

Seppo Saarelainen & Lasse Makkonen

# Ilmastonmuutokseen sopeutuminen tienpidossa

Esiselvitys

Tiehallinnon selvityksiä 4/2007



Kittilä 2005



Oravainen 2004



Vesanto 2004



Seppo Saarelainen & Lasse Makkonen

# **Ilmastonmuutokseen sopeutuminen tienpidossa**

**Esiselvitys**

**Tiehallinnon selvityksiä 4/2007**

**Tiehallinto**

Helsinki 2007

*Kansikuva: Tiesortuma maantiellä 5511, Vesannolla, heinäkuussa 2004 (valok. J Kohonen),  
Tulva valtatiellä nro 8 Oravaisissa elokuussa 2004 (valok. Fjalar Dupsjöbacka),  
Tulva Kittilässä toukokuussa 2005 (valok. Sauli Koski)*

ISBN 978-951-803-819-4  
ISSN 1457-9871  
TIEH 3201029

Verkkojulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISBN 978-951-803-820-0  
ISSN 1459-1553  
TIEH 3201029-v

Edita Prima Oy  
Helsinki 2007

[www.tiehallinto.fi](http://www.tiehallinto.fi)

Julkaisua myy/saatavana  
Edita (asiakaspalvelu.prima@edita.fi)  
Faksi 020 450 2470  
Puhelin 020 450 011



Painotuote

Tiehallinto  
Asiantuntijapalvelut  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelin 0204 22 11

**Asiasanat:** Ilmasto, varautuminen, tienpito, talvihoito, tutkimus

**Aiheluokka:** 70, U551

## TIIVISTELMÄ

Tierakenteiden ja kuljetusjärjestelmien haavoittuvuus ilmastonmuutoksen vaikutuksille riippuu niiden vaikutusvasteesta. Vaikka merkittävä osa sää- ja keliolojen vaikutuksista otetaan nykyisinkin huomioon suunnittelussa, niin vaikutusten voimakkuuden muuttuminen ja äkilliset vaihtelut saattavat aiheuttaa tarpeen muuttaa rakentamistapaa.

Viime vuosina on ilmennyt poikkeavia säätapauhtumia, kuten tulvia ja myrskyjä, jotka ovat aiheuttaneet kansalaisten liikkumiselle ja elinkeinoelämän kuljetuksille haittaa ja vahinkoja. Realistista kuvaa rakenteiden kestävyysparantamistarpeesta saadaan, jos ääritilanteita tutkitaan "koekuormituksina", jolloin saadaan tietoa vahinkojen syntymisestä ja niiden aiheuttamista kustannuksista. Suunnittelumenetelmien soveltamista voidaan selvittää dokumentoiduissa pilottikohteissa.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksiin varautuminen tienpidossa ja liikenteessä sisältää seuraavia tehtäviä:

- Suojelusuunnittelu (pelastustoimi). Suojelu- ja pelastustoiminnan tehtävien, sisällön, kohdistamisen ja organisoinnin määrittely (esimerkkinä Lapin tiepiirin käyttöönotto toimintaohje tienpidon varautumisesta tulvan aikana, 2005).
- Kunnossapidon sopeuttaminen (mm. liukkaudentorjunta, lumenpoisto, tulvasuojaus, eroosiontorjunta). Kriittisten säävaikutusten kohdalla on määriteltävä toimintatavat, menetelmät ja organisoituminen sekä akuutissa toiminnassa että toiminnan kehittämistarve pitkällä aikajännteellä vaikutusten voimakkuuden ja toistuvuuden muuttuessa.
- Suunnittelukriteerien tarkistaminen (tuuli, sade, tulvakorkeudet) ja teiden rakenteellinen parantaminen palvelutason varmistamiseksi.
- Rakenteiden kestävyysparantaminen (kuivatuksen parantaminen, eroosiosuojaus, tien tasauksen nostaminen).
- Varoitukset ja tiedotus. Poikkeavista säävaikutuksista tulisi varoittaa ennalta reaaliaikaisesti, ja tiedotus tulisi tehdä oikealla tavalla ja oikeita kanavia käyttäen.

Nyckelord: Klimatförändring, beredskap, anpassning, vägunderhåll, vinterunderhåll, forskningsbehov

Ämnesklass: 70, U551

## SAMMANFATTNING

Sårbarheten inom vägbyggnader och trafiksystem för klimatändringars effekter beror på deras reaktion. Fast en betydande del av inverkan pga. väderleks- och väglagsförhållanden iaktas idag i dimensioneringen, så kan förändringar och plötsliga variationer i intensiteten förorsaka behov att ändra byggnadssätt och underhåll.

Under de senaste åren har framkommit extrema väderlekshändelser liksom översvämningar och stormar, som har förorsakat hinder och skadeverkningar för den allmänna trafiken och näringslivets transporter. En realistisk insyn i förbättringsbehov inom vägars hållbarhet kan skapas, om extrema händelser studeras som "provb belastningar". Tillämpning av dimensioneringsmetoder kan vidare utredas med hjälp av bestämda, väl dokumenterade pilotprojekt.

Beredskap för klimatändringar inom vägunderhåll och trafik innebär följande uppgifter:

- Skyddsplanering (räddning). Bestämning av uppgifter, innehåll, riktning och organisering inom skydds- och räddningsverksamheten (som exempel, verksamhetsdirektiv för väghållningens beredskap under översvämningar i Lapplands vägdistrikt, 2005).
- Anpassningen i vägunderhåll (t.ex. halkbekämpningen, snöröjningen, skydd mot översvämningar, erosionsbekämpningen). För kritiska vädereffekter måste man bestämma operationsprinciper, metoder och organiseringen i akuta lägen och utvecklingsbehov på en längre sikt med hänsyn till förändringar i inverkans intensitet och återkomsttid.
- Granskning av dimensioneringskriterier (vind, nederbörd, högvattennivåer) och förstärkning på befintliga vägar för att säkra servicenivån för trafiken.
- Förbättring av vägbyggnaders hållbarhet (förbättringar i avvattningen, erosionsskyddet, vägytans höjdnivåer).
- Varning och upplysning. Om viktiga, avvikande vädereffekter borde man varna på förhand, Upplysningen borde genomföras på ett rätt sätt och genom rätta kanaler.

**Keywords:** Climate change, proactive measures, adaptation, road management, winter maintenance, research need

## ABSTRACT

Vulnerability of roads and transport systems to climate change impacts depends on their level of response. Although a significant share of the impacts is already today taken into account in the design, a change in the impacts may cause a need to change road structures.

In recent years, several exceptional weather incidents have occurred, like floods and storms, causing disadvantage and damage to the traffic and transport. A realistic insight in the need of structural improvement may be achieved, if these extreme incidents are studied as "test loadings" to get information and data on the development and costs of damage. Application of investigation and design methods can be tested in documented pilot projects.

Adaptation and proactive measures against climate impacts are, as follows:

- Contingency planning (rescue operations). Description of tasks, contents, focusing and organising in protection and rescue planning operations (e.g. the guidelines for reservation of road management during flooding by the Road District of Lapland, 2005).
- Adaptation of road maintenance (friction control, snow removal, protection against flooding, erosion control and so on). For critical weather-borne impacts, operations, methods and organising have to be defined both for acute actions as well as the need of development in the activities in a long run, considering the changes in the intensity and occurrence of impacts.
- Control of design criteria (wind, precipitation, flood levels) and improvement of current roads to assure the service level.
- Improvements in the strength of roads (improvement of drainage, erosion control, rising the road surface levels).
- Warning and informing. Occurrence of coming, important weather events should be pre-informed and warned in advance, applying correct methods and channels.

