuus. In situ routanousua arvioitaessa on tiedettävä, huokostilavuus, kuinka täynnä huokokset ovat vettä ja minkä paksuinen maakerros jäätyy. Kaava 1 ei ota huomioon maassa alle 0 °C lämpötilassa sulana pysyvän veden määrää, mutta käytännön laskelmissa sulan veden määrä on merkityksettömän pieni. Väylän julkaisussa 22/ 2015 on esitetty myös kaava 2, joka on johdettu kaavasta 1. Kaavan 2 avulla voidaan laskea in situ routanousu vesipitoisuuden avulla osittain kyllästyneelle maa-ainekselle

$$\Delta h_i = 0,09 \times w_a \times \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \times d_a, \quad (2)$$

jossa

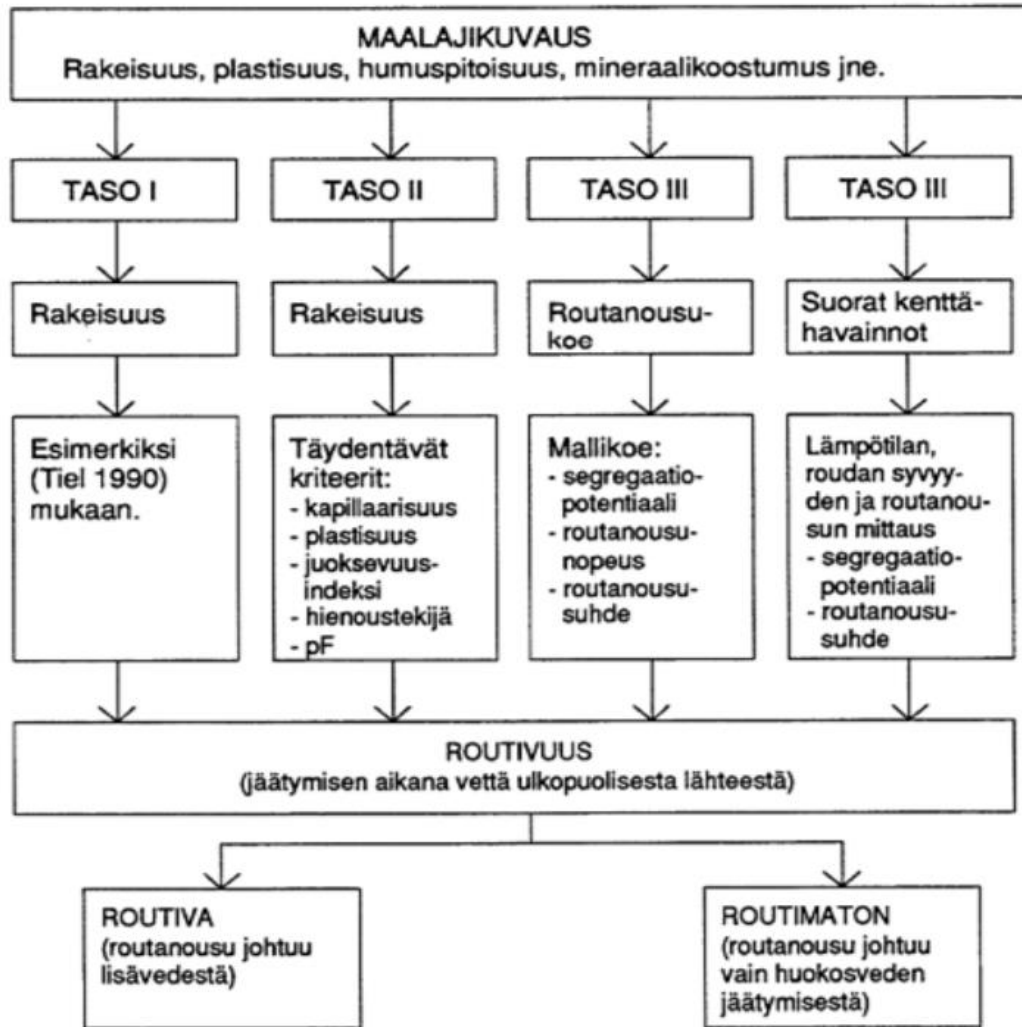
w_a on maan vesipitoisuus [p-%], γ_a on maan kuivatilavuuspaino [kN/m³], γ_w on veden tilavuuspaino [9,8 kN/m³] ja d_a on jäätyvän maakerroksen paksuus [mm].

Kyllästymättömässä maaperässä, jossa on tavanomainen huokosluku ja vesipitoisuus, in situ routanousun on havaittu olevan keskimäärin 2-3% jäätyvän maakerroksen paksuudesta. In situ routanousua ei pidetä kovin merkityksellisenä, mutta rakentamisessa sekin täytyy ottaa huomioon. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 66.)

2.2 Roudan syvyys ja routivuuteen vaikuttavat tekijät

Roudan syvyydellä tarkoitetaan jäätyneen maakerroksen paksuutta. Maan jäätyneen etenemistä kuvataan routarajalla, joka tarkoittaa jäätyneen maakerroksen alarajaa. Routaraja siis kuvaa 0 °C -rajan etäisyyttä maan pinnasta. Maan pinnan ja routarajan välissä, eli maan lämpötilan ollessa alle 0 °C oletetaan huokosveden olevan jäässä. Näin ei kuitenkaan aina ole, sillä routaraja on myös osittain jäätyneen vyöhykkeen alapuolella ja osittain jäätyneessä vyöhykkeessä on myös sulana pysynyttä vettä. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 44)

Eri maalajien routivuutta pystytään arvioimaan karkeasti esimerkiksi maa-aineksen rakeisuuden avulla. Jotta routivuutta voitaisiin arvioida tarkemmin, on maalaji ja sen kapillaarisuus kuitenkin arvioitava laboratoriossa. Alla olevassa kuvassa on esitetty perusteita, joiden avulla voidaan arvioida maalajin routivuutta.

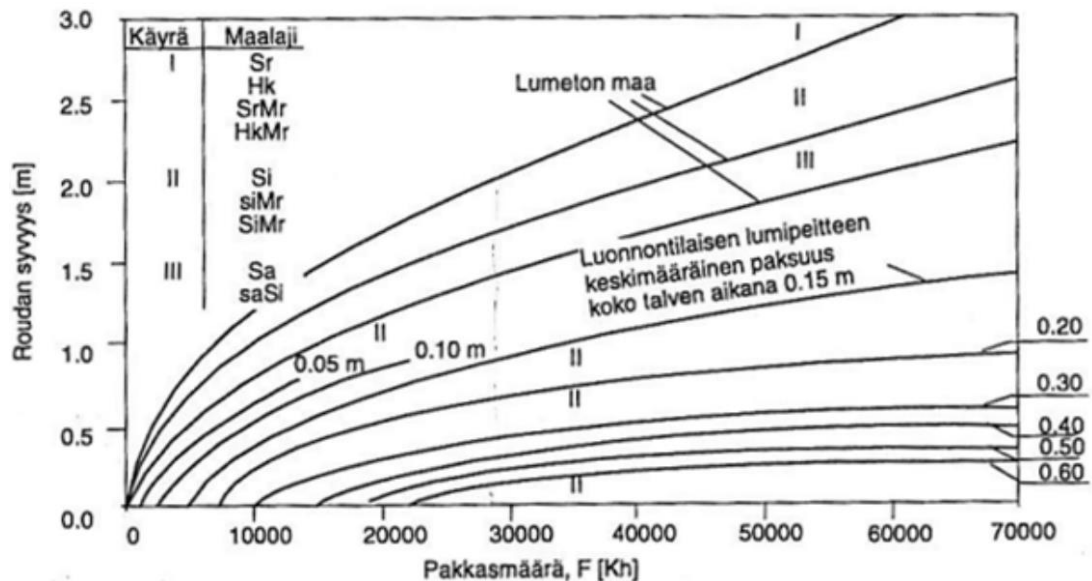


Kuva 4. Maalajien routivuuksien arviointiperusteet (Penttilä 2012 s. 27, muokattu lähteestä ISSMFE 1989).

Kuvan avulla voidaan karkeasti arvioida maalajin routivuutta, mutta routivuuteen vaikuttaa kuitenkin veden saatavilla olo, joten myös paikalla, jossa maa-aines on, on merkitystä.

Roudan syvyyteen vaikuttavista tekijöistä merkittävimpiä ovat lumikerroksen paksuus ja pakkasmäärä (Huttunen & Soveri 1993, s. 12). Karkeilla maalajeilla roudantumista tapahtuu syvemmälle, kuin hienorakeisilla maalajeilla ja eloperäisillä maalajeilla roudantuminen on yleensä kaikista pienintä (Soininen 2013 s. 24). Tyypillisesti karkealla hiekalla ja puhtaalla soralla routanousu on pientä, kun taas hienoilla hiekoilla ja silttimaalajeilla routanousu voi olla hyvin suurta. Savimailla routanousu tapahtuu yleensä hitaasti, mutta routimispaine on suuri. Silteillä routanousun nopeus on suuri, mutta routimispaine melko pieni. Routanousun ennakointi vaikeutuu huomattavasti, kun maalajit ovat sekoittuneet keskenään ja esimerkiksi soran, hiekan tai silti seassa on savea. (Penner, 1962) Tämän lisäksi maastotyyppillä ja maaperän maalajilla on merkitystä. Roudan muodostumiseen ja sen sulamiseen vaikuttavat myös pohjaveden pinnan taso ja muut vesistöolosuhteet. Maastotyyppi tulee merkittäväksi tekijäksi lumen kasautumisen myötä. Esimerkiksi kuusimetsässä rouda tunkeutuu syvemmälle kuin aukeilla paikoilla tai lehti- ja mäntymetsissä. Suuri osa lumesta jää kuusten tiheään oksastoon, eikä pääse maan pinnalle muodostamaan eristävää kerrosta. Lehti- ja mäntymetsissä roudan syvyys on yleensä pienempää kuin aukeilla paikoilla, sillä metsien puusto kasaa maaperää suojaavan lumipeitteen maan pinnalle. Aukeilla

paikoilla tuuli saattaa tuiskuttaa lunta muualle, eikä sitä tällöin jää niin paljoa suojaamaan maaperää. Myös lumen tulon ajankohta suhteessa pakkasten alkamiseen ajankohtaan aiheuttaa alueellisia eroja roudan muodostumisessa ja sulamisessa (Huttunen & Soveri 1993, s. 3). Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu lumikerroksen paksuuden ja pakkasmäärän vaikutusta roudan syvyyteen eri maalajiryhmillä.



Kuva 5. Lumipeitteen ja pakkasmäärän vaikutus roudan syvyyteen eri maalajiryhmillä. (Penttilä 2012, s. 16, muokattu lähteestä Soveri ja Varjo 1977).

Suurin ero karkea- ja hienorakeisten maalajien routimisessa aiheutuu vesipitoisuuksien ja lämmönjohtokyvyn eroista. Hienorakeisten maalajien kosteuspitoisuus on huomattavasti suurempi, kuin karkearakeisten maalajien, sillä karkeat maalajit eivät pysty sitomaan vettä pinnalleen yhtä tehokkaasti kuin hienorakeiset. (Penttilä 2012, s. 16) Lämpö voi siirtyä maassa kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiona tai säteilemällä. Lämmön siirtyminen konvektiona tarkoittaa, että lämpö kulkeutuu, nesteinä tai höyrynä olevan veden tai ilman avulla. Lämmön siirtyminen säteilemällä tarkoittaa sitä, että lämpö siirtyy sähkömagneettisina aaltoina. Johtumalla tapahtuva lämmön siirtyminen puolestaan onnistuu maaraakeiden ja rakeiden sidosvesien tai huokosilman kautta. (Kujala 1994, s. 35)

2.3 Roudan syvyyden laskeminen

Yksinkertaisin laskentamalli roudan syvyyden laskemiseen on Stefanin kaava (3), jossa roudan syvyys riippuu pakkasmäärästä.

$$z = k\sqrt{F}, \quad (3)$$

jossa z on roudan syvyys, F on pakkasmäärä, k on maalajikerroin. Maalajikerroin k saadaan laskettua kaavalla (4):

$$k = \sqrt{\frac{2\lambda}{L}}, \quad (4)$$

jossa λ on lämmönjohtavuus ja L on jäätymislämpö.

Tarkemmissa laskelmissa tulee kuitenkin käyttää enemmän reunaehtoja huomioivia Fourierin differentiaalisia kaavoja. Kaavassa käytettävä maalajikerroin k huomioi maalajityypin. Lumen eristävyys voidaan ottaa huomioon pienentämällä maahan vaikuttavaa pakkasmäärää korjauskertoimella. Korjattu pakkasmäärä saadaan kaavasta (5).

$$F_{red} = a \times F, \quad (5)$$

jossa F_{red} on korjauskertoimella korjattu pakkasmäärä ja a on korjauskerroin pakkasmäärälle.

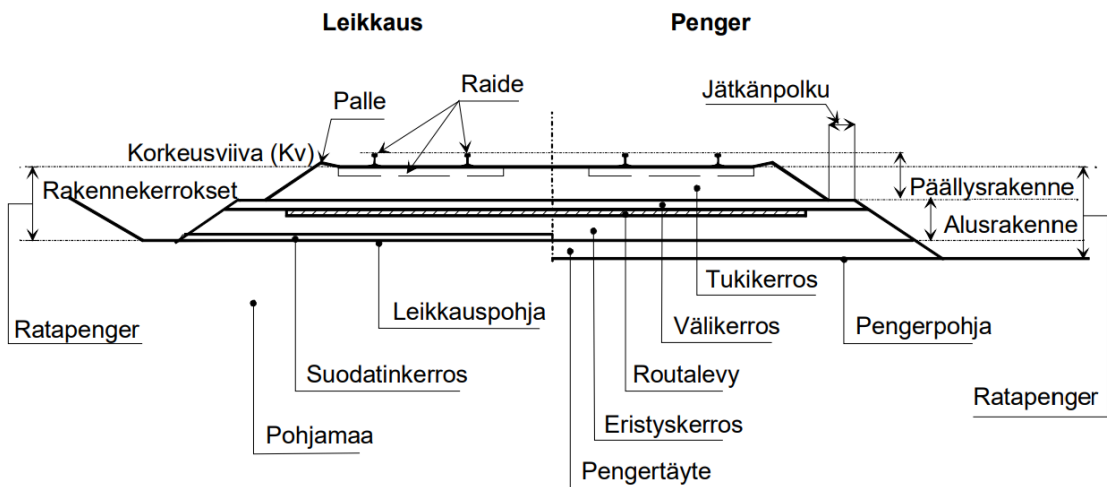
Korjauskerroin saadaan kuvaajista, jotka on tehty pakkasmäärän ja lumen syvyyden funktiona. Jotta Stefanin kaavalla (3) pystyttäisiin tarkasti laskemaan roudan syvyys, täytyy korjauskertoimella huomioida kaavassa (6) esitettyyn tapaan myös maan tilavuuslämpökapasiteetti, eli jäätyvän maan jäähtymislämpö maasta routaantumisen aikana poistuvan lämpömäärän osakomponenttina.

$$z = \psi \times k\sqrt{F}, \quad (6)$$

jossa ψ on maan lämpökapasiteetin huomioiva korjauskerroin. (Penttilä 2012, s. 33-34.)

3. RATARAKENTEET JA NIIDEN ROUTASUOJAUS

Ratarakenteiden routasuojauksen suunnittelun tavoitteena on pitää routanoususta aiheutuvien ratarakenteiden vaurioiden riski hallinnassa (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 9). Lähtökohtaisesti ratarakenteisiin ei laiteta routaeristeitä. Jos radan pohjamaa kuitenkin on routivaa ja routimattomien rakennekerrosten yhteispaksuus on riittämätön estämään roudan tunkeutumisen routiviin kerroksiin laskennallisella mitoituspakkasmäärällä, käytetään rakenteissa erillisiä routaeristeitä. Tämä on tyypillisempää vanhoilla radoilla, joiden rakenne ei välttämättä vastaa nykyisiä mitoituksia. Ratarakenteet saavat routaantua, kunhan ne eivät roudi. (Isohaka 2013, s. 4). Alla olevassa kuvassa on esitetty ratarakenteen poikkileikkaus ja sen radan rakenne.



Kuva 6. Ratarakenne (RATO 3 2018, s. 8).

Ratarakenne jaetaan kahteen osaan: alusrakenteisiin ja päällysrakenteisiin. Päällysrakenteet käsittävää tukikerroksen ja raiteet ja alusrakenteisiin puolestaan kuuluvat väli- ja eristyskerros, sekä mahdollisesti suodatinkerros. Ratarakenteiden aluskerrokset mitoitetaan 100 vuoden ja tukikerros 40 vuoden käyttöikävaatimukseen.