## ESIPUHE

Ilmastonmuutosta voidaan käsitellä joko ilmiön syntymisen tai sen aikaansaamien vaikutusten suhteen. Ilmastonmuutokseen johtavat vaikutukset ovat globaalisia. Yhteiskunnan toiminnan kannalta on tarpeen arvioida niitä toimenpiteitä, joita tarvitaan ilmastonmuutokseen sopeutumiseksi sekä sen tuottamien haittojen ja vahinkojen minimoimiseksi. Toimenpiteiden tarve on arvioitava todennäköisen ilmastovaikutuksen muutoksen perusteella.

Esiselvitys käynnistettiin kesällä 2006 Tiehallinnon toimeksiannosta. Selvitystyötä valvoi ohjausryhmä, johon kuuluivat ympäristöasiantuntija Eira Järvi- luoma Lapin tiepiiristä, tiemestari Esa Kaitala Lapin tiepiiristä, kunnossapito- vastaava Asko Pöyhönen Savo-Karjalan tiepiiristä sekä kehittämisspäälikkö Raija Merivirta Tiehallinnosta. Raportin laativat erikoistutkija Seppo Saare- lainen ja erikoistutkija Lasse Makkonen Valtion teknillisestä tutkimuskeskuk- sesta.

Tietoja toteutuneista tulvatapahtumista toimittivat selvitystyön aikana mm. tiemestarit Tapio Schultz ja Esa Kaitala Lapin tiepiiristä, tiemestari Fjalar Djupsjöbacka ja tieinsinööri Raimo Sillanpää Vaasan tiepiiristä, kunnossapi- tovastaava Asko Pöyhönen Savo-Karjalan tiepiiristä ja suunnittelupäälikkö Anders H. H. Jansson Tiehallinnosta.

Esiselvitys tehtiin Tiehallinnon tutkimusteeman ”Ekotehokas ja turvallinen liikennejärjestelmä” rahoituksella.

Otaniemessä tammikuussa 2007

Tiehallinto

Asiantuntijapalvelut

## Sisältö

<b>1</b>	<b>ILMASTONMUUTOKSEN SKENAARIOT TIENPIDON KANNALTA</b>	<b>15</b>
1.1	Tausta	15
1.2	Tärkeimmät ilmaston osatekijät ja vaikutukset	15
1.3	Yhteenveto todennäköisenä pidettävistä tienpidon kannalta merkittävistä muutoksista Suomen ilmastossa vuoteen 2100 mennessä	23
1.4	Ilmastonmuutoksen vaikutukset tienpitoon ja liikenteeseen	25
1.4.1	Maantiet	25
1.4.2	Kuljetusjärjestelmät	25
1.4.3	Tierakenteet	25
1.4.4	Kunnossapito ja liikenne	26
<b>2</b>	<b>KESÄN 2004 JA KEVÄÄN 2005 TULVAT</b>	<b>28</b>
2.1	Tausta	28
2.2	Tulvat Pohjois-Savossa ja Keski-Suomessa heinäkuussa 2005	28
2.2.1	Tulvavahingot	31
2.3	Ennätyksellisen kaatosateen aiheuttama tulva Pohjanmaalla 4.8.2004	31
2.4	Merenpinnan nousu Suomenlahden rannikolla tammikuussa 2005	33
2.5	Lumen sulamisen ja rankkasateen aiheuttamat tulvat Lapissa touko- ja kesäkuun vaihteessa 2005	34
2.6	Tulvien aiheuttamat vauriot ja ongelmat	35
2.6.1	Vahinkokustannukset	36
2.6.2	Muut ongelmat	36
<b>3</b>	<b>VARAUTUMISTARVE SEKÄ SUUNNITTELU- JA RAKENTAMISTAVAN MUUTOSTARPEET</b>	<b>37</b>
3.1	Ennakointi ja varautuminen	37
3.2	Tien kuivatustarpeen paikallinen arviointi ja rakenneratkaisut	37



---

3.3	Varautuminen rankkasateen aiheuttamiin vesistötulviin	38
3.3.1	Tulvariskin arviointi	38
3.3.2	Vesistötulvan vaikutusten rajoittaminen	39
3.3.3	Pelastus- ja suojelutoimenpiteet vesistötulvatilanteessa	39
3.4	Varautuminen merenpinnan nousuun	40
3.4.1	Tulvariskin arviointi ja rajoittaminen	40
3.4.2	Pelastus- ja suojelutoimenpiteet tulvatilanteessa	40
3.5	Liukkaudentorjunnan kehittäminen	41
3.5.1	Liukkauden tunnistaminen ja ennakointi	41
3.5.2	Liukkaudentorjuntamenetelmät	42
3.5.3	Pelastus- ja suojelutoimenpiteet liukkaustilanteessa	42
3.6	Varautuminen lumimyrskyihin	43
3.6.1	Lumiolojen muuttuminen	43
3.6.2	Lumisateen, kinostumisen ja auraustarpeen ennakointi	43
3.6.3	Kinostumisen torjunta	43
3.7	Varautuminen routaolojen muuttumiseen	44
3.7.1	Roudan syvyyden ja routanousun muuttuminen	44
3.7.2	Painorajoituskauden muuttuminen	44
3.8	Muut vaikutukset ja riskit	45
3.8.1	Syyskelirikko	45
3.8.2	Kuivien kesien aiheuttama painumariski	46
3.8.3	Päällysteen pakkasvaurioiden syntyminen ja estäminen	46
4	TUTKIMUS- JA KEHITTÄMISTARVE	47
4.1	Menetelmäkehitys	47
4.2	Vaurioiden ja vahinkojen dokumentointi	47
4.3	Koesuunnittelu ja -rakentaminen	47

---

4.4	Suljetun tieosan liikenteelle ja kuljetuksille aiheutuvan haitan arviointi	48
4.5	Ilmastonmuutokseen sopeutumisen taloudellinen arviointi	48
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	49
6	VIITTEET	51

---

# 1 ILMASTONMUUTOKSEN SKENAARIOT TIENPIDON KANNALTA

## 1.1 Tausta

Ilmastonmuutoksen skenaarioita ilmaston erilaisista osatekijöistä on laadittu ilmastomallisimulointien avulla perustuen erilaisiin globaaleihin kasvihuonekaasujen päästöskenaarioihin. Nämä taas perustuivat erilaisiin yhteiskunnan kehitysvaihtoehtoihin – markkinalähtöisiin, kestäväan kehitykseen sekä säästöperusteisiin. Globaaleista ilmastonmuutosskenaarioista on laadittu Suomea koskevia ilmastonmuutosskenaarioita yhdistämällä eri globaalien ilmastomallien Suomen aluetta koskevia tuloksia (Carter et al. 2005, Ruosteenoja et al. 2006) tai käyttämällä tarkempaa alueellista ilmastomallia, jossa globaalien mallien tulokset olivat rajaehtoina (Räisänen et al. 2004).