Ratarakenteen tukikerroksen tulee muodostaa tukeva ja kantava alusta raiteille ja sen tulee myös mahdollistaa ratarakenteen tehokas kuivatus materiaaliensa puolesta. Tukikerroksessa käytetään useimmiten raidesepeä, mutta vähäliikenteisemmällä radoilla voidaan käyttää myös raidesoraa. (RATO 3, s. 8)

Välikerros muodostaa tasaisen ja kantavan pohjan tukikerrokselle ja se estää eristys- ja tukikerroksen sekoittumisen, lisää radan kantavuutta ja ehkäisee routahaittoja. Tämän lisäksi välikerros on vettä läpisevä kerros ja siinä käytetään yleensä routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomurskettä. (RATO 3, s. 8)

Eristyskerros puolestaan jakaa junaliikenteestä aiheutuvat kuormat alemmille kerroksille, sekä maa- ja kalliopohjalle. Se myös vähentää tai estää alla olevien maakerrosten ja pohjamaan routimisen ja routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia. Eristyskerros myös pysäyttää veden kapillaarisen nousun. Eristyskerroksessa käytetään routimattomia materiaaleja (Penttilä 2012, s. 12)

Suodatinkerros estää rakennekerroksien sekoittumisen pohjamaahan ja pyrkii estämään alla olevan pohjamaan routimista ja routimisesta radalle aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia. Suodatinkerrosta ei aina käytetä, vaan sen tarve arvioidaan eristyskerroksen ja pohjamaan raekokosuhteen perusteella ja sen materiaalin tulee olla routimatonta. (RATO 3, s. 8)

Ratapenkereellä tarkoitetaan radan rakennekerroksia ja mahdollista pengertäytettä. Pengertäytöllä tasoitetaan maanpinnan luonnollisia korkeusvaihteluita niin, että radan rakennekerrokset voidaan rakentaa sen päälle. Pengertäyte tarjoaa tasalaatuisen ja ominaisuuksiltaan luonnonmaapohjaa vastaavan alustan radan rakenteille. (RATO 3, s. 7)

Useat ratarakenteet Suomen rataverkolla ovat routivia, vaikka nykyvaatimusten mukaan kaikkien ratarakennemateriaalien täytyy olla routimattomia. Tämä johtuu siitä, että alusrakenteessa käytettäviä materiaaleja koskeva laatuvaatimus on asetettu vasta 1960-luvulla. Suurin osa suomen rataverkon alusrakenteista on rakennettu alun perin 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa, jolloin rakennustavat ja -materiaalit olivat luonnollisesti kaukana nykyisistä menetelmistä ja ohjeistuksesta. (Isohaka 2013, s. 5) Tuolloin ratarakenteissa käytettävien materiaalien laatu ja käyttökelpoisuus arvioitiin silmämääräisesti. Kunkin aikakauden tapojen ja vaatimusten mukaiset rakennekerrokset on monesti rakennettu vanhojen rakenteiden päälle, minkä vuoksi alusrakenteissa on erilaisia materiaaleja, eivätkä rakennekerrospaksuudet ole välttämättä riittäviä. Isohakan opinnäytetyön (2013, s. 5) mukaan rakennekerrokseen voi tulla routivaa materiaalia myös pengertäytteestä tai pohjamaasta sillä ajan saatossa alusrakennekerroksen alaosa voi sekoittua pohjamaahan tai pengertäytteeseen. Tukikerroksen ja aluskerroksen materiaaleissa tapahtuu vuosien saatossa myös hienonemista kuormituksen ja värinän seurauksena. Hienonemisen ja rakennekerrosten sekoittumisen täyttö- tai pohjamaahan seurauksena rakenteissa oleva hienoainemäärä lisääntyy ja tämä altistaa rakenteita routimiselle.

Radoilla käytettävät routasuojauksen mitoitusmenetelmät jaetaan roudan syvyyden ja routanousun laskentaan perustuviin menetelmiin (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s.9). Laskelmilla, jotka perustuvat roudan syvyyteen, pyritään mitoittamaan radan rakennekerroksien paksuus sellaiseksi, että roudan tunkeutuminen routivaan maahan mitoituslaskelmana estyy kokonaan. Tällöin routimisesta aiheutuvaa routanousua ei periaatteessa esiinny ollenkaan. Mikäli rakennekerrosten maa-aines kuitenkin on täysin veden kyllästämää, voi huokosveden jäätyminen ja siitä aiheutuva tilavuuden kasvu aiheuttaa routanousua. Roudan syvyyteen perustuvien laskelmien lähtökohtana on se, että jäälinssien syntyminen, eli routimista, ei sallita lainkaan.

Routanousun laskentaan perustuvat mitoitusmenetelmät poikkeavat roudan syvyyteen perustuvista menetelmistä siten, että niissä sallitaan tietyn suuruinen routanousu mitoituslaskelmana. Näin ollen roudan tunkeutuminen routivaan maahan sallitaan tietyltä paksuudelta, joka määräytyy maan routivuuden ja sallitun routanousun suuruuden perusteella. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 9) Raiteiden suurista tasaisuusvaatimuksista johtuen sallitut routanousut ovat hyvin pieniä ja yleensä käytetään roudan syvyyteen perustuvia mitoitusmenetelmiä, eli radan rakenteet mitoitetaan sellaisiksi, ettei routa pääse mitoituslaskelmana lainkaan tunkeutumaan routivaan maahan.

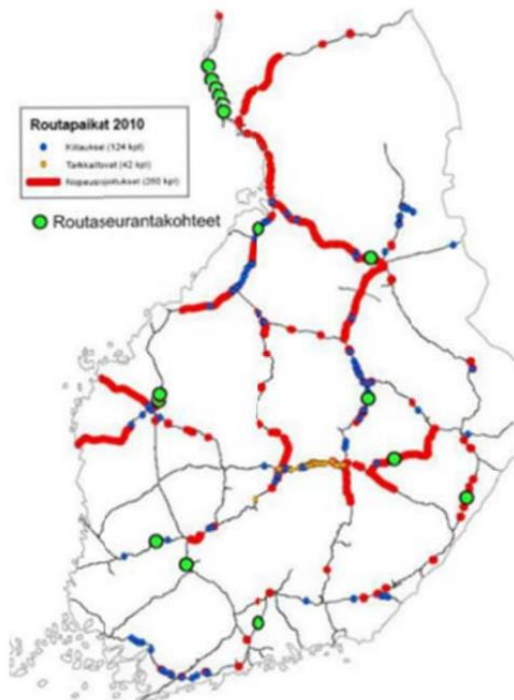
Nurmikolu & Kolisoja (2002, s. 9–10) mukaan tätä periaatetta puoltaa myös se, että mitoitusoptimiin pyrkimisellä ei saavuteta merkittäviä hyötyjä radan rakennuskustannuksissa verrattuna mahdollisiin routahaitoista aiheutuviin liikennöintinopeuden rajoituksiin ja kunnossapitokustannuksiin. Nykyisen ohjeistuksen mukaan radat rakennetaan mitoituslaskelmana käytännössä routimattomiksi. Metsovuoren opinnäytetyön (2013, s. 6) mukaan tämä johtaa siihen, että routamitoitus on pengerspaksuuden kannalta määräävä tekijä, eikä erillistä kantavuusmitoitusta tehdä. Tämä johtaa ilmasto-olosuhteista riippuen 2–2,6 metrin routimattomaan rakennekerrospaksuuteen. Maa-aineksien lämmönjohtamiskyvyissä on eroja ja tämä on huomioitu siten, että kalliomursketta käytettäessä tulee kerrospaksuutta kasvattaa eristys- ja välikerroksessa 15% verrattuna luonnon hiekkaan ja soraan (RATO 3, s.22).

4. MITTAUKSET

Radan liikennöitävyyden ja tasaisuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että rata on routimaton. Radan rakennemateriaalit on valittu aina radan rakennusajan käytäntöjen mukaan ja materiaalien valinta perustui silmämääräiseen arviointiin aina 1960- luvulle asti. Tämän vuoksi ratarakenteisiin on saatettu laittaa materiaaleja, jotka eivät enää nykypäivänä täytä routimattomuusvaatimuksia. Ratarakenteita on vuosien varrella tutkittu paljon ja niistä on otettu lukuisia näytteitä, joista osan on routanousukokeissa havaittu olevan routivia. Routivia näytteitä on saatu myös rataosuuksilta, joita ei ole havaittu routiviksi. (Luomala 2010, s. 10.)

4.1 Mittaukset Suomen rataverkolla

Vuosina 2008–2010 Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö rakensi Suomen rataverkolle seurantapisteistön ratarakenteiden routaantumisen ja routimisen tutkimista varten. Näissä pisteissä mitataan hieman pisteestä riippuen ratarakenteen lämpötilaa, kosteutta ja ratapölkyn pystysuuntaista liikettä. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 105.) Seurantapisteet on sijoitettu eri puolille Suomea, jotta saataisiin tutkittua routimista mahdollisimman kattavasti eri ilmasto-olosuhteissa.



Kuva 7. Rataverkolle rakennetut roudan seurantapisteet vuoden 2010 routapaikkojen karttapohjalle sijoitettuna (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 105).

Yllä olevassa kuvassa on esitetty routaseurantapisteiden sijainti Suomen rataverkolla. Pisteiden sijoittelu on tehty rataverkon kunnossapitäjiltä saatujen routapaikkailmoitusten, sekä roudanhallintaraporteista saatujen tietojen perusteella. Pisteiden tarkemmassa asemoinnissa on käytetty apuna myös radantarkastusvaunun mittaustuloksia (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 105). Alla olevassa taulukossa on esitetty roudan seurantapisteiden sijainti, rakennekerrospaksuudet, antureiden määrä ja mittaussyvyudet.

Taulukko 1. Rataverkon roudan seurantapisteeet, rakennepaksuudet, antureiden määrä ja mittaussyvytydet. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 118).

Seurantapistee ja sijainti		Rakennepaksuudet [m]	Instrumentointi: antureita [kpl] (mittaussyvyys min...max) [m]				
Rata-osa	Nimi		tuki-	alus-	yht.	lämpötila	kosteus
TOR-KLI	899+498	Tornio 1	0,6	2,0	2,6	12 (0,1...2,8)	ei
	909+600	Tornio 2	0,6	1,6	2,2	12 (0,1...3,1)	ei
	921+050	Niemenpää 2	0,5	1,1	1,6	36 (0,1...3,2)	4 (1...1,6)
	925+610	Niemenpää 1	0,5	1,5	2,0	36 (0,1...2,6)	4 (0,6...1,2)
	932+135	Ylitornio 2	0,5	0,9	1,4	32 (0,1...2,8)	10 (0,2...2,2)
	945+060	Ylitornio 1	0,5	0,8	1,3	32 (0,1...2,7)	10 (0,2...2,3)
SK-OL	732+527	Liminka	0,9 ¹⁾	0,5	1,5 ³⁾	12 (0,1...3,1)	ei
PM-KUO	442+260	Kuopio	0,5 ¹⁾	0,7	1,2 ³⁾	36 (0,2...2,0)	10 (0,2...1,7)
PM-JNS	445+300	Varkaus	0,6	0,5	1,1	36 (0,2...2,4)	10 (0,2...1,8)
PAR-JNS	441+725	Kitee	0,6	0,9	1,5	36 (0,2...2,7)	10 (0,1...2,0)
LLH-KKI	225+266	Karkku	0,7	0,5	1,2	12 (0,1...2,9)	ei
RI-TPE	156+287	Viiala	0,7	0,5 ²⁾	1,2 ³⁾	12 (0,1...3,1)	ei
OL-KON	898+050	Paltamo	0,6	1,5	2,1	36 (0,2...3,1)	10 (0,2...1,9)
KE-HLT	65+079	Mäntsälä	0,6	2,0	2,6	12 (0,1...2,6)	ei
päälysrakenneluokka:		sähköistys:	¹⁾ tukikerroksen alla 50 mm EPS-levy ²⁾ alusrakenteen alla 100 mm XPS-levy ³⁾ sisältää routaeristelevyn				
D	C ₂	kyllä					
C ₁		ei					

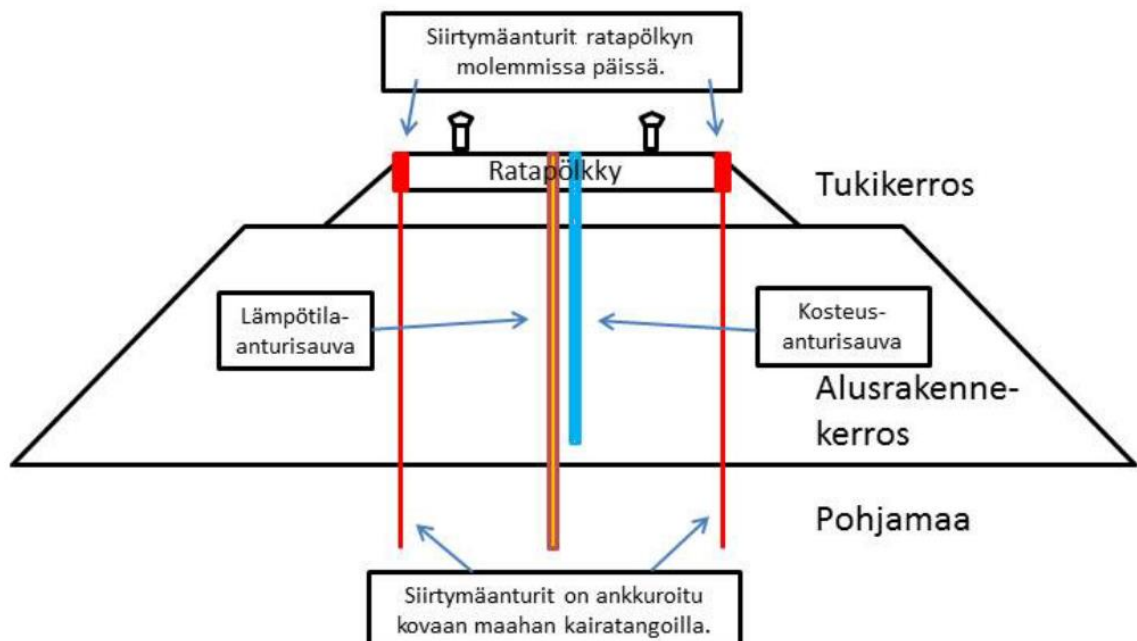
4.2 Mittausmenetelmät

Mittauspisteillä ulkoilman lämpötila mitataan kaikissa kohteissa noin 1,5 metrin korkeudelta maan pinnasta ja lämpötila-anturi on sijoitettu monikerroksisen lämpökilven sisään. Tällä tavalla saadaan estettyä auringon vaikutuksen aiheuttamat virheet lämpötilan mittauksessa ja mittaustulos saadaan vastaamaan lämpötilaa varjossa (Luomala 2010, s. 50). Roudan mittaamisen kannalta on hyvin oleellista mitata rakennekerrosten lämpötiloja. Lämpötilan mittaus ratarakenteista toteutetaan anturisauvalla, jonka mittaa lämpötiloja eri syvyyksillä ratarakenteissa ja mittausten perusteella voidaan tarkkailla routarajan etenemistä. Ratarakenteiden lämpötilan mittauksissa käytetään oletusta, että routa ei tunkeudu millään kohteella syvemmälle kuin kaksi metriä. (Penttilä 2013, s. 40) Itse routanousun mittaaminen tapahtuu ratarakenteisiin upotetun kolme metriä pitkän tangon avulla. Ankkuritanko on sijoitettu suojaputkeen kahden metrin syvyyteen saakka ja tangon yläpäähän on kiinnitetty vastinkappale siirtymäanturia varten. Siirtymäanturi on kiinnitetty suoraan ratapölkkyyn. Anturin suojakotelo on asennettu siten, että se mahdollistaa ratapölkyn parin millimetrin dynaamisen liikkeen ilman, että suojakotelo liikkuu. Mittausanturi on asennettu niin, että

routanousu liikuttaa karaa väkisin, vaikka anturi olisikin hieman kuurassa. (Luomala 2010, s. 48.)

Ideana mittauksessa on, että ratarakenteeseen upotettu ankkuritanko pysyy paikallaan ja ratapölkyn päähän sijoitettu anturi mittaa ratapölkyn pystysuuntaista liikettä suhteessa ankkuritangon päässä olevaan vastakappaleeseen. Ankkuritanko asennetaan kaksi metriä pitkään suojaputkeen, sillä oletus on, että ratarakenne jäätyy maksimissaan kahden metrin syvyyteen saakka. Suojaputkella estetään maa-aineksen jäätyminen kiinni ankkuritankoon ja ankkuritangon nouseminen routanousun mukana.

Mittauspisteiden kosteutta seurataan 2009 ja 2010 asennetuissa pisteissä. Kosteuden mittaamiseen ja seurantaan käytetään antureita, joiden toiminta perustuu dielektrisyden mittaamiseen. Jäätyneen veden dielektrisyys on huomattavasti pienempi, kuin sulan veden. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 119.) Tällöin rakenteissa olevan veden jäätyessä kosteusantureiden lukema pienenee huomattavasti. Kosteutta mittaavat anturit on asennettu reiätetyn hiekalla täytetyn muoviputken sisään. Suurimmassa osassa mittauspisteitä antureita on 10 kpl/seurantapiste, mutta seurantapisteissä Niemenpää 1 ja Niemenpää 2 antureita on vain neljä syvyyksillä 0,6–1,6 m. Muiden mittauspisteiden anturit on asennettu 0,1–2,2 m syvyydelle. (Pylkkänen & Nurmikolu, 2015, s. 119.) Alla olevassa kuvassa on esitetty poikkileikkaus mittausmenetelmästä havainnollistamaan mittalaitteiston toimintaa.



Kuva 8. Routamittauslaitteiston periaatekuva (Penttilä 2013, s. 41).

5. MITTAUSTULOSTEN JA ILMASTO- OLOSUHTEIDEN VERTAILU

Tarkasteltavaksi mittauspaikaksi valittiin Varkauden routaseuranta-asema sen vuoksi, että siellä on ollut poikkeuksellisen suuria ongelmia roudan kanssa, mikä tekee siitä mielenkiintoisen kohteen tutkimusta ajatellen. Kuten taulukosta 1 nähdään, Varkauden mittauspisteellä radan rakennekerrosten kokonaispaksuus on ohuin kaikista mittauspisteistä, eikä radan rakenteissa ole sillä kohtaa mitään erillistä routasuojausta, kuten joissain muissa pisteissä. Routimiseen vaikuttavien ilmastotekijöiden löytämiseksi on välttämätöntä vertailla routamittauspisteiltä kerättyä dataa Ilmatieteen laitoksen keräämään ilmastodataan. Tässä työssä tämä vertailu tehdään vain työhön valikoituneella Varkauden mittauspisteellä, joten otanta on suppea, minkä vuoksi johtopäätösten tekeminen on haastavaa. Vertailun tulokset voivat kuitenkin antaa suuntaa siitä, mitkä ovat routimisen kannalta kriittisimpiä ilmastotekijöitä, millaisten sääolosuhteiden yhdistelmä on routimiselle kaikkein otollisin ja löytyykö ilmaston ja routimisen kehitykselle jokin suunta, joka tulisi suunnittelussa ottaa huomioon.

5.1 Ilmastodatan esittely

Alla olevaan taulukkoon 2 on koostettu sadekertymä kahdelta kuukaudelta ennen pakkasten alkamista, koko pakkasjakson pakkasmäärä, lumen syvyys maaliskuun ensimmäisenä päivänä, roudan maksimisyyvyys, sekä siirtymäantureiden ilmaiset routanousut. Vaikka lumen syvyys maaliskuun ensimmäisenä päivänä on taulukkoon laskettu, ei sen avulla voida tarkastella lumipeitteen vaikutusta routimiseen. Lumimäärä yhtenä tietynä päivänä ei kerro lumisateiden ajoittumisesta tarkastelujaksolle. Oleellisempaa on tarkastella lumen syvyydestä piirrettyjä kuvaajia ja verrata niitä ilman lämpötilakuvaajin, jolloin nähdään, millainen on pakkasten ja lumen tulon suhde. Lumen syvyyden arvot ovat siis vain suuntaa antavaa informaatiota. Pakkasmäärät on laskettu koko tarkastelujakson ajalta, eli ensimmäisestä syksyn pakkasesta siihen asti, kun lumet ovat sulaneet, tai lämpötila on viimeisen kerran pakkasella. Tämä ei täysin vastaa virallista tapaa, jonka mukaan laskenta tulisi lopettaa, mikäli viimeisiä pakkaslämpötiloja edeltää lämmin jakso, jonka lämpösumma on suurempi, kuin seuraavan pakkasjakson. Vastaavasti laskenta tulisi aloittaa vasta pakkasjaksosta, jonka jälkeen ei enää seuraa lämmintä jaksoa, jonka lämpösumma olisi suurempi, kuin menneen pakkasjakson. (Kivikoski & Saarelainen, 2000.) Käytetty laskentatapa saattaa väristää pakkasmääriä ja saa ne näyttämään pienemmiltä, kuin mitä pakkasmäärät yleensä Suomessa ovat, mutta vastaavasti tällä tavalla laskettuna saadaan tarkasteltua koko tarkastelujakson pakkasmäärää.

Taulukko 2. Kooste ilmastotiedoista ja routamittauksista

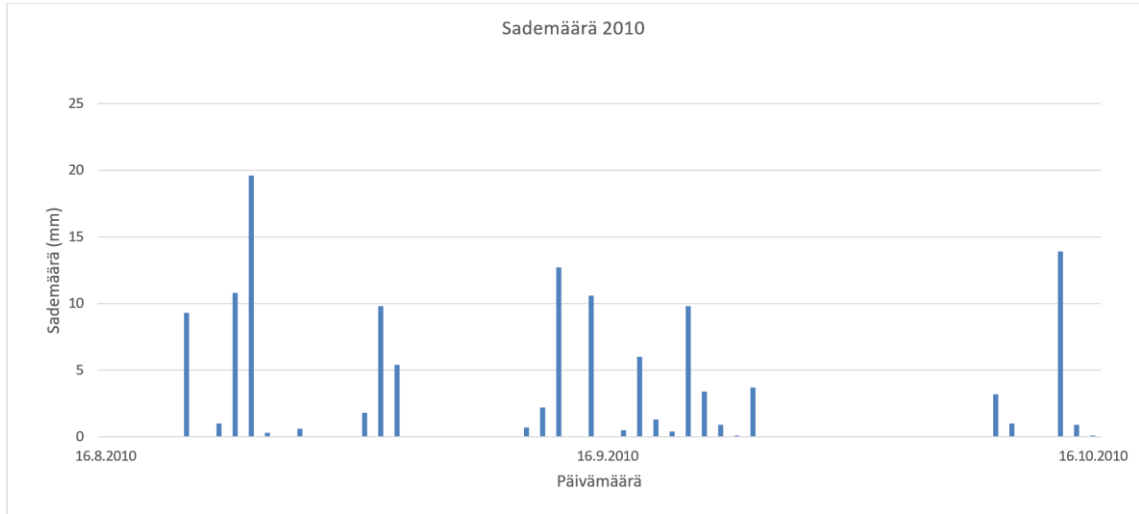
Vuosi	Sademäärä (mm)	Pakkasmäärä (Kh)	Lumen syvyys (cm)	1.3. Roudan syvyys (m)	Routanousu S1 anturi (mm)	Routanousu S2 anturi (mm)
2010–2011	130	29 500	73	1,4	18	18
2011–2012	145	14 500	52	1,3	5	9
2012–2013	172	21 500	36	1,2	6	8
2013–2014	179	7 900	6	1,2	6	7
2014–2015	177	6 800	28	0,9	2	3
2015–2016	91	9 900	52	1,3	8	14
2016–2017	116	10 500	30	0,9	-	-
2017–2018	133	15 700	49	1,4	4	12
2018–2019	150	13 200	38	1,0	1	2

5.2 Routamittausten ja ilmastodatan vertailu

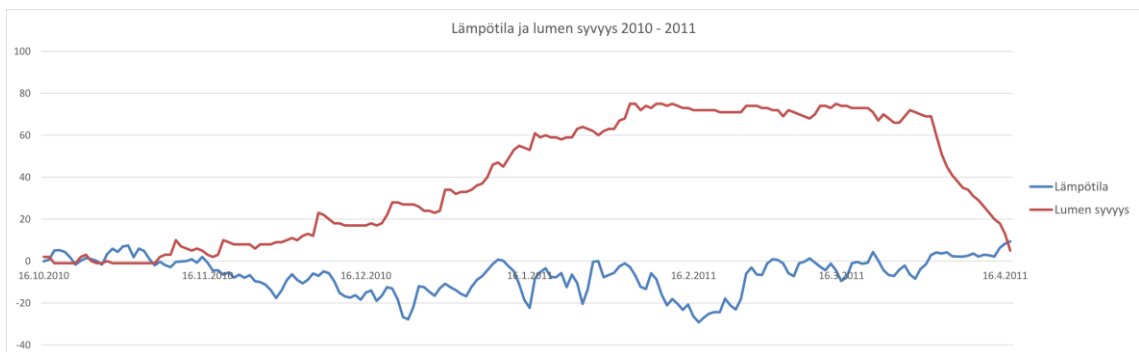
5.2.1 Talvi 2010–2011

Taulukosta 2 nähdään heti, että ensimmäinen talvi 2010–2011 on ollut pakkasmäärän 29 500 Kh perusteella kaikista kylmin, tai se on sisältänyt vähiten pakkasmäärää pienentäviä lämpimiä jaksoja. Sadekuvaaja kuva 9 tutkittaessa huomataan, että lähellä pakkasten alkamista ei ole ollut kovin merkittäviä sateita, vaan suurin osa sateista ajoittuu tarkastelujakson alkupuolelle ja puolen välin paikkeille. Lumen syvyyttä 1.3.2011 tarkasteltaessa käy ilmi, että kyseinen talvi on ollut myös lumisin kaikista tarkastelutalvista. Kun tarkastelun tueksi otetaan alla olevassa kuvassa 10 kyseisestä talvesta laadittu lämpötila- ja lumen syvyyskuvaaja, käy siitä ilmi, että lämpötilan painuttua pakkaselle, on lunta satanut melko nopeasti, minkä jälkeen lunta on ollut reilusti talven loppuun saakka. Myös lämpötila on pysynyt muutamia satunnaisia ja lyhyitä poikkeuksia lukuun ottamatta pakkasella koko sydäntalven. Kuvasta 11 nähdään, että tämän talven aiheuttama routanousu on kaikista tarkastelutalvista selkeästi suurin, mikä on mielenkiintoista, sillä talvi on ollut myös kaikista talvista lumisin, ja lumi on kaiken lisäksi satanut samoihin aikoihin pakkasten alkamisen kanssa. Kenties runsaan lumimäärän takia routa ei ole tunkeutunut aivan niin syväälle, kuin useimpina talvina. Roudan syvyyden kehitys nähdään kuvasta 12. Alun perin olisi voinut olettaa, että maa

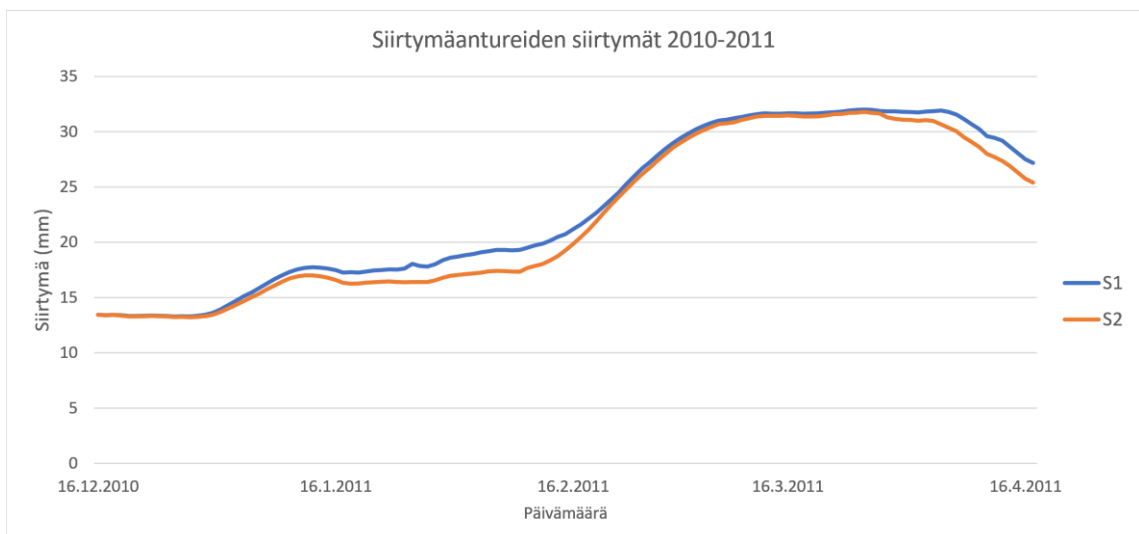
on ollut lumeton pidemmän aikaa pakkasten alkamisen jälkeen, jolloin routanousua olisi tapahtunut reilusti ilman eristeenä toimivaa lumipeitettä. Toisaalta juuri lumipeitteen eristävä vaikutus on voinut aiheuttaa routarajan hitaan etenemisen, jolloin routanousu muodostuu suuria muodonmuutoksia aiheuttavista jäälinseistä. Mikäli routaraja etenisi nopeasti, johtuisi routiminen in situ routanoususta, joka ei aiheuta näin suuria muutoksia. Raiteilla voi kuitenkin olla vain rajallinen määrä lunta, sillä kiskoilla on jatkuvaa liikennettä ja rataa aurataan. Toisaalta näin routivassa maa-aineksessa on myös epätodennäköistä, että routanousu aiheutuisi in situ- routimisesta, vaan mitä todennäköisimmin routanousun aiheuttajana ovat jäälinssit.

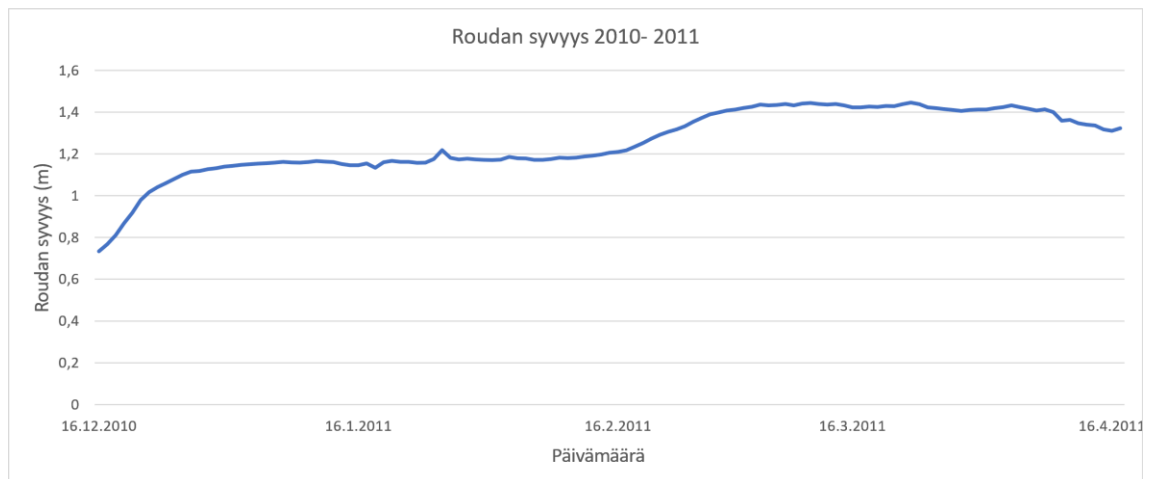


Kuva 9. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2010.



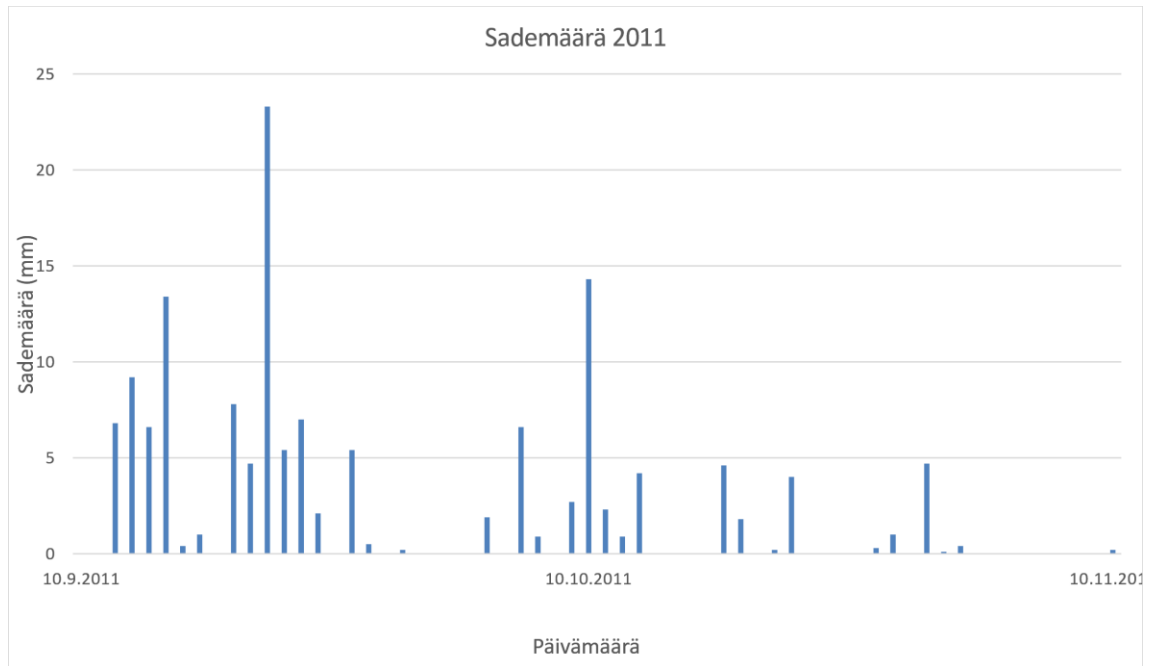
Kuva 10. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2010–2011.



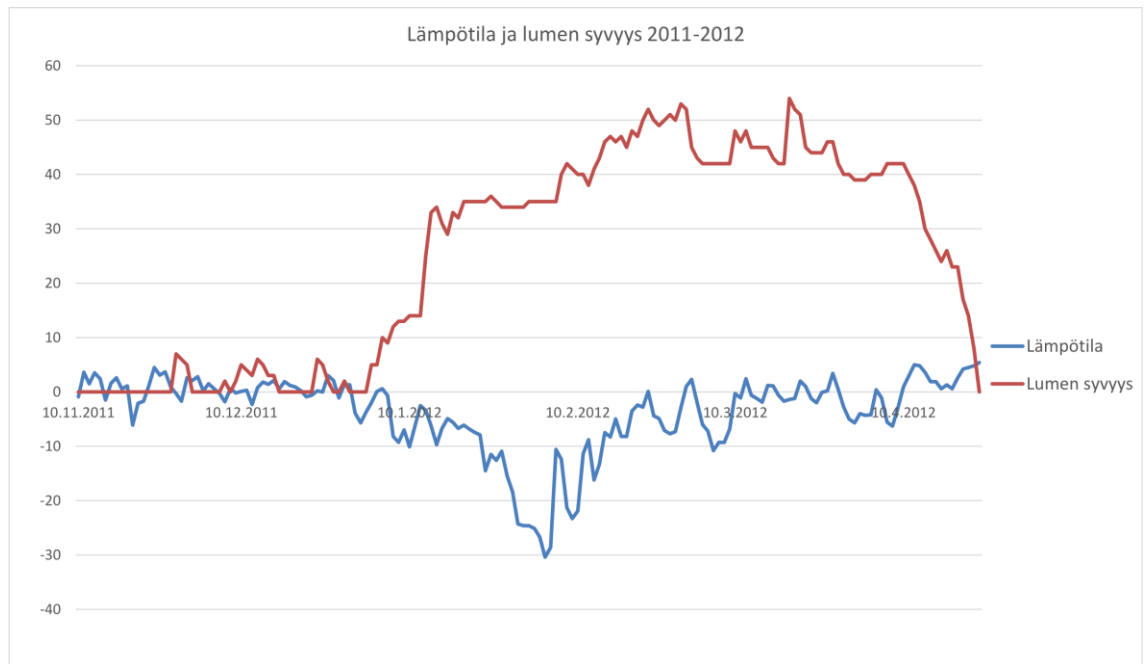
Kuva 11. Routanousu 2010–2011.**Kuva 12.** Routan syvyys 2010–2011.