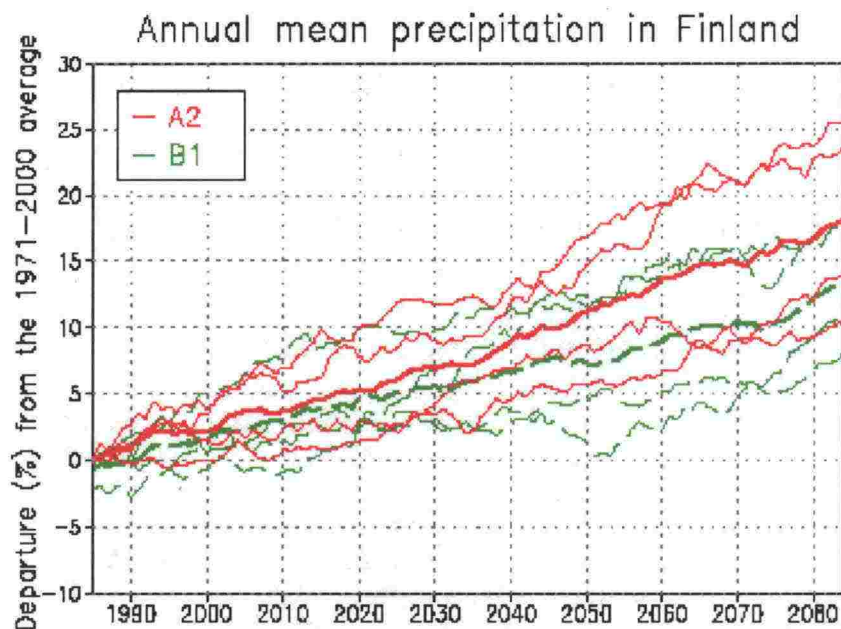
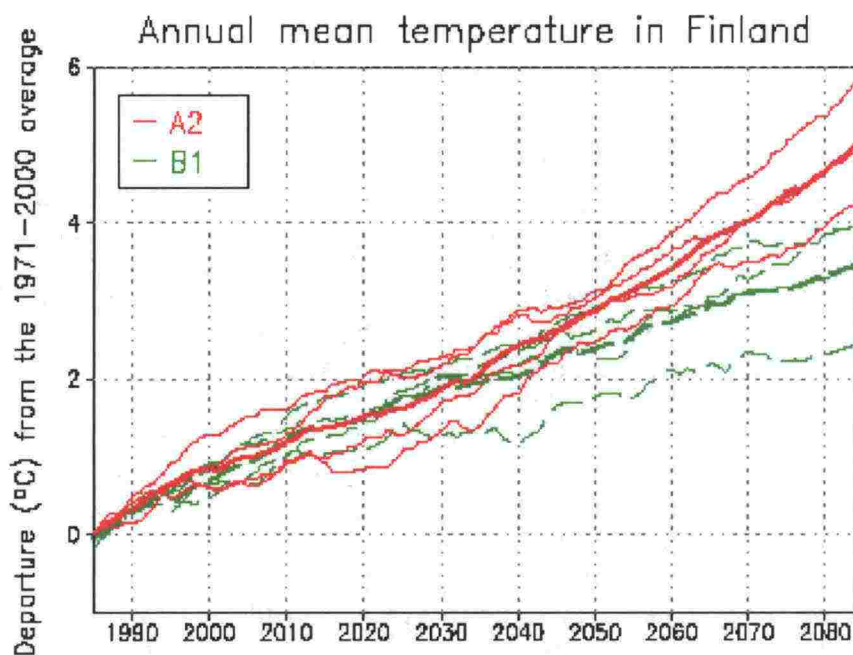
Havaintojen mukaan viime vuosisadalla maapallon keskilämpötila nousi 0,8 °C. Pitemmällä ajanjaksolla näyttää siltä, että viime vuosisata olisi ollut lämpimin tuhanteen vuoteen. Lämpötilan nousu oli erityisen nopeaa 1900-luvun viimeisinä vuosikymmeninä ollen 0,6 °C 1970-luvulta alkaen. Edellä mainitut ilmastomallit voivat selittää hyvin tämän nopean lämpenemisen, kuten muutkin vaihtelut meteorologisten mittausten aikakaudella, jos niihin sisällytettiin ilmakehän sisältämien kasvihuonekaasujen konsentraation noususta johtuva vaikutus. Mallit eivät niitä selittäneet, jos tämä vaikutus jätettiin malleista pois.

Vaihtelua kuvataan yleensä keskimääräisillä muutoksilla, mutta eräiden ilmastotekijöiden muuttumista on selvitetty mallisimuloinneista myös ääriarvojen toistuvuuden muuttumisena (Makkonen et al. 2006).

## 1.2 Tärkeimmät ilmaston osatekijät ja vaikutukset

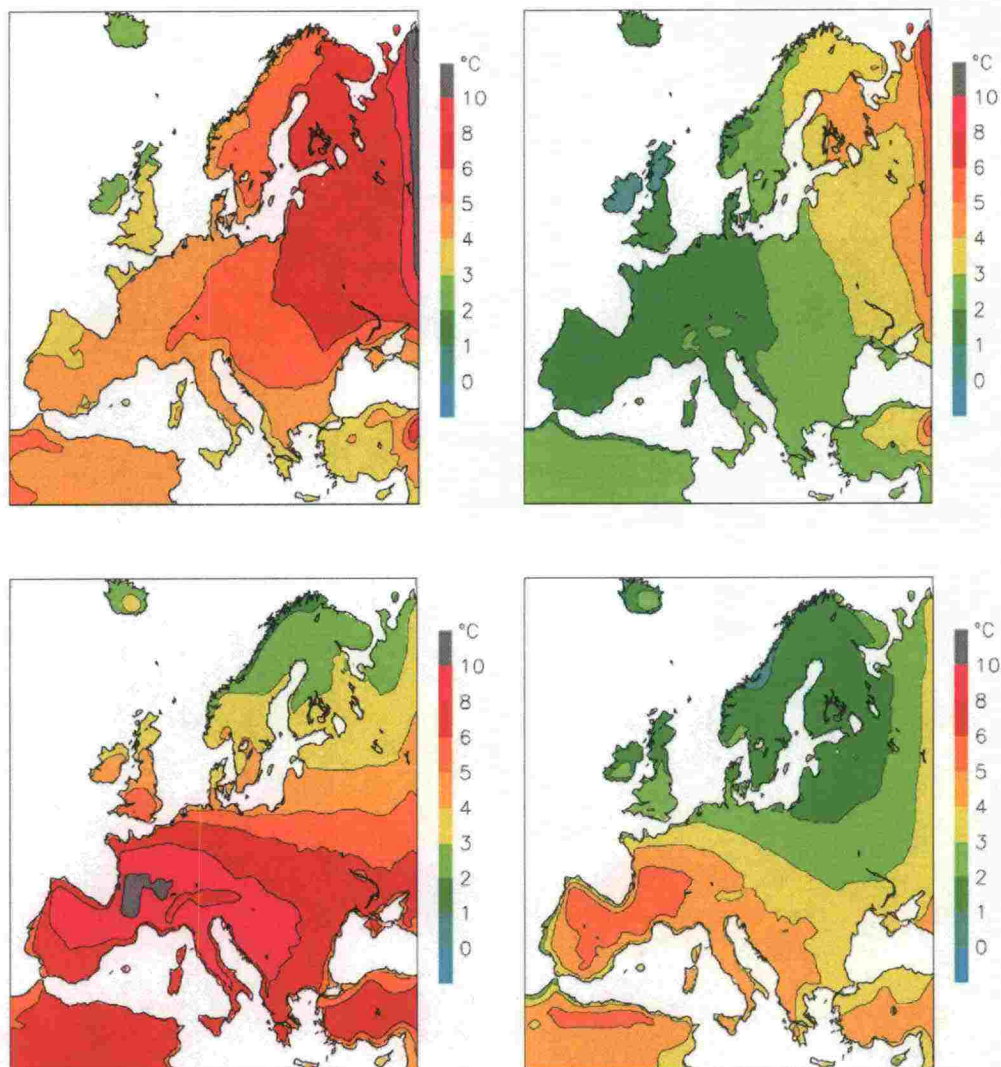
Maapallon ilmakehän lämpötilan nousu johtuen ilmakehän kasvihuonekaasujen (hiilidioksidi, metaani ym.) pitoisuuksien kasvusta on ollut huomion kohteena Finadapt-skenaarioissa (Carter et al. 2005). Ilman vuotuisen keskilämpötilan arvioitiin Suomessa nousevan vuoteen 2030 mennessä noin 2 °C, vuoteen 2060 mennessä 3–3,5 °C ja vuoteen 2080 mennessä 4–5 °C nykytasoon verrattuna. Tämä tarkoittaisi, että vuoteen 2030 mennessä Rovaniemen lämpötilaolot siirtyisivät Pohjois-Lappiin, ja että etelärannikon olosuhteet siirtyisivät Keski-Suomeen.