5.2.2 Talvi 2011–2012

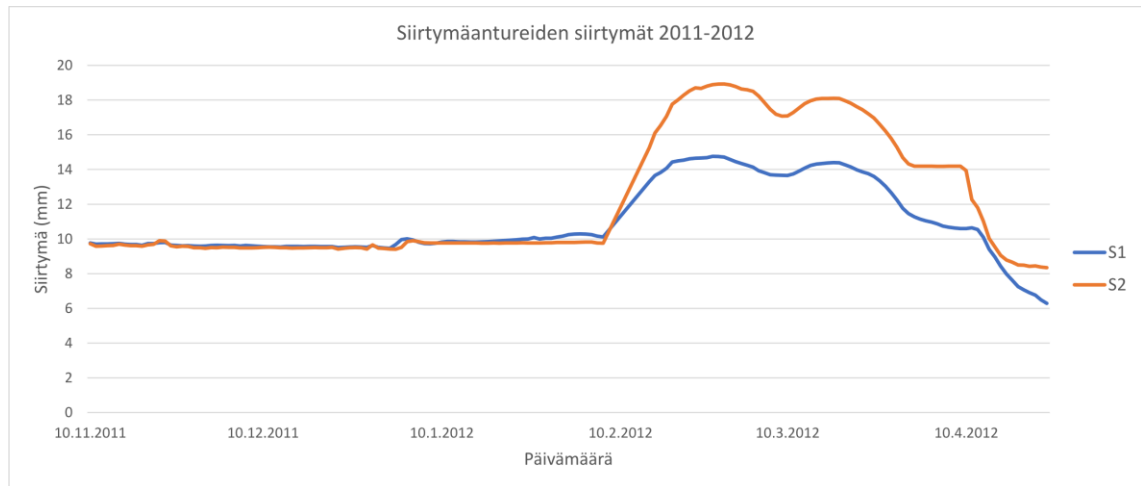
Pakkasmäärän 14 500 Kh perusteella talvi 2011–2012 oli selkeästi edellistä lauhempi, eikä tuolloinkaan juuri ennen pakkasten alkamista kuvan 13 perusteella ollut satanut merkittävästi, vaikkakin kokonaissademäärä 145 mm ennen pakkasten alkamista oli hieman suurempi, kuin edellisenä vuonna. Myös kuvassa 14 kyseisestä talvesta laaditun kuvaajan mukaan alkutalvesta lämpötila pysyi pitkään nollan tuntumassa, minkä jälkeen seurasi kohtuullisen lyhyt, kova pakkasjakso, jonka jälkeen lämpötila siirtyi taas lähelle nollaa pitkäksi aikaa. Lunta tuona talvena satoi samaan aikaan lämpötilan lähtiessä painumaan kunnolla pakkaselle ja lumipeite säilyi melko paksuna kevääseen asti. Aivan yhtä paksu lumipeite ei kuitenkaan ollut kuin edellisenä talvena, jolloin lunta oli parhaimmillaan noin 20 cm enemmän. Routa ei tunkeutunut aivan yhtä syvälle kuin edellisenä vuonna ja kuten kuvasta 15 nähdään, routanousuantureiden mittaama siirtymä oli merkittävästi pienempää. Alla olevista kuvaajista 15 ja 16 nähdään, että routanousu ja roudan tunkeutuminen syvälle maahan ovat tapahtuneet talven kovimman pakkasjakson aikana, minkä jälkeen niin roudan syvyys, kuin routanousukin ovat alkaneet pienentyä pikkuhiljaa. Kovan pakkasjakson aikana lumipeitteen paksuus on ollut noin 35 cm, mikä ei selkeästi ole estänyt roudan tunkeutumista maahan.



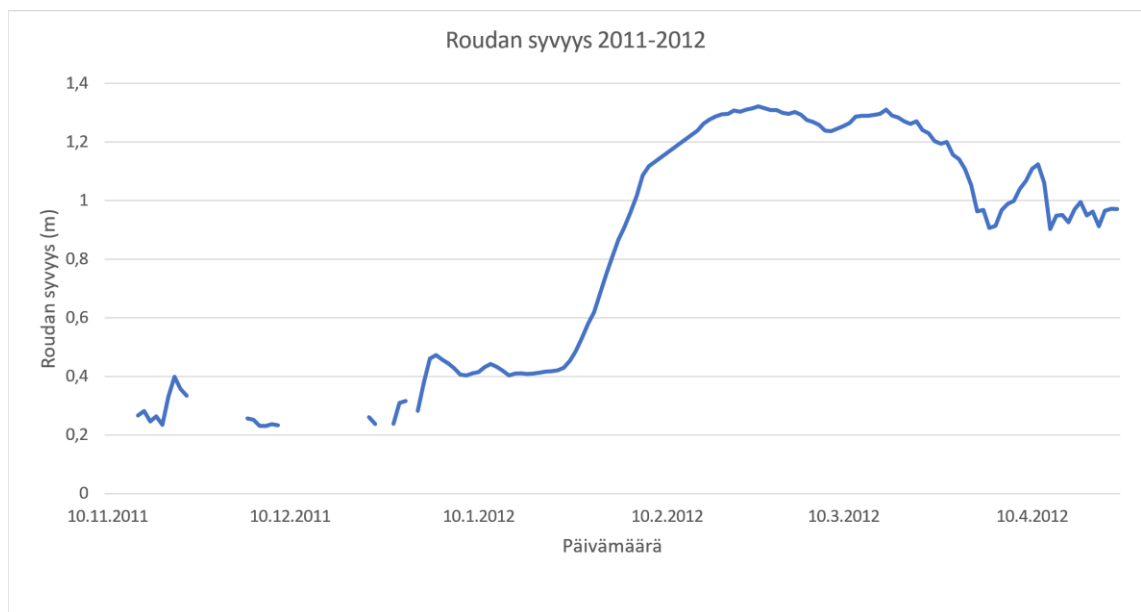
Kuva 13. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2011.



Kuva 14. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2011–2012.



Kuva 15. Routanousu 2011–2012.

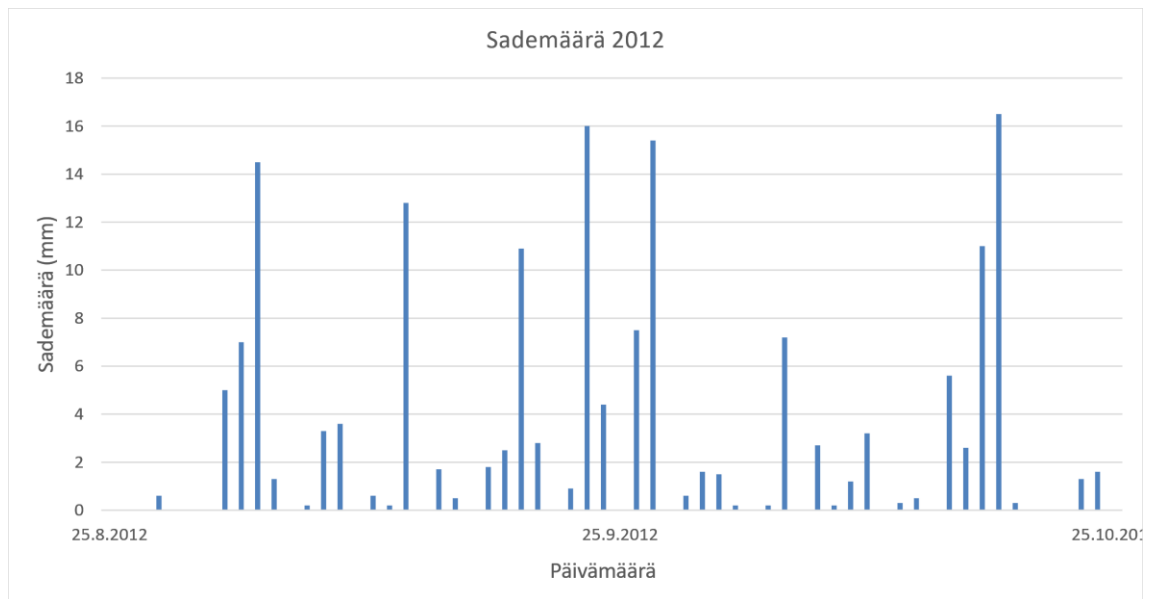


Kuva 16. Roudan syvyys 2011–2012.

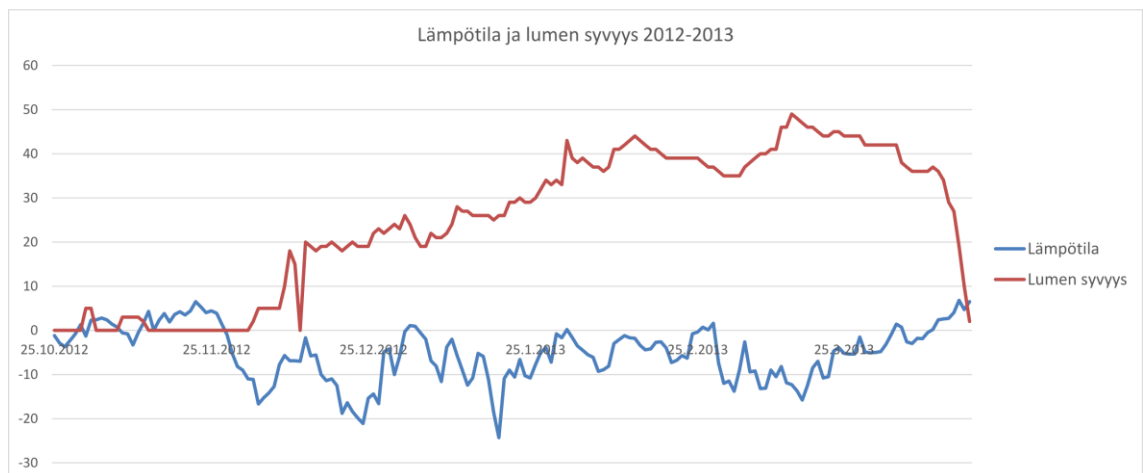
5.2.3 Talvi 2012–2013

Sademäärä 172 mm talvena 2012–2013 oli selkeästi suurempi kuin aiempina vuosina ja tällä kertaa sateita oli kuvan 17 mukaan ollut kohtuullisen lähellä pakkasten alkamista. Pakkasmäärä 21 500 Kh nousi korkeammaksi kuin talvella 2011–2012, mutta se jäi kuitenkin vielä alle talven 2010–2011 lukemien. Kuvassa 18 talvesta 2012–2013 tehdystä kuvaajasta nähdään, että lämpötila on vaihdellut melko paljon, sillä ajoittain pakkasta on ollut reilustikin, mutta taas toisinaan lämpötila on ollut lähellä nollaa tai jopa hieman plussan puolella. Keskimääräinen lumen syvyys oli edellisiä vuosia pienempi, vaikka lumen syvyys hetkellisesti kävikin kuvaajan perusteella samoissa lukemissa, kuin edellisenä vuonna. Pysyvä lumipeite satoi hieman pakkasten alkamisen jälkeen ja lumipeite säilyi koko sydäntalven tänäkin vuonna. Mielenkiintoista tässä talvessa on, että kuten kuvasta 19 näkyy, routanousu tapahtuu vasta loppupalvesta, vaikka lämpötila on muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta koko talven pakkasella. Kuvassa 19 havaittavat piikki S1 anturin tuloksissa aiheutuu todennäköisesti anturin häiriöstä, sillä maan routiessa anturi ei tällä tavalla käyttäytyisi. Kuvan 20 mukaan roudan syvyys on hieman pienempi, kuin edellisvuonna. Routa tunkeutuu syvemmälle hieman portaittain aina

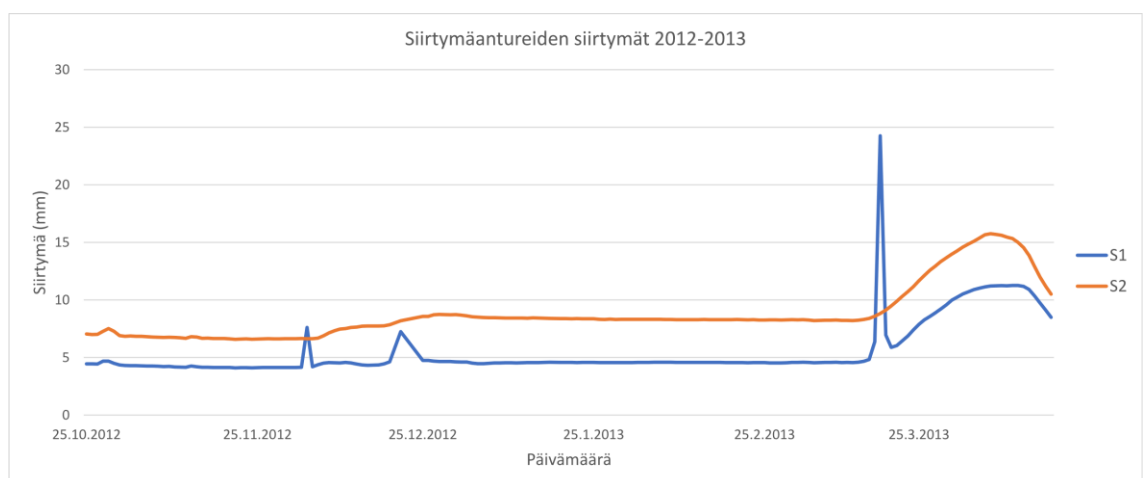
kovempien pakkasjaksojen myötä, mikä kertoo siitä, että kylmyys pääsee maahan, mutta jostain syystä se ei aiheuta suurta routanousua ennen kuin aivan talven lopulla.



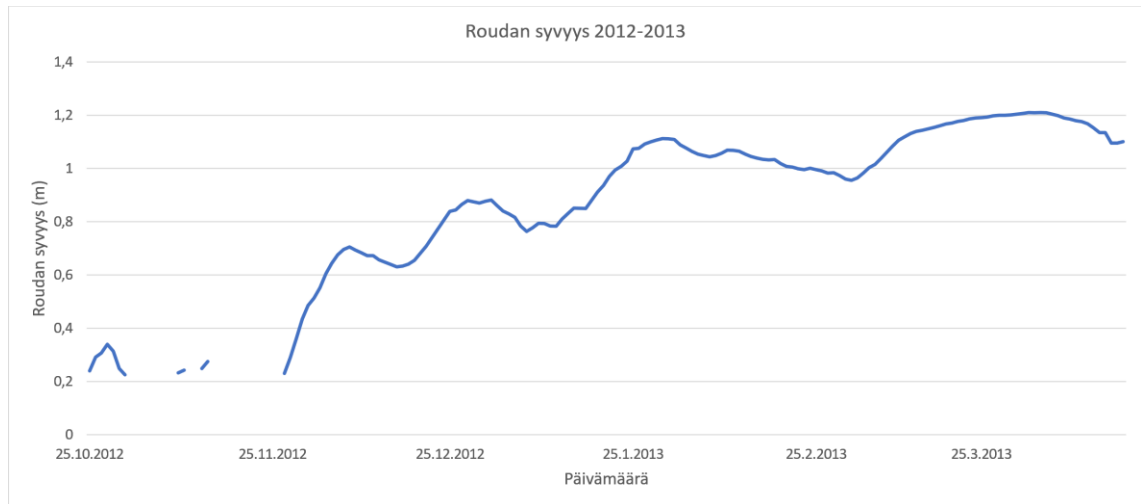
Kuva 17. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2012.



Kuva 18. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2012–2013.