Suomea koskevan ilmastonmuutosskenaarion tuloksia on esitetty kuvassa 1. Samantapaisia tuloksia ovat esittäneet Ruosteenoja et al. (2006). Kuvassa 2 on vastaavia tuloksia esitetty karttana koko Euroopan alueelle. Arvioidut muutokset olivat suurempia talvella kuin kesällä: Noin sadan vuoden aikana keskilämpötilan nousu olisi kesällä n. 4 °C ja talvella n. 6 °C.



Kuva 1 Arvio ilman keskilämpötilan ja sadannan muuttumisesta vuoden 1985 tasoon verrattuna (Carter et al. 2005). A2 ja B1 ovat kaksi erilaista Kansainvälisen Ilmastopaneelin määrittelemää globaalia päästöskenaariota, joihin mallilaskelmat perustuvat. Paksut käyrät kuvaavat neljällä eri ilmastomallilla simuloitujen tulosten keskiarvoa.

Tulevassa, nykyistä lämpimämmässä ilmastossa odotetaan lumipeitteen levinneisyyden pienenevän ja lumisen kauden pituuden lyhenevän, lumipeitteen satavan myöhemmin syksyllä ja lumen sulavan keväällä aikaisemmin. Järvet ja meret jäätyvät myöhemmin, ja jäiden lähtö aikaistuu.

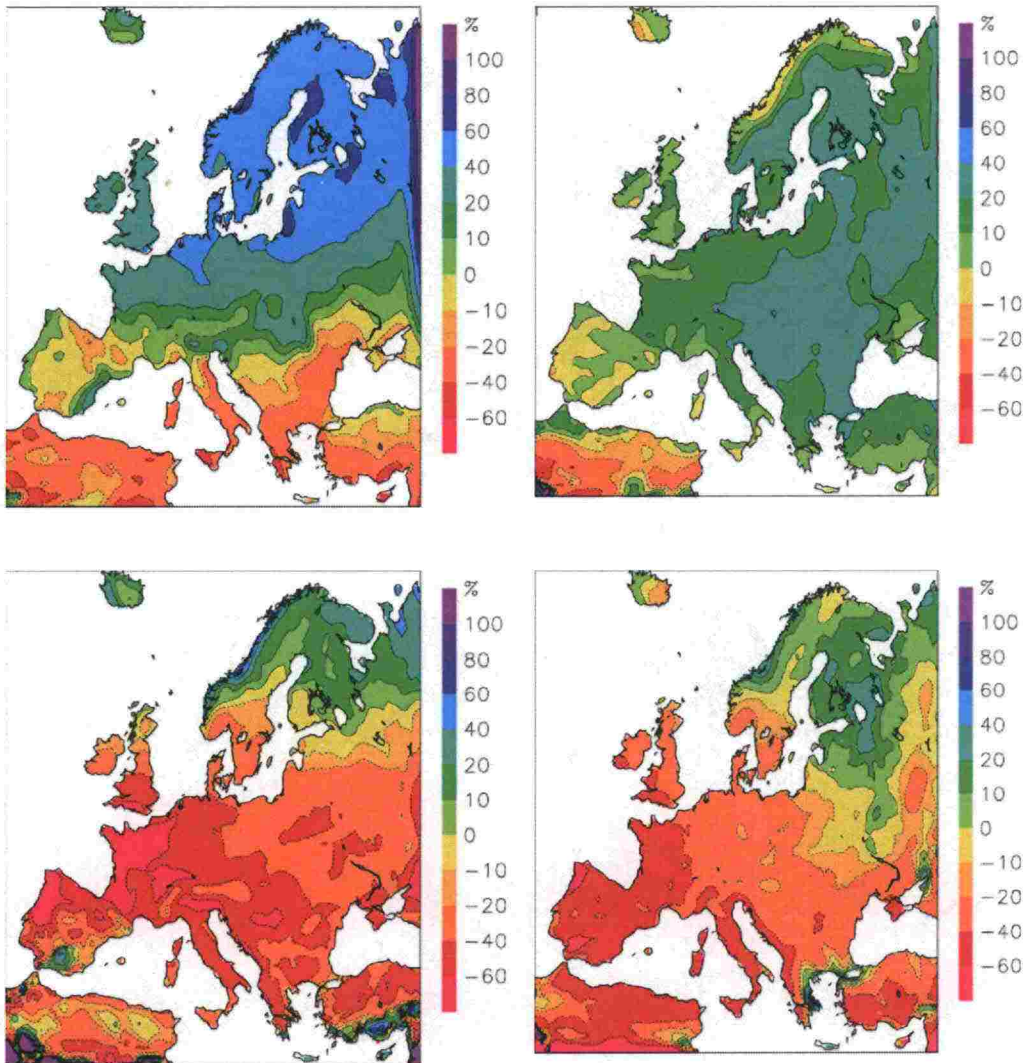


Kuva 2 Laskettu keskilämpötilan nousu 2 metrin korkeudella talvikuukausina (ylemmät kuvat) ja kesäkuukausina (alemmat kuvat). Vasemmalla esitetään Rossby Centren skenaariot suurimmalle muutokselle ja oikealla pienimmälle muutokselle.

Edellä mainitut tutkimukset viittasivat siihen, että kesällä poutajaksot lämpenevät ja pitenevät, jolloin pohjaveden pinta alenee.

Lisääntyvät sateet, joita koskevia mallituloksia on esitetty kuvassa 3, aiheuttavat enemmän tulvia vesistöissä ja vesiuomissa. Tulviminen saattaa ylittää kuivatusrakenteiden mitoitusastoa, jolloin tulvan aiheuttamat vahingot yleistyvät ja kasvavat.

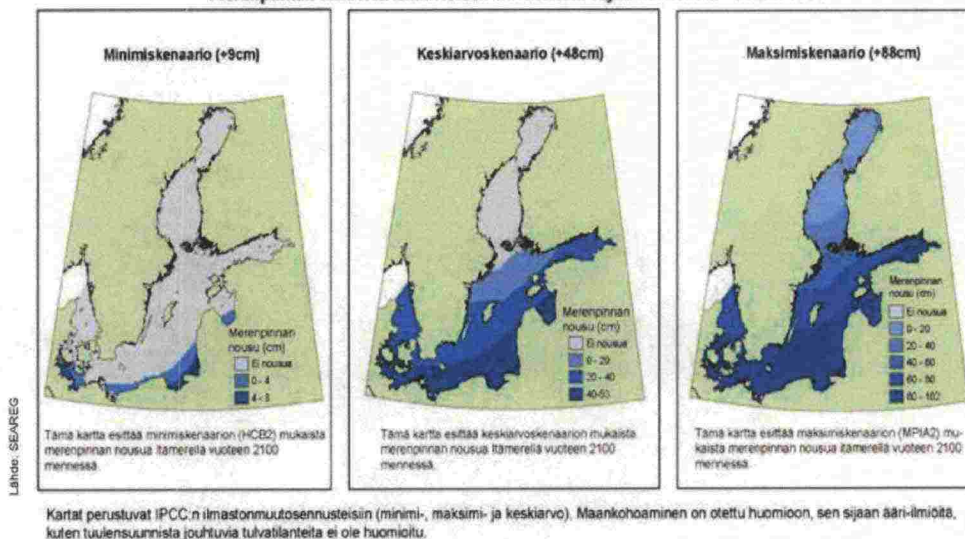
Vedenpinnan korkeudet vesialtaissa saattavat muuttua. Jos sadanta kasvaa, vesiuoman virtauskapasiteetti saattaa ylittyä erityisesti säännöstelemättömissä joki-järvi-vesistöissä. Ongelmia voi syntyä myös säännöstellyissä vesialtaissa, jos purku-uoman kapasiteetti merkittävästi ylittyy. Ennakoitu sademäärän kasvu ei kuitenkaan kohdistu kevääseen, joten – kun lumen vesiarvokin pienenee – kevättulvat eivät ilmeisesti tule pahenemaan.



Kuva 3 Laskettu sadannan muutos talvikuukausina (ylemmät) ja kesäkuukausina (alemmat). Vasemmalla Rossby Centren suurimman muutoksen ja oikealla pienimman muutoksen skenaariot.

Itämeren pinta seuraa valtameren vedenpinnan kehitystä. Keskimääräiseen vedensyvyyteen suhteessa maanpintaan vaikuttaa kuitenkin maanpinnan nousu, joka on suurinta Pohjanlahdella (max 10 mm/a) ja pienenee etelään ja itään päin, ollen Helsingissä noin 3 mm/a ja Haminassa 1–2 mm/a. Maan nousun vuoksi Suomen rannikoilla keskivedenkorkeuden muutosten arviointiin jäävän lähimmän vuosisadan aikana vähäisiksi (vrt. kuva 4).

Merenpinnan muutosskenaarioiden talvikeskiarvojen korkeudet vuonna 2100



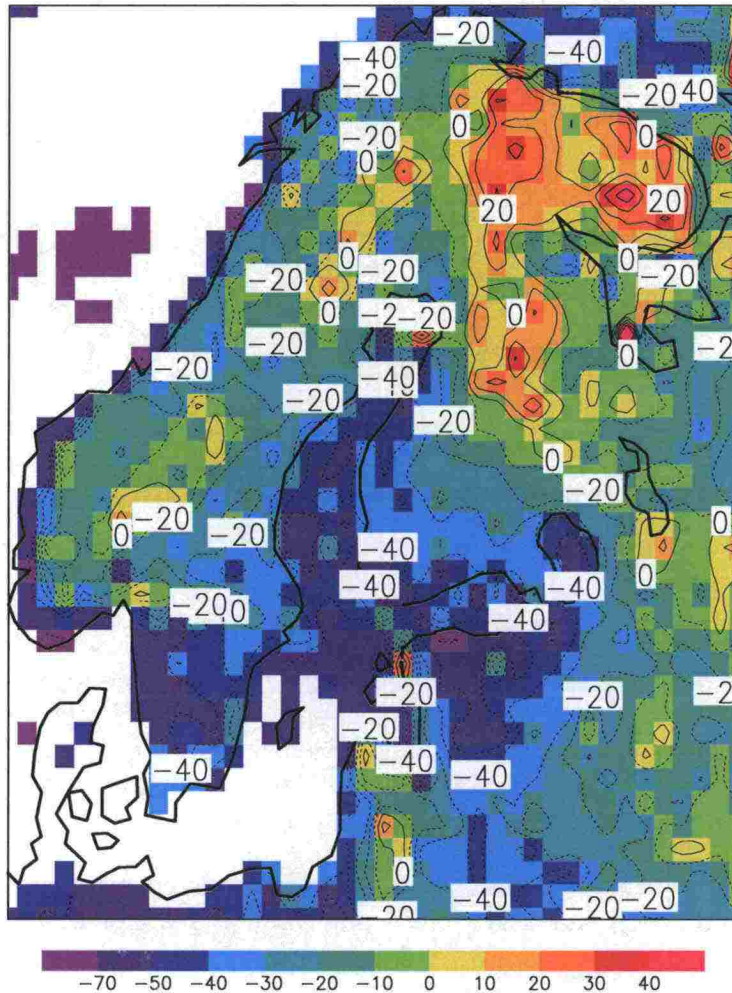
Kuva 4 Itämeren korkeus vuonna 2100 erilaisten valtameren pinnan noususkenaarioiden mukaan (SEAREG, Heikkinen 2006)

Vuoden 2005 tammikuun tulva etelärannikolla, Suomenlahdella, oli tällainen tulva: myrskymatala, johon liittyi myrskyinen länsituuli. Seurauksena vedenpinta nousi Haminassa noin 1,95 metriä, Helsingissä noin 1,5 metriä ja Hangossa noin 1,3 metriä keskiveden yläpuolelle. Tulvahuipun kesto oli muutamman tunnin pituinen. Tämäntapaiset myrskytulvat voivat ilmastonmuutoksen takia yleistyä, mutta asian varmistaminen edellyttää lisätutkimuksia. Ääritilanteisiin liittyvien tuulenopeuksien ei tämänhetkisten mallitulosten perusteella arvioitu Suomessa kasvavan merkittävästi (Makkonen et al. 2006).

Leudompien talvien myötä jäätymis-sulamissykleihin liittyvä lämpötilavaihtelu 0 °C:n yli vähenisi Etelä-Suomessa, mutta lisääntyisi Pohjois-Suomessa, jossa siten lisääntyisi liukkaudentorjunnan määrällinen tarve (Venäläinen 2000). Etelä-Suomessa liukkauskauti lyhenee, mistä johtuen liukkaudentorjunta määrällisesti vähenisi. Tätä koskeva alustava mallitulos on esitetty kuvassa 5.

Hetkellinen vedenkorkeus määräytyy keskivedenkorkeuden, ilmanpaineen ja tuulen sekä aallonkorkeuden perusteella. Ilmanpaineen aleneminen millibaarilla aiheuttaa tyypillisesti noin 10 mm vedenpinnan nousun. Pitkäaikainen myrskytuuli painaa pintavettä mukanaan, ja nostaa vedenpintaa, kun virtaus kohtaa rannan tai vesisyvyys pienenee.

$\Delta$  50yr-Ret. Value FT cycles, RHA2-RHC (%)



Kuva 5 Esimerkki Rossby Centren alueilmastomallilla simuloidusta muutoksesta. Lämpötilan  $0^{\circ}\text{C}$  ylitys/alituskertojen muutos (%) tämän vuosisadan aikana.