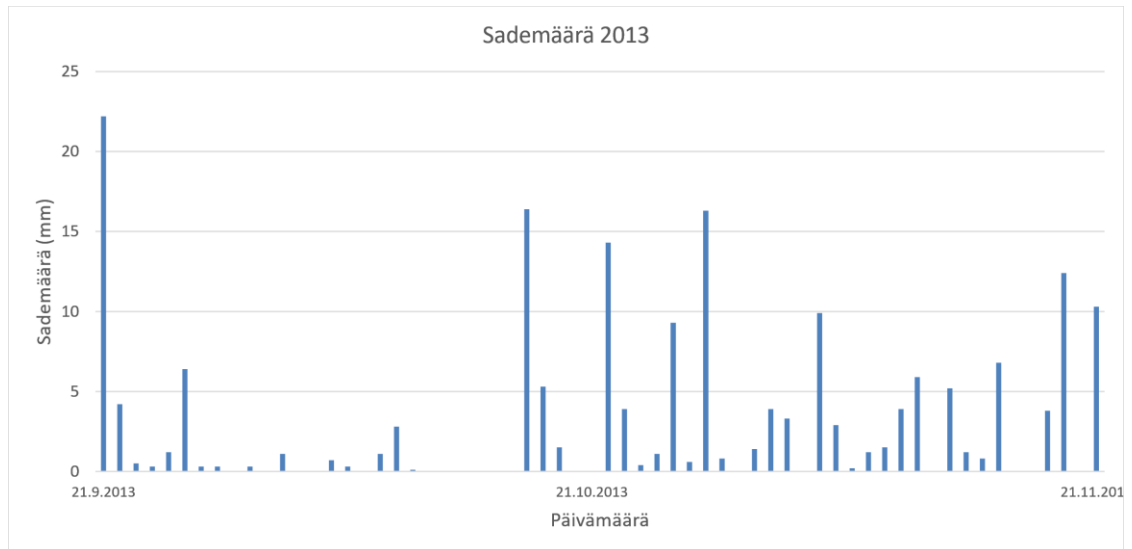
Kuva 19. Routanousu 2012–2013.



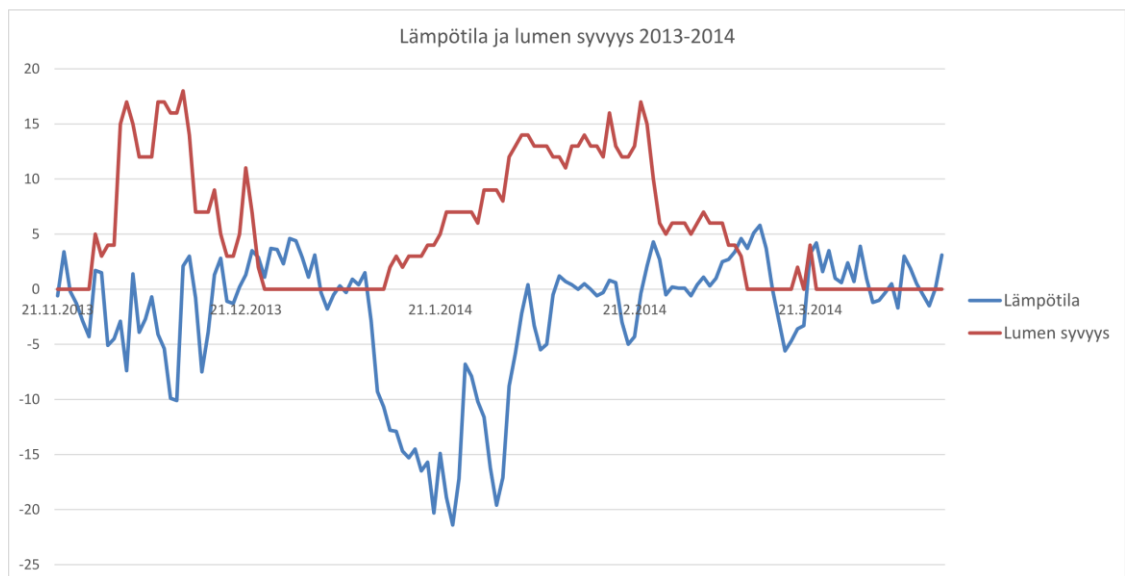
Kuva 20. Roudan syvyys 2012–2013.

5.2.4 Talvi 2013–2014

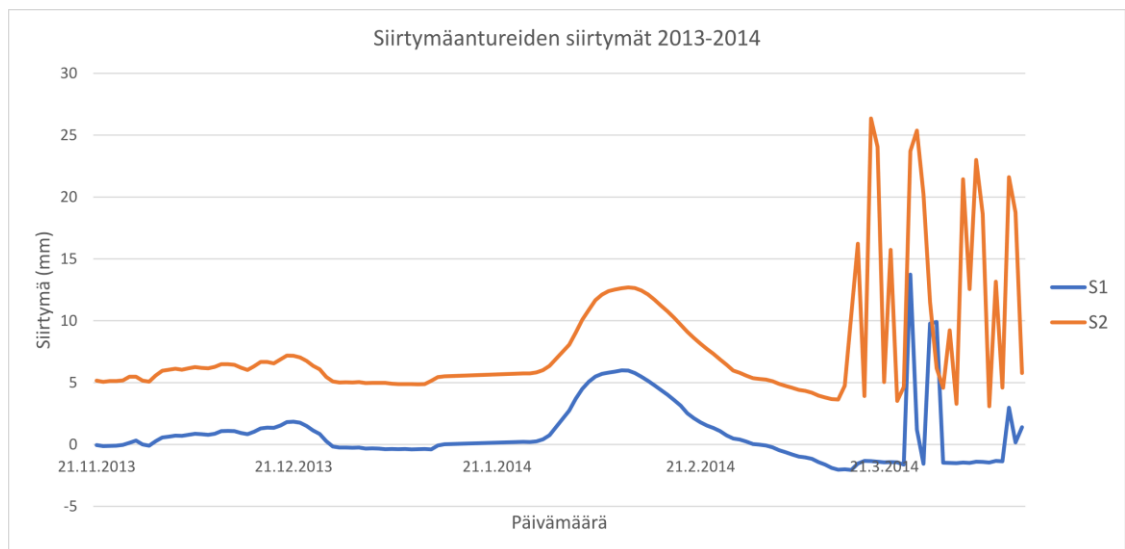
Syksyllä 2013 kuvan 21 mukaan suurin osa tarkastelujakson sateista ajoittui lähelle pakkasten alkamista ja kokonaissademäärä 179 mm on koko taulukon suurin, joskin niukasti verrattuna edelliseen tai seuraavaan vuoteen. Kokonaispakkasmäärä 7 900 Kh puolestaan on taulukon toiseksi pienin, mikä osaltaan selittyy kuvassa 22 talvesta 2013–2014 piirrettyä kuvaajaa tarkasteltaessa, sillä alkutalvesta lämpötila käy jonkin aikaa pakkasella ja luntakin sataa melko paljon, mutta sen jälkeen seuraa pidempi lämmin ajanjakso, jolloin lumet sulavat ja lämpötila on jatkuvasti nollan yläpuolella. Tämän jälkeen lämpötila laskee pidemmäksi aikaa reilusti pakkaselle ja lunta sataa jonkin verran, vaikkakin selvästi vähemmän, kuin aiempina vuosina ja lumensyvyys maaliskuun alussa on selkeästi koko taulukon pienin. Loppupalvesta lämpötila nousee reilusti nollan yläpuolelle ja käy vielä lyhyen ajan pakkasella ja luntakin sataa vielä vähän. Tänä talvena kunnollinen pakkasjakso on kuitenkin verrattain lyhyt aikaisempiin vuosiin verrattuna. Kuten kuvasta 23 näkyy, routanousu on hieman suurempaa kuin edellisessä vuonna ja oikeastaan melko samanlainen verrattuna vuoteen 2011–2012. Kuvasta 23 huomataan, että antureissa on loppupalvesta ollut runsaasti häiriöitä. Roudan syvyys on kuvan 24 mukaan kuitenkin sama, kuin aiempina vuosina. Tämän tarkasteluvuoden osalta mielenkiintoista on nähdä juuri ennen pakkasten alkamista olleiden sateiden vaikutus routimiseen. Alla olevista kuvaajista kuitenkin nähdään, että ensimmäisen pakkasjakson aikana ei synny merkittävää routanousua eikä routa juurikaan tunkeudu maaperään. Tämä voi johtua pakkasten kanssa samaan aikaan pakkaslukemiin nähden kohtuullisen reilun lumikerroksen satamisesta. Pakkasjakso on niin lyhyt, että routanousu sen aikana on hyvin pientä. Sateiden vaikutusta routimiseen ei tänä talvena voida juurikaan havaita, koska lämpötila palaa takaisin plussalle niin nopeasti ja lumikin sulaa pois. Heti seuraavan pakkasjakson alussa pakkas on melko kova ja lunta on vielä melko vähän, mikä näkyy heti sekä routanousu-, että roudan syvyyskuvaajissa. Routa tunkeutuu hyvin syvälle melko nopeasti ja routanousua havaitaan noin kuukauden ajan, kunnes lämpötila nousee takaisin plussalle ja routanousukin tasaantuu.



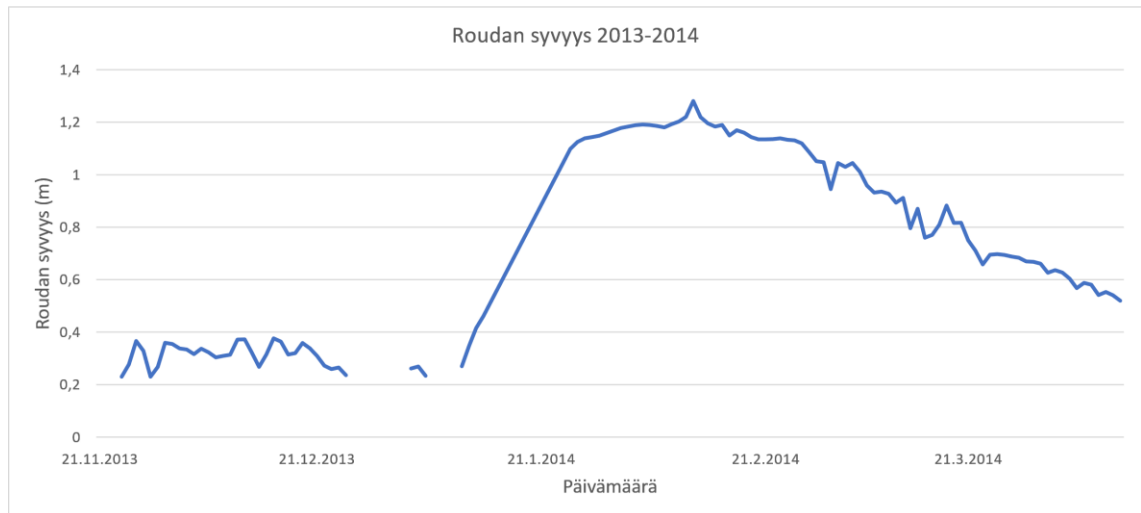
Kuva 21. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2013.



Kuva 22. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2013–2014.



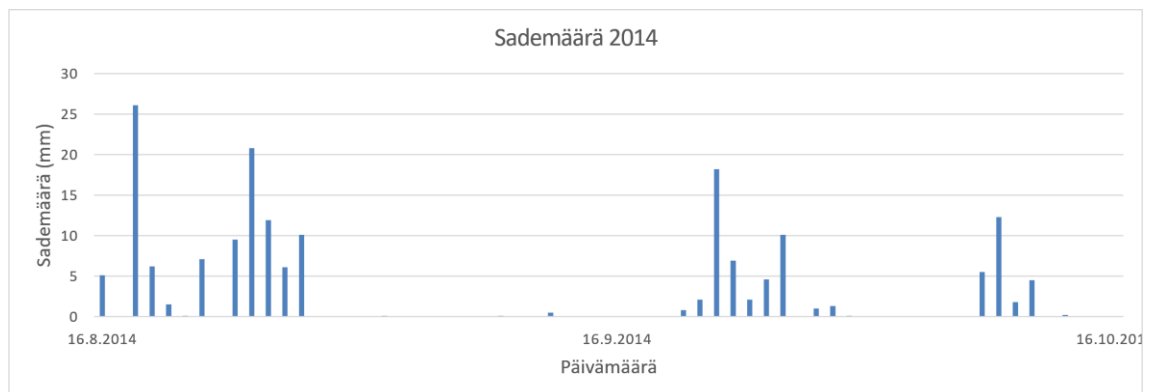
Kuva 23. Routanousu 2013–2014.



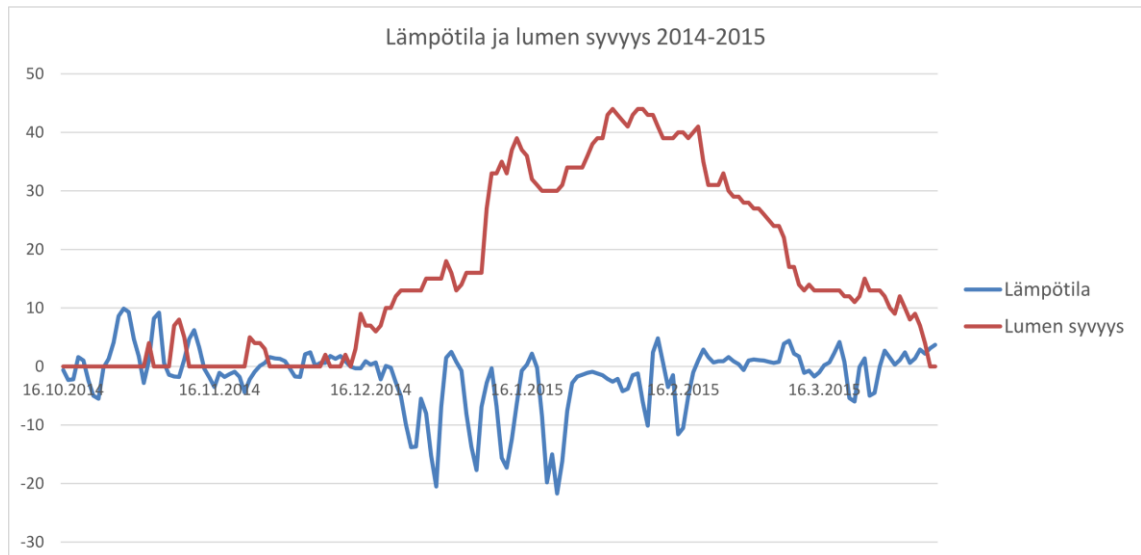
Kuva 24. Roudan syvyys 2013–2014.

5.2.5 Talvi 2014–2015

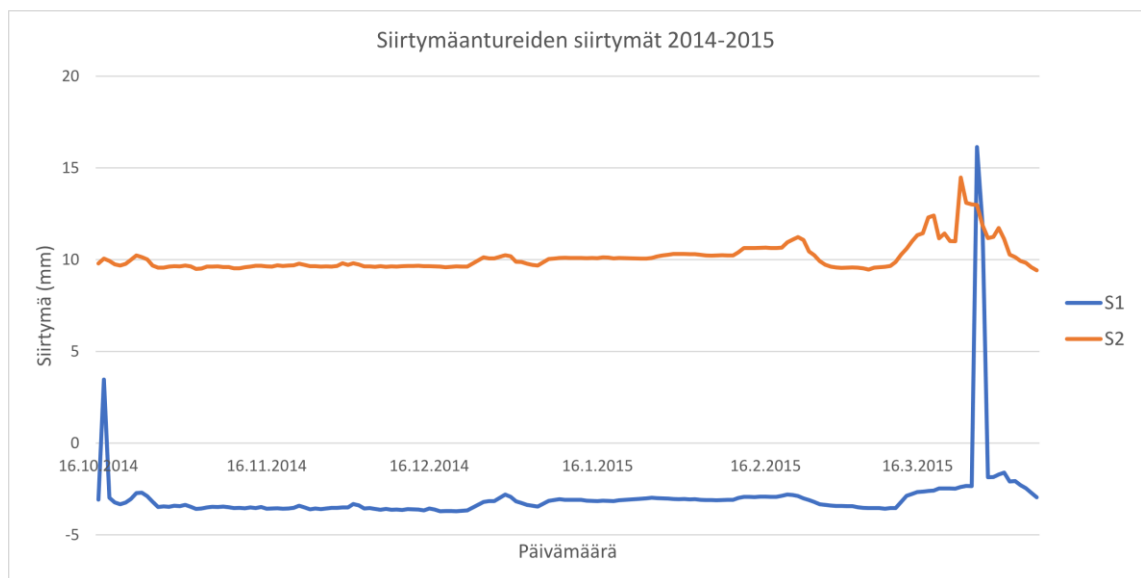
Talvea 2014–2015 edeltävien sateiden määrä 177 mm on kuvan 25 mukaan lähes yhtä suuri, kuin edellisenä vuonna, mutta ne ajoittuvat enimmäkseen pakkasten alkua edeltävän kahden kuukauden tarkastelujakson alkupuolelle ja juuri ennen pakkasten alkua satavat sateet ovat kohtalaisen vähäisiä. Talven pakkasmäärä 6 800 Kh on koko taulukon pienin ja sekin selittyy kuvan 26 kuvaajaa katsomalla, sillä ensimmäisten pakkasten jälkeen, mistä tarkastelujakso alkaa, lämpötila nousee taas joksikin aikaa plussalle ja koko talvi on kaiken kaikkiaan melko leuto. Muutamia kireimpiä pakkaspäiviä lukuun ottamatta ei koko talvena ole kovinkaan kylmää. Lunta kuitenkin sataa enemmän kuin edellisvuonna, joskaan ei niin paljon, kuin ensimmäisinä tarkasteluvuosina. Kun lumi pakkasjakson alkaessa sataa, se pysyy talven loppuun saakka. Routanousu on kuvan 27 mukaan selkeästi pienin tähän asti tarkastelluista talvista. Jälleen siirtymäantureissa havaitaan häiriöitä. Kuvan 28 mukaan roudan syvyys tänä vuonna on pienempi, kuin kertaakaan aiemmin. Kun vertaa roudan syvyyttä routanousuun, niin vaikka routa ei tunkeudu kovin syvälle, sen kehitys on melko nopeaa ja routanousu puolestaan hyvin pientä.