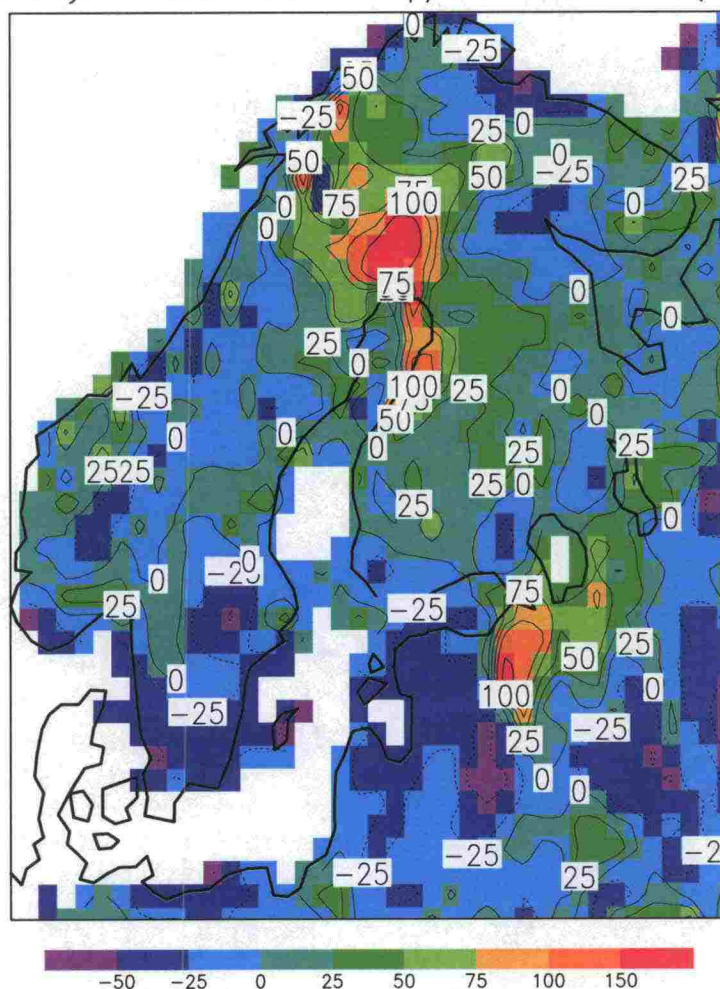
Alueellisen ilmastomallinnuksen tulokset viittaavat siihen, että lumen auraus vähenee etelässä, ja että aurauksen tarve säilyy nykyisellään tai kasvaa Keski- ja Pohjois-Suomessa (kuva 6). Kuvan 6 voimakas maksimi Perämeren pohjoispuolella on simulointimallin epävarmuutta kuvastava, ei edustava mallinnustulos.

Ilmasto ei kuvata vain keskiarvoilla, vaan myös poikkeamilla näistä. Yksittäiset säätaapahtumat, kuten myrskyt ja rankkasateet, ovat esimerkkejä suurista poikkeamista.

Infrastruktuurin rakenteiden mitoitus perustuu tällaisten poikkeavien ilmiöiden esiintymisen toistuvuuksien arviointiin. Tätä kuvataan esim. rakennusnormeissa yleensä siten, että arvioidaan sellaisen mitoittavan luonnonilmiön voimakkuus, jonka toistuvuus aika on 50 vuotta. Myös nämä mitoitussarvot muuttuvat – ja mahdollisesti eri tavoin kuin keskiarvot.



$\Delta$  50yr-Return Value Snowp/6h, RHA2-RHC (%)

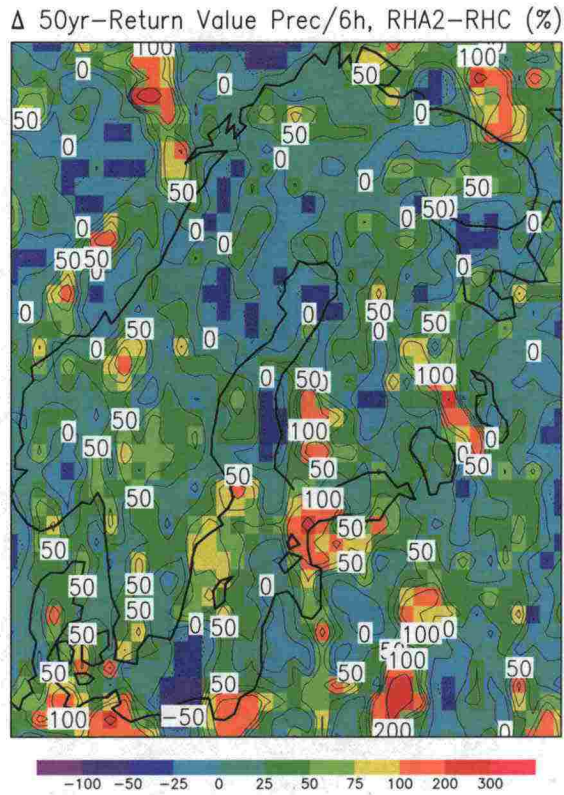


Kuva 6 Esimerkki Rosby Centren alueilmastomallilla lasketusta 50 vuoden toistuvuusajalla esiintyvistä kuuden tunnin aikana sataneen lumen vesiarvon prosentuaalisesta muutoksesta tämän vuosisadan aikana.

Mitoitukseen liittyvien hetkellisten ääriarvojen lisäksi pitkät jaksot, jolloin ei ilmene ääri-ilmiötä, voivat myös muodostua poikkeaviksi ja aiheuttaa ääri-ilmiön tapahtuman, kuten kuivuuden. Ilmastonmuutosta kuvattaessa on siis myös huomioitava, miten erilaisten kumulatiivisten ilmiöiden esiintyminen muuttuu.

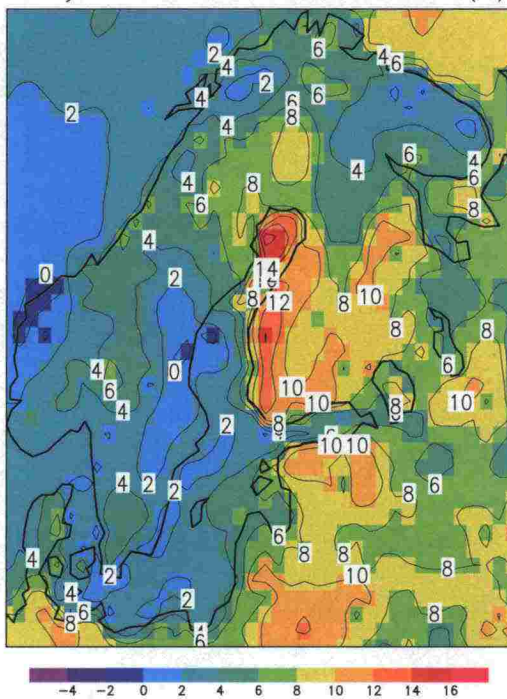
Mitoittavien ääri-ilmiöiden ennakoitua muuttumista Suomessa on esitetty kuvissa 7–9.

Kuvasta 7 nähdään, että lyhytaikaisten äärisateiden voimakkuus kasvaa selvästi. Maksimilämpötilojen nousu (+4...+14 °C, kuva 8) ja varsinkin minimilämpötilojen nousu ((+5...20 °C, kuva 9) on huomattavaa.



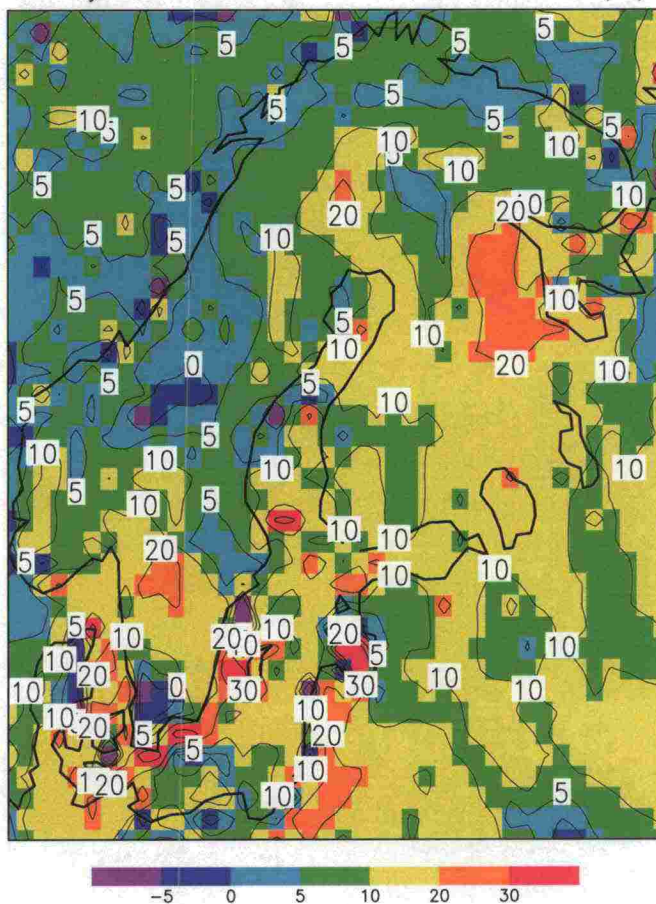
Kuva 7 Esimerkki Rossby Centren alueilmastomallilla lasketusta 50 vuoden toistuvuusajalla esiintyvän kuuden tunnin sademäärän muutoksesta (%) tämän vuosisadan aikana.