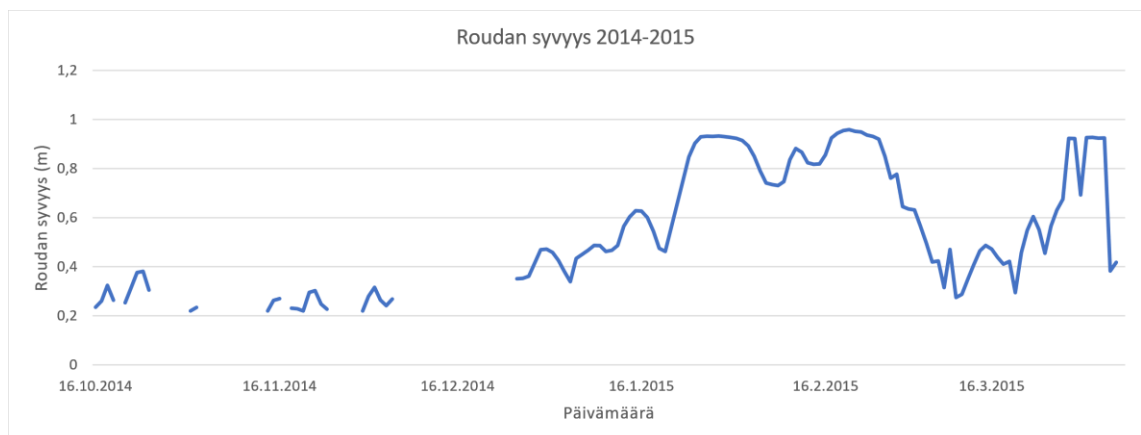
Kuva 25. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2014.



Kuva 26. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2014–2015.



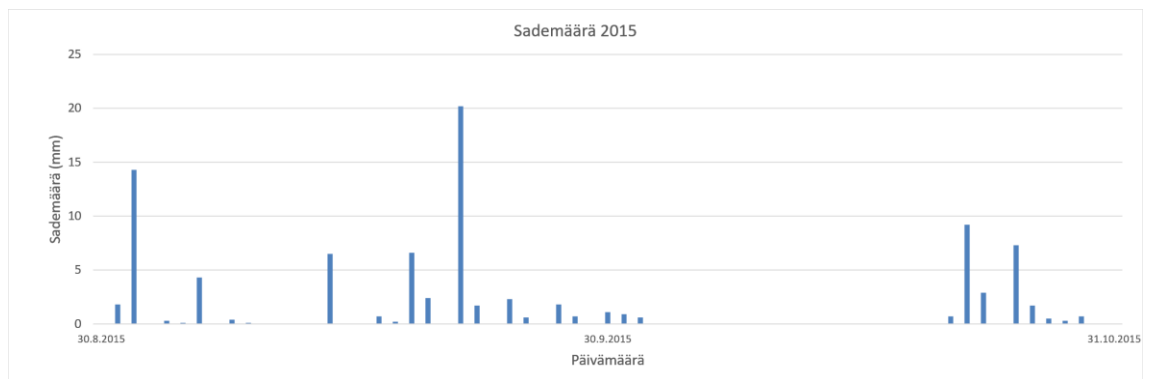
Kuva 27. Routanousu 2014–2015.



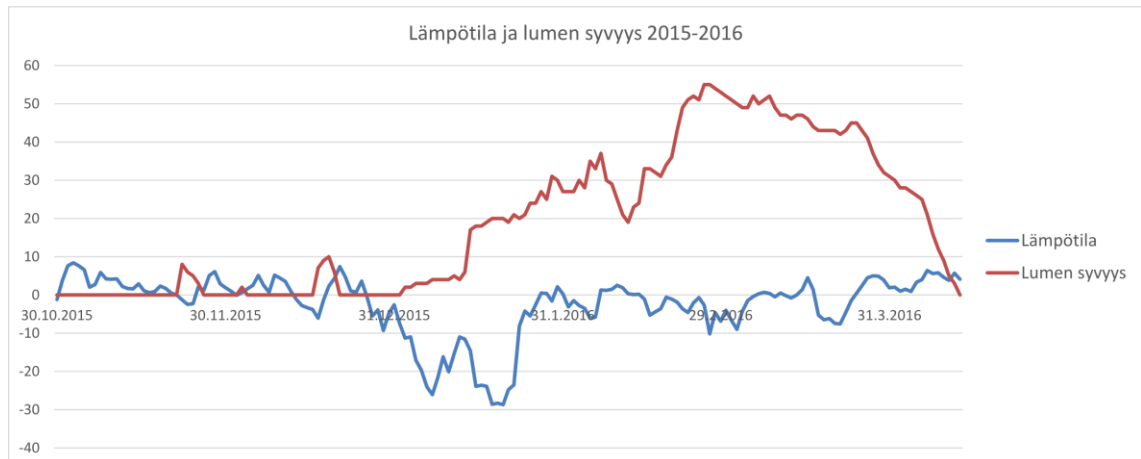
Kuva 28. Roudan syvyys 2014–2015.

5.2.6 Talvi 2015–2016

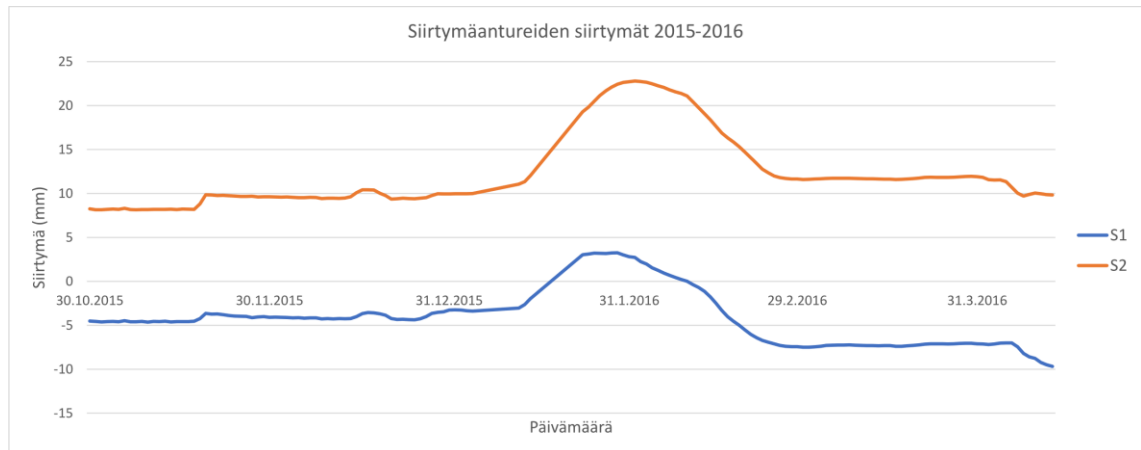
Syksyn 2015 sademäärä 91 mm on taulukon pienin ja kuvan 29 mukaan sateista melko pieni osa ajoittuu lähelle pakkasten alkamista. Talven pakkasmäärä 9 900 Kh on taulukon pienimpiä ja kuvaa 30 tarkasteltaessa nähdään, että kuvaajan piirtämisen aloittamisen jälkeen lämpötila nousee takaisin plussalle melko pitkäksi aikaa. Talven kunnollinen pakkasjakso alkaa ennen lumien satamista ja lämpötila laskee nopeasti kylmäksi. Talven kylmimpien lämpötilojen aikaan lunta on vielä vähän. Tämän jälkeen lunta sataa reilusti ja loppu talvi on lauhaa. Routanousu on kuvan 31 mukaan suurinta sitten talven 2010–2011, jolloin routanousu oli vielä merkittävästi suurempaa. Roudan syvyys on kuvan 32 mukaan 1,3 m, eli selkeästi enemmän kuin edellisenä vuonna. Tammi-helmikuun vaihteen kovat pakkaset näkyvät välittömästi routanousu- ja roudan syvyyskuvaajissa 31 ja 32. Tämä on hyvin loogista, sillä kun pakkasta on jo alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, niin lunta on vasta vähän ja pakkasen ollessa jo noin $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, on lunta vain 20 cm. Tässä havaitaan selvästi lumen eristävä vaikutus, sillä heti kun lumipeite on ohut ja pakkasta on reilusti, on myös routanousu suurempaa.



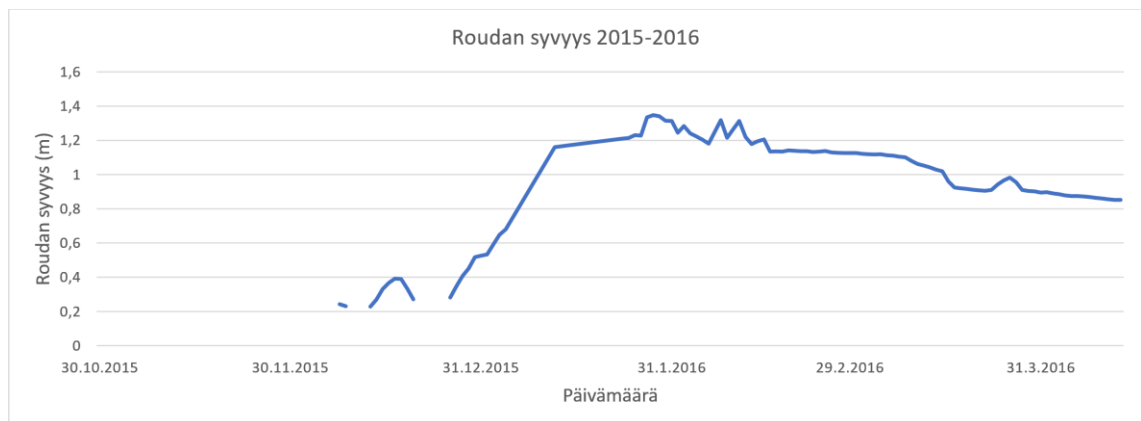
Kuva 29. Sademäärä ennen pakkasten alkamista 2015.



Kuva 30. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2015–2016.



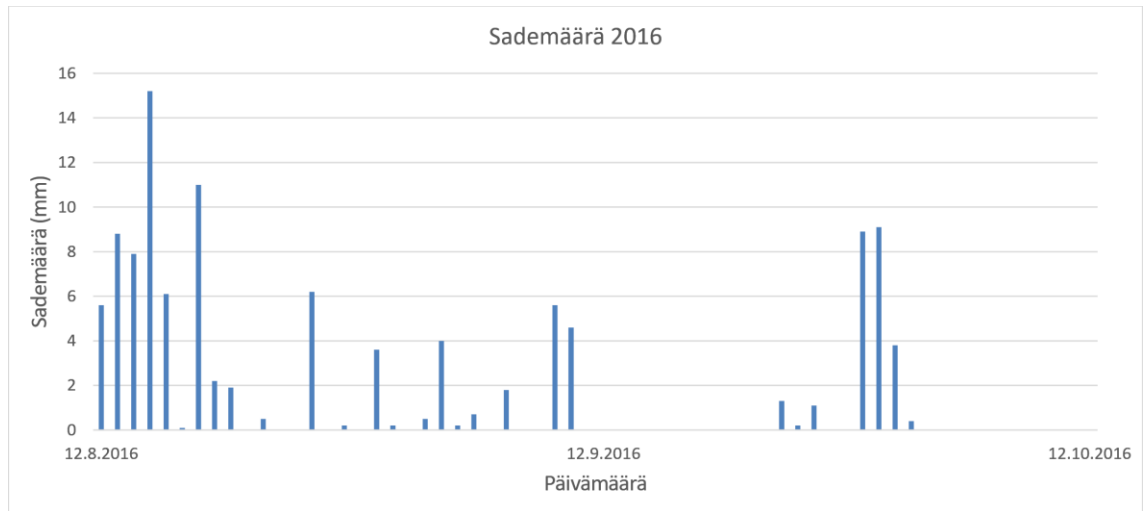
Kuva 31. Routanousu 2015–2016.



Kuva 32. Roudan syvyys 2015–2016.

5.2.7 Talvi 2016–2017

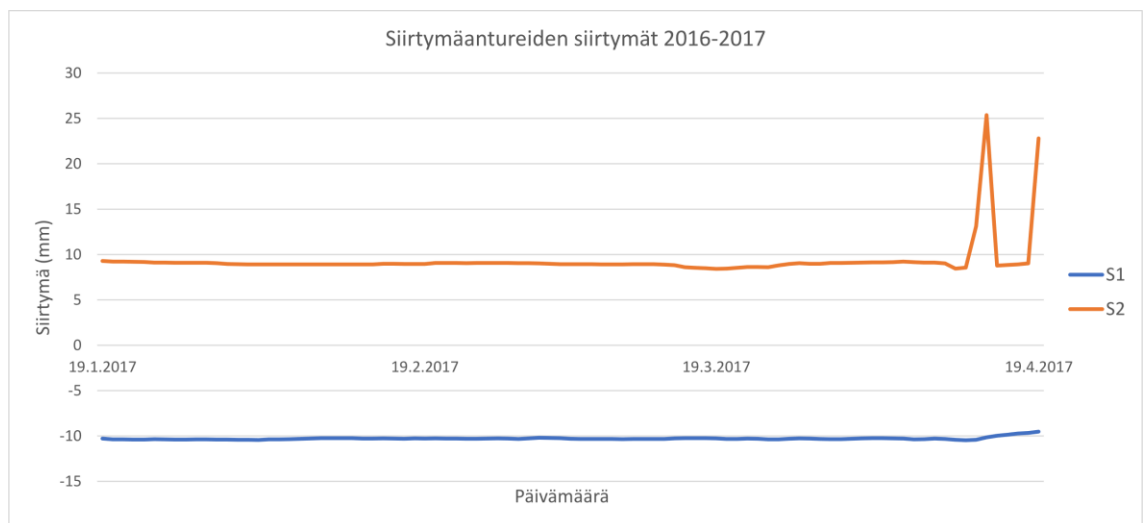
Vuonna 2016 syksyn sademäärä 116 mm ennen pakkasten alkamista on taulukon toiseksi pienin ja se ajoittuu kuvan 33 mukaan suurimmilta osin sadannan seurantajakson alkupuolelle. Pakkasmäärä 10 55 Kh oli kolmea edellisvuotta suurempi mutta talven 2016–2017 lämpötila vaihtelee kuvan 34 mukaan melko paljon, eikä lämpötila käy missään vaiheessa kovin alhaisena. Lunta on käytännössä ollut koko ajan, kun lämpötila on pakkasen puolella, mutta lunta ei ole koko talvena niin paljoa, kuin edellisvuonna. Talvella 2016–2017 on jokin mittauskatkos routaseurannassa, sillä kuten kuvasta 35 nähdään, 18.4.2016 jälkeen seuraava mittaustulos on vasta 19.1.2017, mikä vaikuttaa jonkin verran tuloksiin. Katkos saattaa johtua mittauslaitteiston akun loppumisesta. Routamittauksista jäävät pois talven ensimmäiset pakkasjaksot, jotka ovat saattaneet jo aiheuttaa routanousua. Jos routanousu ei enää tämän jälkeen ole kasvanut, ei muutoksia nähdä kuvaajassa. Siirtymäantureissa ei kuitenkaan havaita myöskään palautumista routanousua edeltäneeseen asemaan, mikä näkyy kaikkien muiden vuosien kuvaajissa, joten jos routanousua tänä talvena tapahtui, sitä on haastavaa arvioida. Kuitenkin routamittausten jälleen alettua 19.1. lämpötila on ajoittain pidempiä aikoja miinuksella ja vaikka pakkaset eivät ole kovia, voisi olettaa niiden aiheuttavan jonkinlaista routanousua, sillä lumipeite on melko vähäinen. Roudan syvyydessä havaitaan kuitenkin kuvan 36 perusteella muutoksia talven aikana, vaikka routanousuantureissa ei havaitakaan mitään.



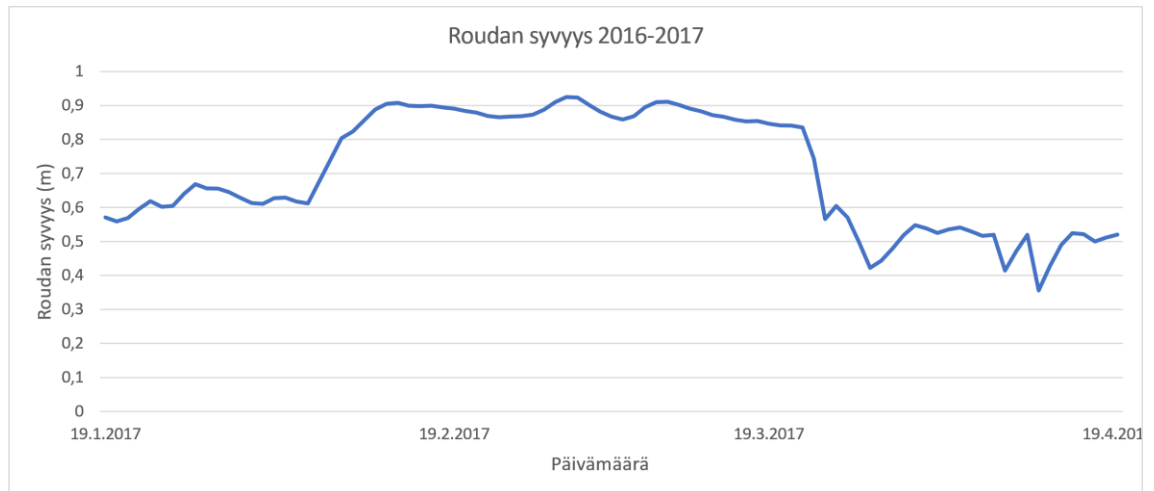
Kuva 33. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2016.



Kuva 34. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2016–2017.



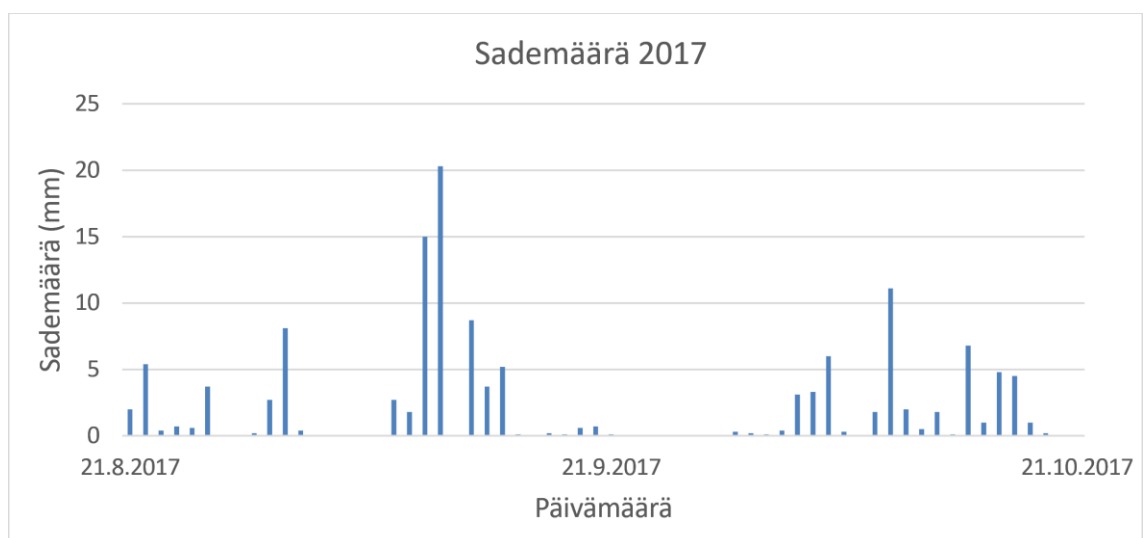
Kuva 35. Routanousu 2016–2017.



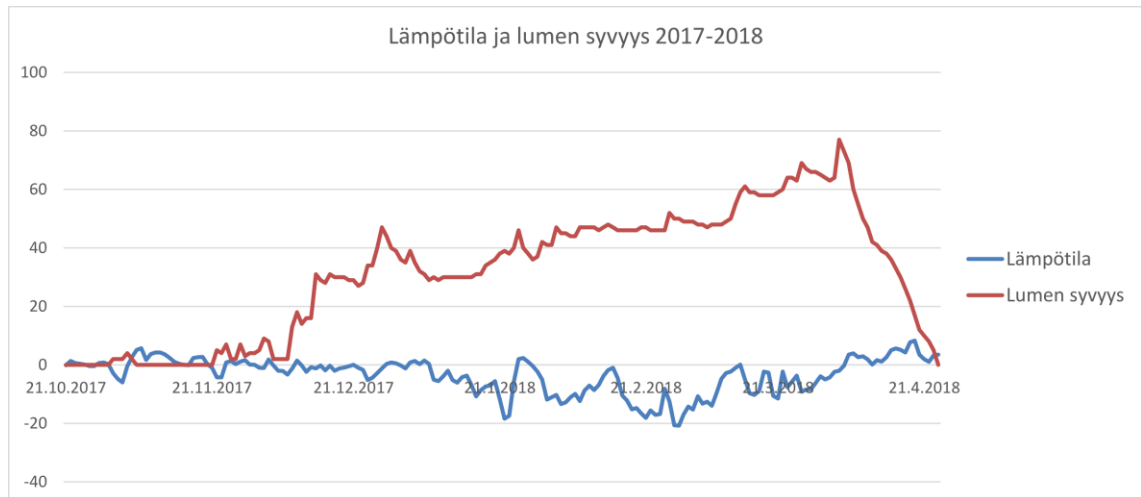
Kuva 36. Roudan syvyys 2016–2017.

5.2.8 Talvi 2017–2018

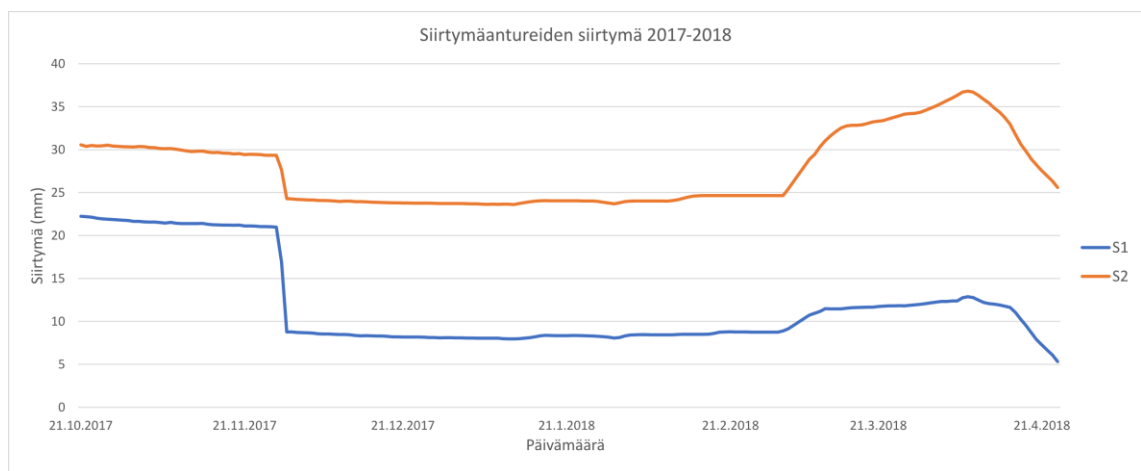
Talven 2017–2018 pakkasmäärä 15 700 Kh on taulukon muihin arvoihin verrattuna melko suuri. Sademäärä 133 mm ei ole yhtä suuri, kuin edellisvuosina, mutta siitä osa ajoittuu kuvan 37 mukaan juuri ennen pakkasten alkamista. Talven kuvaajaa kuvasta 38 tarkasteltaessa nähdään, että lumi on satanut ennen, kuin pakkaset ovat kunnolla alkaneet ja lunta on ollut enimmillään enemmän kuin aiempina vuosina. Lämpötila vaihtelee talven aikana jonkin verran. Ajoittain pakkasta on reilustikin ja toisinaan lämpötila on lähellä nollaa. Vaikka talvella ei ole yhtään kovin kylmää päivää, pysyy lämpötila pitkän jakson ajan suurimmaksi osaksi pakkasella, mikä saa roudan tunkeutumaan syväälle. Kuvan 39 routanousukuvaajasta nähdään, että routanousu on hyvin epätasaista S1 anturin siirtymän ollessa noin 4 mm, kun taas S2 anturin arvo on noin 12 mm. Routanousukuvaajasta havaittava äkillinen pudotus antureiden arvoissa johtuu mitta-aseman huollosta ja siirtymäantureiden siirtämisestä lähemmäs keskiasemaa. Kuten kuvasta 40 nähdään, roudan syvyyden kehitys on erikoinen, sillä syvyys on suurimmillaan, kun pakkaset ovat enää melko vähäisiä. Roudan syvyys on samaa luokkaa kuin talvena 2010–2011, jolloin routanousu oli kaikkein suurinta.



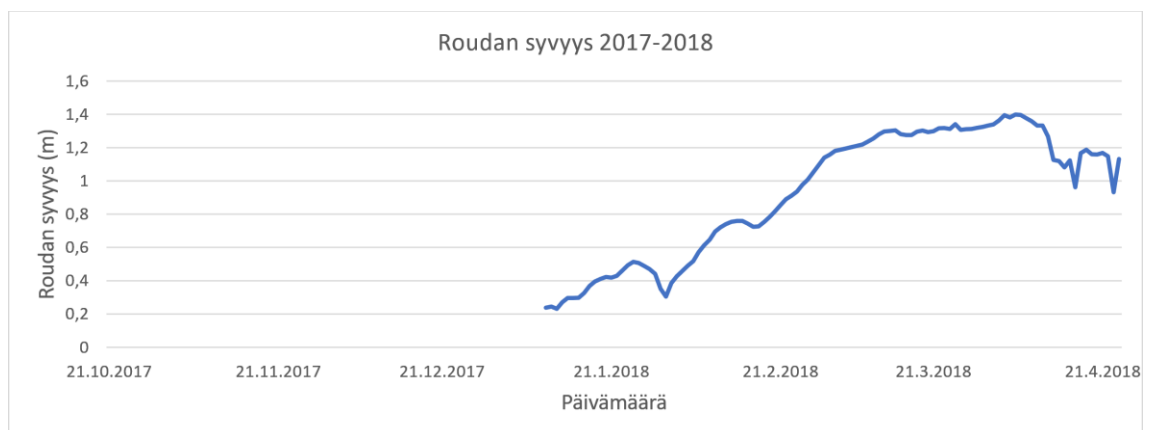
Kuva 37. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2017.



Kuva 38. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2017–2018.



Kuva 39. Routanousu 2017–2018.

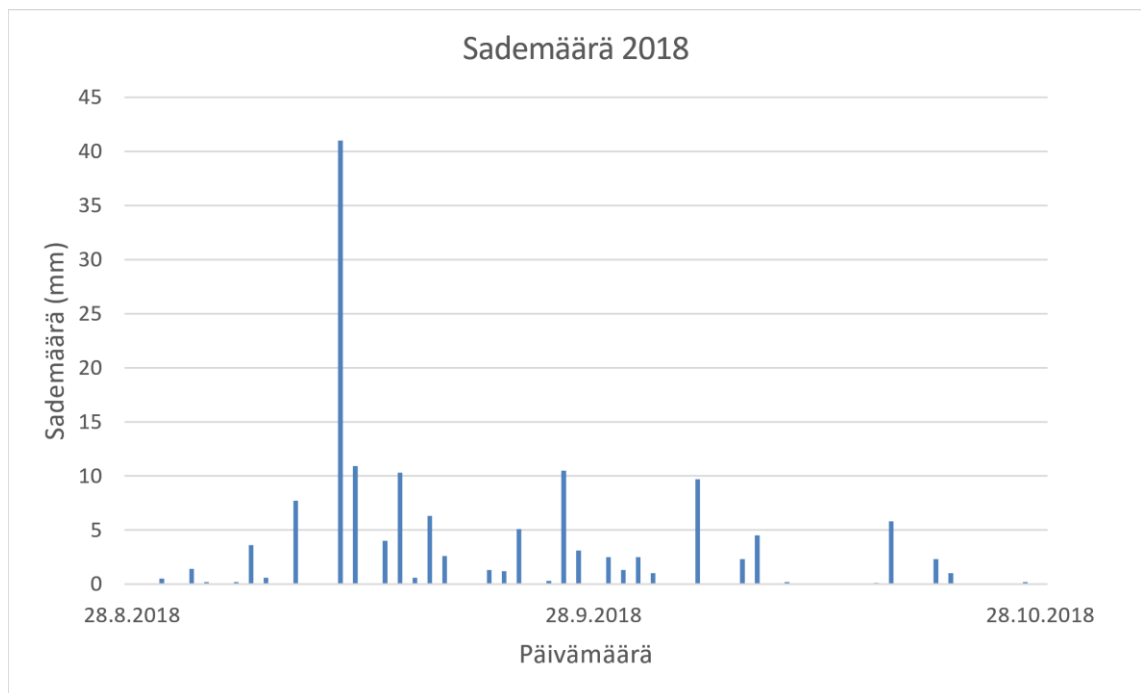


Kuva 40. Roudan syvyys 2017–2018.

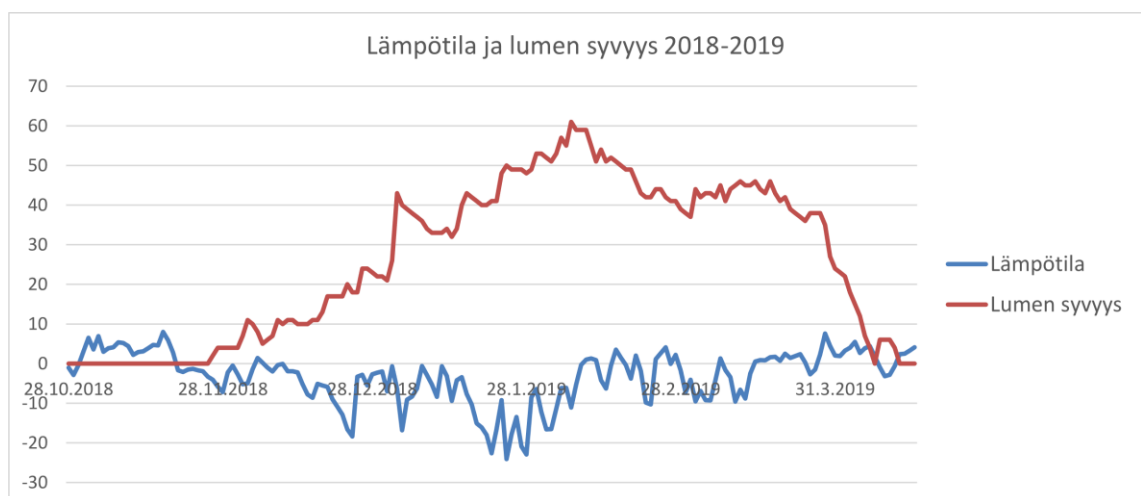
5.2.9 Talvi 2018–2019

Vuonna 2018 sateet ajoittuvat kuvan 41 mukaan pääsääntöisesti tarkastelujakson alkupuolelle ja juuri ennen pakkasia ei ole juurikaan satanut. Kokonaissademäärä 150 mm on suurempi, kuin edellisinä kolmena vuonna, mutta ei kuitenkaan tarkasteltujen syksyjen suurimmasta päästä. Kokonaispakkasmäärä 13 200 Kh ei ole aivan niin suuri,

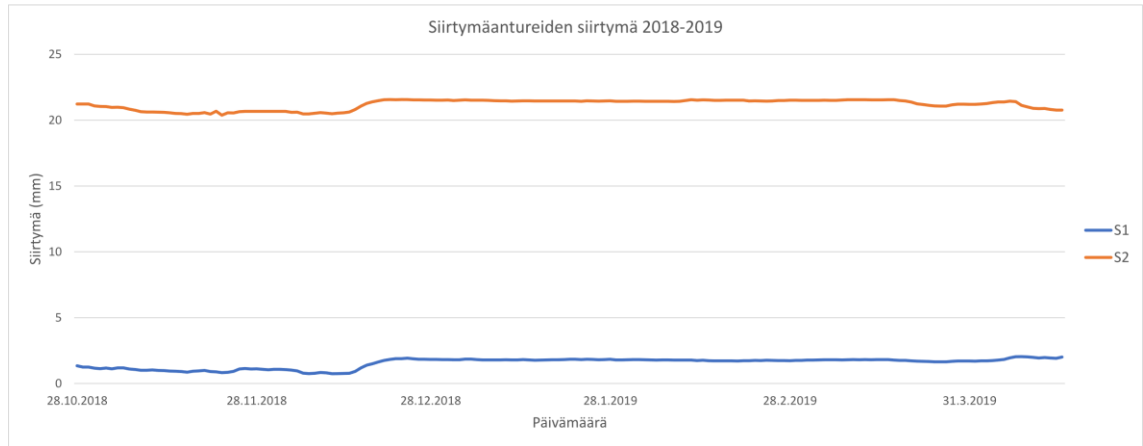
kuin edellisvuonna ja kuvan 42 kuvaajaa tarkasteltaessa nähdään, että talven lämpötilat ovat vaihdelleet jälleen melko paljon. Kuvaajan piirtämisen alettua lämpötila nousee takaisin plussalle. Kun lämpötila painuu pidemmäksi aikaa pakkaselle, sataa samaan aikaan myös lunta, jota tulee melko reilusti ja lumipeite pysyy tänäkin talvena koko sydäntalven ajan. Kunnollisella pakkasjaksolla lämpötila on kylmimmillään noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, mutta pääsääntöisesti lämpötila pysyy nollan ja $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Kuvan 43 mukaan routanousu on selkeästi tarkastelutalvista pienintä ja kuvan 44 mukaan roudan syvyys on pienempi, kuin edellisvuonna. Ennen kun talvella pakkasen ylittää $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, on lunta jo noin puoli metriä, mikä osaltaan selittää hyvin vähäistä routanousua. Oikeastaan suurin routanousu havaitaan joulukuussa, jolloin lunta on vielä melko vähän. Tämän jälkeen lumen määrä noin kaksinkertaistuu, mutta lämpötila ei laske paljoakaan enää alemmas, eikä routanousua enää havaita. Routa on kuitenkin syvimmillään vasta helmikuun lopulla talven kovimman pakkasjakson jälkeen.