$\Delta$  50yr-Return Value T2max, RHA2-RHC (°C)



Kuva 8 Esimerkki Rossby Centren alueilmastomallilla lasketusta 50 vuoden toistuvuusajalla esiintyvän maksimilämpötilan muutoksesta (°C) tämän vuosisadan aikana.

$\Delta$  50yr-Return Value T2min, RHA2-RHC (°C)



Kuva 9 Esimerkki Rossby Centren alueilmastomallilla lasketusta 50 vuoden toistuvuusajalla esiintyvän minimilämpötilan muutoksesta (°C) tämän vuosisadan aikana.

### 1.3 Yhteenveto todennäköisenä pidettävistä tienpidon kannalta merkittävistä muutoksista Suomen ilmastossa vuoteen 2100 mennessä

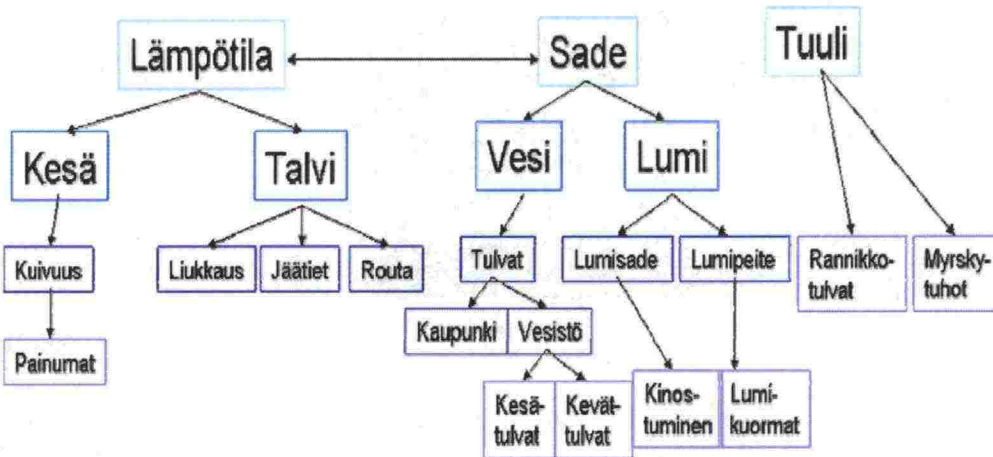
- Keskilämpötilat nousevat 3–5 °C.
- Kesien maksimilämpötilat nousevat noin 5 °C ja talvien minimilämpötilat noin 10 °C.
- Vuotuinen sademäärä kasvaa n. 15 %.
- Kuuden tunnin sekä viiden vuorokauden aikana kertyvät sademaksimit kasvavat keskimäärin 25 % ja joillakin alueilla yli 50 %. Tämän seurauksena erityisesti rankkasadetulvan riski kasvaa.
- Myös vesistöjen ja tekojärvien tulvimisriski kasvaa.
- Kevättulvat eivät merkittävästi voimistu.
- Kesät ovat kuitenkin kuivempia ja lämpimämpiä, jolloin pohjaveden pinta alenee.
- Merkittävää myrskyjen voimistumista ei tapahdu. Vähäisempi roudan syvyys voi kuitenkin johtaa runsaampaan puiden kaatumiseen talvimyrskyissä.
- Maksimilumikuormat vähenevät Etelä-Suomessa noin puoleen, mutta pysyvät Pohjois-Suomessa lähes ennallaan.
- Lumipeitteen keskimääräinen paksuus ja talven pituus vähenevät erityisesti Etelä-Suomessa.

- Lumisuuden vähenemisestä huolimatta liikennettä häiritsevien lyhytaikaisten lumisateiden voimakkuus kasvaa.
- Jäätien ylläpitoedellytykset heikkenevät.
- Vuotuinen tienpinnan jäätymis-sulamissykliä kokonaismäärä vähenee merkittävästi Etelä-Suomessa, sillä talvikausi lyhenee. Liukkauden-torjunnan tarve kasvaa Pohjois-Suomessa, kun talvet leudontuvat.

Arviot muiden liukkaudentorjunnan tunnuslukujen muuttumisesta edellyttävät lisätutkimuksia.

Säätekijöiden vaikutusketjuja tienpitoon on jäsennetty kuvassa 10.

### Säätekijät



Kuva 10 Ilmastotekijäin vaikutus tienpitoon ja tien vaurioihin.

## 1.4 Ilmastonmuutoksen vaikutukset tienpitoon ja liikenteeseen

### 1.4.1 Maantiet

Suomessa oli vuonna 2005 78 137 km maanteitä, 26 000 km katuja ja 350 000 km yksityisiä teitä (taulukko 1). Liikenteen ennakoitiin kasvavan noin 24 % ajalla 2002–2030. Suosituin kulkuneuvo oli yksityisauto (noin 74 % matkoista). Vuonna 2002 kuljetusten kokonaismäärä oli noin 41,9 mrd ton-km, mistä tiekuljetusten osuus oli 29 mrd. ton-km, rautateiden osuus 9,7 mrd. ton-km, laivakuljetusten osuus 2,9 mrd. ton-km ja uiton osuus 0,3 mrd. ton-km. Merkittävä osa tieliikenteen tavarankuljetuksista oli puuta-varan kuljetusta.

Taulukko 1 Julkiset tiet Suomessa (MMM 1/2005). Taustaselvitys.

Liikenneväylät	Määrät (km tai kpl)
Yleiset tiet <sup>1</sup>	78 137
Valtatiet	8 574
Kantatiet	4 686
Muut maantiet	28 437
Paikalliset	36 441
Sillat	13 979 kpl
Yksityiset tiet <sup>2</sup>	350 000
Pyörätiet <sup>2</sup>	11 000 (yleisten teiden yhteydessä 4 508 )
Kadut	26 000
Rautatiet <sup>3</sup>	5 836
Vesireitit <sup>3</sup>	16 000 (Merenkulkulaitoksen ylläpitämät väylät)
Lentoasemien lukumäärä <sup>3</sup>	27 kpl

### 1.4.2 Kuljetusjärjestelmät

Ilmastonmuutos vaikuttaa koko liikennejärjestelmään, ja vaikutus vaihtelee riippuen sen alttiudesta säävaikutuksille. Tieliikenne on alttiina tuulille, saateille, päälysteen jäätymiselle, tulville jne. Ääritilanteet voivat aiheuttaa ennakoimattomia yllätyksiä ja turvallisuusongelmia.

### 1.4.3 Tierakenteet

Ilmastovaikutukset huomioonottavassa tiesuunnittelussa pyritään huomioidaan ilmastovaikutukset tiettyihin, sovituihin raja-arvoihin ja rasiiksiin asti. Jos mitoitusperusteita on tarpeen muuttaa mitoitussuureiden raja-arvojen ja/tai toistuvuuden muuttuessa, on myös mitoitus päivitettävä vastaamaan muuttuneita oloja.