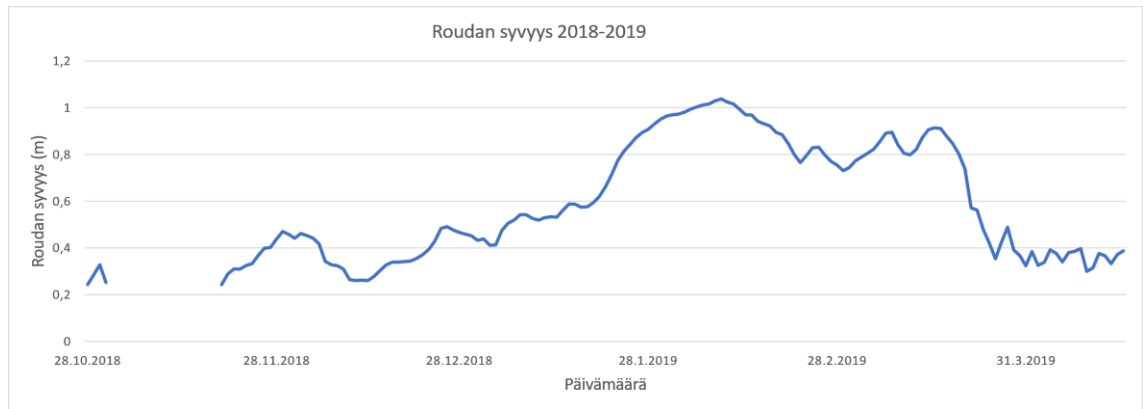
Kuva 41. Sademäärä kaksi kuukautta ennen pakkasten alkamista 2018.



Kuva 42. Ilman lämpötila ja lumen syvyys 2018–2019.



Kuva 43. Routanousu 2018–2019.



Kuva 44. Roudan syvyys 2018–2019.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Sateiden vaikutus routanousuun

Sateiden merkitys routanousun suuruuteen on haastavaa yksiselitteisesti todentaa näiden tuloksien pohjalta. Mittaustulosten pohjalta saadaan kuitenkin jonkinlaisia viitteitä sateiden ja routanousun suuruuden välisestä yhteydestä. Parhaat olosuhteet sateiden vaikutuksien tutkimiseen oli talvina 2013–2014 ja 2017–2018, mutta ensimmäisenä talvena sateiden jälkeinen pakkasjakso kesti vain hetken ja sen perusteella luotettavien johtopäätösten tekeminen on hankalaa. Talvena 2017–2018 puolestaan lämpötila kävi vain hetken pakkasella sadeseurannan loputtua ja aikaa kului ennen pakkasten varsinaista alkamista. Mielenkiintoista olisi ollut tutkia millaista routanousua heti sateiden päätteeksi alkava pakkasjakso saisi aikaan. Teoriaosuuden perusteella voidaan luotettavasti todeta, että sateilla ja sen kautta maaperän kosteudella on vaikutusta maaperän routimiseen. Myös talven 2013–2014 roudan syvyys- ja routanousukuvaajissa näkyy kyseisen lyhyenkin pakkasjakson pieni vaikutus, vaikka pakkasen ei ollut kova ja lunta oli kuitenkin eristävänä kerroksena.

Tarkasteltaessa talven 2015–2016 routanousukuvaajaa, nähdään siinä kahden hyvin lyhyen pakkasjakson aiheuttavan pieniä routanousuja ennen varsinaisia pakkasia. Myös syksyllä 2015 sateista pieni osa ajoittuu lähelle pakkasten alkamista. Voidaan siis sanoa, että vaikka sateiden vaikutusten suuruutta ei näiden tutkimusten avulla voida kovin luotettavasti todentaa, saadaan kuvaajia tarkasteltaessa kuitenkin viitteitä siitä, että sateinen syksy kasvattaa routimisen riskiä ja nopeuttaa routanousun muodostumista. Suoraan pakkasia edeltävien kahden kuukauden sademäärää tarkastelemalla ei kuitenkaan voi ennustaa routivuutta sillä esimerkiksi taulukkoa 2 tarkasteltaessa käy ilmi, että kahden vähäsateisimman syksyn jälkeen on talvella mitattu suurimmat routanousut. Tämä voi johtua siitä, että pienemmän vesipitoisuuden myötä maassa on vähemmän ominaislämpökapasiteettia, jolloin maa-aines alkaa routaantua nopeammin.

6.2 Lumipeitteen vaikutus routanousuun

Jo työn teoriaosuudessa käy ilmi, että lumikerroksen paksuus vaikuttaa suuresti maan routimiseen. Yksi todiste tästä nähdään muun muassa talven 2015–2016 kuvaajia vertaillen. Lämpötilan painuessa pidemmäksi aikaa reilusti pakkaselle, ei maassa ole vielä kovinkaan paljon lunta, mikä aiheuttaa huomattavaa routanousua. Myös roudan syvyys kasvaa nopeasti. Vastaavasti lumen eristävä vaikutus nähdään useamminkin kuvaajissa, sillä yksittäiset lyhyet pakkasjaksot eivät saa aikaan muutoksia routanousua tai roudan syvyyttä kuvaavissa kuvaajissa. Taulukosta 2 nähdään, että talvena 2010–2011, jona lumimäärä maaliskuun alussa oli tarkastelutalvista kaikkein suurin, mitattiin myös koko tarkastelujakson suurimmat routanousut. Oleellista lumen vaikutusta tarkasteltaessa onkin lumen satamisen suhde pakkasten alkamiseen. Useimpina tarkastelutalvina lunta satoi samaan aikaan, kun lämpötila alkoi painua pakkaselle, mikä aiheutti sen, että ensimmäiset pakkaset eivät useinkaan aiheuttaneet muutoksia routanousukuvaajissa. Osittain tätä selittää se, että talven ensimmäiset pakkasjaksot harvoin olivat kovin kovia tai pitkiä. Hyvän esimerkin tästä antaa talven 2013–2014 kuvaajat, joissa nähdään, että ensimmäinen talven lyhyt pakkasjakso, jonka aikana sataa myös jonkinlainen lumikerros, ei aiheuta suurta routanousua. Seuraavan pakkasjakson alussa lämpötila laskee kuitenkin heti reilusti pakkaselle eikä maassa ole

vielä juurikaan lunta, mikä aiheuttaa huomattavasti merkittävämpää routanousua hyvinkin nopeasti.

6.3 Pakkasmäärän vaikutus routanousuun

Pakkasmäärän vaikutusta routanousun suuruuteen saadaan tarkastelutalvien perusteella tutkittua. Oleellista on tarkastella pakkasjaksoja ja niiden pituutta, sillä eri tarkastelutalvien kuvaajia tutkiessa huomataan, että pitkät tasaiset pakkasjaksot synnyttävät suurempia routanousuja, kuin useat yksittäiset lyhyet, kovatkin pakkaset. Totta kai myös lyhyet riittävän kovat pakkasjaksot saavat aikaan routanousua. Jos tarkastellaan talvia, joina routanousu oli kaikkein suurinta, eli talvia 2010–2011, 2015–2016 ja 2017–2018, niille kaikille on yhteistä se, että kaikkina kolmena talvena lämpötila on pitkiä aikoja selkeästi pakkasella.

Suurinta routanousua aiheuttaneena talvena 2010–2011 lämpötila on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta koko ajan pakkasen puolella ja talvella on parikin jaksoa, jolloin pakkasta on pidemmän aikaa lähes $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Talvi 2015–2016 on näistä kolmesta talvesta hieman poikkeava, sillä tuolloin talven alkupuolella on noin kuukauden mittainen kova pakkasjakso, joka aiheuttaa routanousun. Tuon jakson jälkeen pakkaset eivät ole enää läheskään niin kovia, eivätkä aiheuta routanousun kasvamista. Talven 2015–2016 pakkasjakso on siis selkeästi lyhyempi, kuin talvena 2010–2011, mutta tuon pakkasjakson aikana lämpötila on hyvin alhainen ja lyhyempikin pakkasjakso riittää synnyttämään merkittävää routanousua. Talvella 2017–2018 lämpötila on pakkasen puolella paria poikkeusta lukuun ottamatta noin kolme kuukautta, minkä aikana routanousu syntyy. Vaikka tuona aikana ei ole mitenkään erityisen kylmä, aiheuttaa pitkä ja kohtuullisen tasainen pakkasjakso reilua routanousua. Näiden kolmen esimerkin lisäksi muidenkin talvien kuvaajista on havaittavissa, että selkeästi eniten routanousua aiheuttavat pidemmät pakkasjaksot.

6.4 Roudan syvyyden vaikutus routanousuun

Roudan syvyyden ja routanousun välillä voidaan havaita olevan jonkinlainen yhteys. Taulukkoa 2 tarkasteltaessa nähdään, että suurimpien routanousujen aikana myös roudan syvyys on ollut taulukon suurinta. Kuitenkin joskus routanousun ollessa hyvin pientä voi roudan syvyys olla melko suuri, joten yhteyttä ei voida pitää täysin yksiselitteisenä. Joinain vuosina voidaan huomata, että routa on tunkeutunut syvälle maaperään hyvin nopeasti ja routanousu on hyvin pientä, jolloin voidaan ajatella, että kyseessä voisi mahdollisesti olla myös in situ routanousu. Tämä päätelmä perustuu siihen, että jos routaraja etenee nopeasti, niin routivaan kerrokseen ei ehdi virrata riittävästi vettä jäälinsien kasvua varten. Ennen kuin routaraja jatkaa etenemistään, maa jäätyy ja sen vedenjohtokyky heikkenee. Varkauden mittauspisteellä ratarakenne on routiva, joten in situ routanousua todennäköisempää on, että routiminen johtuu jäälinsseistä.

Edellisten päätelmien perusteella olisi mielenkiintoista tarkastella pakkaseltaan identtisten talvien vaikutuksia routanousuun eri paksuisten lumikerroksien kanssa. Tulokset voisivat kääntyä niin, että kovalla pakkasella lumettomassa maassa routaraja etenisi niin nopeasti, että tuloksena olisikin vähäisempää in situ routanousua ja taas lumipeitteisessä maassa routarajan eteneminen olisi hitaampaa, jolloin routanousun aiheuttaisivat jäälinsit, jotka aiheuttavat huomattavasti suurempaa routanousua. Tällainen tutkimus olisi mahdollista toteuttaa vain laboratorio-olosuhteissa. Roudan syvyydestä voidaan todeta myös se, että siirtymäanturin ankkuritangon kahden metrin

suojaputki on ainakin tällä kohteella ollut täysin riittävä, sillä routa ei ole syvimmilläänkään mennyt kuin 1,4 metriin. Mittaustuloksiin ei siis ole aiheutunut virhettä siitä, että siirtymäanturin ankkuritanko olisi liikkunut routanousun mukana.

6.5 Johtopäätökset

Taulukkoa 2 tarkasteltaessa huomataan, että talvien pakkasmäärät ensimmäisinä tarkastelutalvina olivat keskimäärin suurempia, kuin mitä ne olivat myöhempinä talvina. Pakkasmääristä on havaittavissa viitteitä siitä, että talvien kylmyys vaihtelisi kolmen vuoden sykleissä, sillä ensimmäisten kolmen talven pakkasmäärät ovat suuret, seuraavan kolmen vuoden melko pienet ja viimeisen kolmen talven pakkasmäärät taas melko suuria. Tarkastelujakso on liian lyhyt luotettavien johtopäätösten tekemiseen, mutta näiden havaintojen osalta tällainen sykli esiintyy tuloksissa. Myös lumimäärä seuraa tätä samaa sykliä, joskaan se ei ole ollenkaan niin selkeä. Kuitenkin laskettaessa keskiarvot ensimmäisiltä kolmelta talvelta, keskimmaisiltä kolmelta talvelta ja viimeisiltä kolmelta talvelta huomataan, että alkupuolen talvet ovat kaikkein lumisimpia, keskimmaisiksi vähälumisimpia ja viimeiset lumisempia kuin keskimmaisiksi, mutta eivät yhtä lumisia kuin ensimmäiset. Sademääriin tämä sykli ei päde, sillä vastaavanlaisella jaottelulla lasketut kolmen talven sademäärän keskiarvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Näiden tulosten perusteella voidaan tehdä oletus, että talvet lauhtuvat ja niiden lumisuus vähenee, mutta sademäärä pysyy karkeasti arvioituna samanlaisena. Tämän oletuksen vahvistaminen vaatisi selvästi pidempää tarkastelujaksoa, mutta näistäkin tuloksista saatuja viitteitä ilmaston kehityksestä voidaan pitää loogisina huomioiden globaali ilmaston lämpeneminen.

Tulosten pohjalta voidaan päätellä, että routanousun kannalta riskialttein talvi on sellainen, joka sisältää pitkäaikaisen pakkasjakson ja jonka aikana lumimäärä pysyy sellaisena, että se hidastaa routarajan etenemistä, mutta ei kuitenkaan estä sitä täysin. Toisaalta tuloksista nähdään, että koko talven ei välttämättä tarvitse olla kylmä. Yksittäinenkin lyhyempi pakkasjakso kohtuullisen vähälumisena aikana riittää aiheuttamaan tehokkaasti routanousua. Tästä hyvä esimerkki on talvi 2015–2016. Näistä tuloksista huomataan kuitenkin, että suurimmat routanousut aiheutuivat lumipeitteen ollessa maassa, joten paksunkaan lumikerroksen eristävä vaikutus ei riitä kokonaan hillitsemään roudan tunkeutumista maaperään. Päinvastoin jonkinlainen lumipeite voi olla jopa edellytys routarajan riittävän hitaalle etenemiselle ja suurelle routanousulle.

Saatujen tulosten ja tehtyjen havaintojen pohjalta voidaan todeta, että tällä hetkellä ilmasto-olosuhteet eivät aiheuta suurta riskiä routamitoitusten riittävyydelle, eikä routanousun suuruudessa tai roudan syvyydessä ole ainakaan tällä tarkastelujaksolla ja tällä mittauspisteellä tapahtunut muutoksia huonompaan suuntaan. On hyvä kuitenkin huomioida, että luotettavien tulosten saamiseksi tarkastelujakson tulisi olla vielä merkittävästi pidempi. Varkauden mittauspiste ei edusta nykyisten ohjeiden mukaista rakennetta, sillä rataosuudella on selkeästi ongelmia roudan kanssa. Toisaalta olisi oletettavaa, että ilmasto-olosuhteet vaikuttaisivat ensimmäiseksi juuri tällaisiin kohteisiin. Taulukosta 2 nähdään, että kokonaispakkasmäärältään leutoinkin talvina voi aiheutua kohtuullisen suurta routanousua, joten ilmaston lämpeneminen ja talvien lauhtuminen ei poista routimisesta aiheutuvia ongelmia, eikä se välttämättä pienennä aiheutuvaa routanousua. Tällainen olosuhteiden muutosten trendi aiheuttaa ennemminkin sen, että pakkasjaksot lyhenevät ja routanousu muodostuu lyhyemmällä aikavälillä, eikä se välttämättä kestä läheskään koko talvea. Ratarakenteen osittainen jäätyminen lisää rakenteen vesipitoisuutta ja altistaa sitä muodonmuutoksille. Routiminen tulee tulevaisuudessaakin aiheuttamaan haasteita radan tasaisuusvaatimusten täyttymiselle ja routimisen kehitystä on hyvä jatkossakin aika ajoin tarkastella.

7. LÄHTEET

- Huttunen, L. & Soveri, J. 1993. Luonnontilaisen roudan alueellinen ja ajallinen vaihtelu Suomessa. Helsinki, Vesi- ja Ympäristöhallitus, Vesi- ja Ympäristöhallinnon julkaisuja – sarja A, 139. 77 s. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/156324/Vesi-%20ja%20ymp%c3%a4rist%c3%b6hallinnon%20julkaisuja%20A%20139.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Isohaka, M. 2013. Veden saatavilla olon vaikutus radan routimiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 132 s. + liitt. 7 s. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22058/Isohaka.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Kujala, K. 1994. Routanousun mallintaminen. Kirjallisuusselvitys. Oulu, Tielaitos, Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. 136 s. Saatavilla: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/139491/4702tie.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Luomala, H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Helsinki, Liikennevirasto, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. 85 s. + liitt. 10 s. Saatavilla: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121400/lts_2010-22_978-952-255-543-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Metsovuori, L. 2013. Sulamispainuminen radan epätasaisuuden aiheuttajana. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 93 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21767/Metsovuori.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Murto, P. 2012 Maansulatusmenetelmät. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikka. 38 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41915/Maansulatusmenetelmat.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2002. Ratarakenteen routasuojaus. Helsinki, Ratahallintokeskus, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. 101 s. + liitt. 14 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rhk_2002_a1.pdf
- Penner, E. 1962. Ground Freezing and Frost Heaving. National Research Council Canada. CBD-26. Saatavissa: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=15f6f5eb-a070-4327-aec4-71472a903119>
- Penttilä, J. 2013. Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 113 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21411/penttila.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Pylkkänen, K. & Nurmikolu, A. 2015 Routa ja routiminen ratarakenteissa. Helsinki, Liikennevirasto, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015. 210 s. + liitt. 30 s. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121499/lts_2015-22_978-952-317-089-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ratatekniset ohjeet (RATO 3) osa 3, Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018. Liikennevirasto, Helsinki. 39 s. + liitt. 54 s. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-13_rato3_web.pdf

Soininen, S. 2013. Ratojen routaongelmat Suomessa. Helsinki Liikennevirasto, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 56/2013. 92 s. + liitt. 4 s. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121441/lts_2013-56_978-952-255-392-8.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Soveri, J., Varjo, M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Helsinki. 77 s. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/156324/Vesi-%20ja%20ymp%C3%A4rist%C3%B6hallinnon%20julkaisuja%20A%20139.pdf?sequence=4>

Tampereen yliopiston tekniikan alan opinnäytteiden kirjoitusohje. Tampereen yliopisto, Tampere, 2018. Saatavissa: POP > Opiskelu > Diplomityö > Diplomityöohje 55 s. + liitt. 5 s. Saatavissa: https://content-webapi.tuni.fi/proxy/public/2019-10/tau_tekniikan_alan_opinnaytetyoohje_2019_versio3.pdf