Lisääntyvä sadanta aiheuttaa vedenpinnan ja pohjavedenpinnan nousua. Rankkasateet lisäävät tieluiskien ja siltojen maatumien keulojen eroosiota. Tierakenteiden vaurioriski kasvaa ja elinkaari lyhenee pohjaveden nousun aiheuttaman kantavuuden alenemisen myötä. Kuivatusojien, rumpujen ja silta-aukkojen kapasiteetti saattaa muodostua riittämättömäksi tulevilla, huomattavasti lisääntyvillä (kuva 6) rankkasateilla. Eroosiosta ja vedenpaineen

kasvusta johtuen tiepenkereiden ja luiskien sortumariski kasvaa rankkasateiden ja niistä aiheutuvien tulvien vaikutuksesta (Rydell et al. 2001).

Ilmaston ääri-ilmiöiden voimistuminen ja toistuvuuden lisääntyminen lisää tierakenteiden ja laitteiden kunnossapito- ja korjaustarvetta (Saarelainen 2006a, 2006b).

#### 1.4.4 Kunnossapito ja liikenne

Lumisen kauden pituuden lyheneminen, lumisateiden määrällinen muuttuminen samoin kuin lumipeitteen paksuuden muuttuminen tulevat vaikuttamaan teiden talvikunnossapitoon. Liukkaudentorjunnan tarve, joka liittyy jäänpoistoon ja suolaukseen pakkastralämpötiloissa lähellä 0 °C, muuttuu myös talvien leudontuessa. Nykyään Etelä-Suomessa talvikunnossapito painottuu liukkaudentorjuntaan ja Keski-Suomessa sekä liukkaudentorjuntaan että lumenpoistoon. Pohjois-Suomessa paino on ollut lumenpoistossa, kun sydäntalvela kylmä sää ei ole edellyttänyt tai sallinut suolausta (Laine et al. 2000).

Talvikauden nousevat lämpötilat ja lisääntyvät sateet tarkoittavat Etelä-Suomessa lyhyempää talvikunnossapitokautta ja harvempia jäätymisrajan 0 °C ylityksiä. Samanaikaisesti liukkaudentorjunnan tarve lisääntyy Pohjois-Suomessa (Venäläinen 2000). Äärilumisateiden yleisyyden kasvu koko maassa (kuva 6) on otettava huomioon auraukseen ja talvihoidon urakoiden tilausmenettelyssä.

Liukkaudentorjunta edellyttää luotettavaa kelin mittausta ja ennakkointia tieverkolla. Tämä tarve korostuu, jos liukkaustilanteiden lukumäärä kasvaa. Liukkaudentorjuntaa ja torjuntatoimien kohdentamista ja ajoitusta voidaan täsmentää paikallisia mittausmenetelmiä, liukkausmonitorointia ja olemassa olevan tiesääsemaverkon palveluja kehittämällä.

Leudontuvat talvet aiheuttavat keskimäärin vähemmän routimista ja routavaurioita sekä lyhyemmän sulamiskauden (vrt. Tuomenvirta et al. 2000, Ala-Outinen et al. 2004). Routa ja kelirikko ovat kuitenkin ongelmia myös tulevaisuudessa, ja niiden huomioonottaminen tienpidossa on edelleen tarpeellista. Erityisesti kevyesti rakennettujen pienten painorajoitustarve ei muutu, vaikka kelirikko lyheneekin.

*Taulukko 2 Yhteenveto ilmastonmuutoksen ennakoituista vaikutuksista liikenteeseen Suomessa. Vaikutukset eivät ole yhteismitallisia eli lueteltujen etujen ja haittojen lukumäärästä ei voi päätellä kummat ovat määrällisesti merkittävämpiä. Jotkut vaikutuksista ovat selkeitä etuja tai haittoja, mutta toisten vaikutusten suunta on vielä epäselvä tai vaikutuksen suunta riippuu ilmastonmuutoksen voimakkuudesta.*

Haitta	Vaikutuksen suunta epäselvä tai samanaikaisesti haitta ja etu	Etu
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ratapenkereiden ja teiden sortumisriski kasvaa</li> <li>– Tulvat ja rankkasateet vaurioittavat tie- ja rataverkon rakenteita, erityisesti soratiestöllä on odotettavissa kunnossapito-ongelmia</li> <li>– Nykymitoitukselle perustuva kuivatusjärjestelyjen toimivuus vaarantuu</li> <li>– Silta- ja rumpurakenteet on mitoitettu välittämään nykyisiä virtaamia</li> <li>– Poikkeukselliset keliolosuhteet lisääntyvät</li> <li>– Liikenteen häiriöalttius kasvaa</li> <li>– Toimivuushäiriöiden korjaaminen tuottaa lisäkustannuksia, samoin varautuminen häiriöihin</li> <li>– Lisääntyvä liukkauden torjunnan tarve valtakunnallisesti, esimerkiksi tiesuolaustarve siirtyy pohjoisemmaksi</li> <li>- Jäteiden ylläpito vaikeutuu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiesuolauksen tarve toisaalla lisääntyy, toisaalla vähenee, joten kokonaiskustannus epäselvä</li> <li>• Jääolot ja lumisuus voivat vaihdella eri vuosina merkittävästi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Lumipeitteen oheneminen ja lumitalven lyheneminen tuovat kustannussäästöjä talviajan kunnossapitoon</li> </ul>

## 2 KESÄN 2004 JA KEVÄÄN 2005 TULVAT

### 2.1 Tausta

Ilmastonmuutoksesta odotettavissa olevat haitat ja vahingot liitetään ilmasto-tekijäin ääri-ilmiöiden muuttumiseen. Ääri-ilmiöiden vaikutusten tutkiminen olemassa olevilla rakenteilla ja tieverkolla on vaikeaa johtuen suuresta määrästä vaikuttavia tekijöitä. Eräänä keskeisistä tekijöistä mainittakoon rakenteiden toiminnallinen mitoitustaso (vahinkokynnys). Tämän vuoksi on yksinkertaisempaa ja havainnollisempaa tarkastella ääri-ilmiöiden toteutuneita vaikutuksia. Toteutuneet haitat ja vahingot kuvaavat nykyisten tierakenteiden käyttäytymistä ääri-vaikutusten alaisina. Seurausten perusteella on mahdollista tarkastella tien rakenteiden ja laitteiden parantamis- ja vahvistamistarvetta, suojautumis- ja pelastustarvetta, rakenne- ja materiaalitekniikan muuttamistarvetta sekä nykytilassa, nykyisten mitoitusrasitusten vallitessa että ilmastonmuutoksen jälkeen.

Tulvien ym. ilmastokatastrofien jälkeen on laadittu selvityksiä tapahtuneesta. Nämä selvitykset ovat kuitenkin painottuneet joko korjaus- ja parantamisbudjetin perusteluun tai suojelu- ja pelastustoimenpiteiden arviointiin. Tarkastelu ei ole normaalisti ollut sellainen, että sen perusteella voitaisiin arvioida tierakenteen, rakenneratkaisun, mitoituksen tai materiaalienkäytön muuttamista.

Seuraavat vahinkotarkastelut koskevat vv. 2004–2006 ilmenneitä tulvia, jotka aiheutuivat poikkeuksellisista rankkasateista Pohjois-Savossa sekä Vöyriissä ja Oravaisissa heinä-elokuussa 2004, poikkeuksellisesta merenpinnan noususta etelärannikolla tammikuussa 2005 ja nopeasta lumen sulamisesta yhdessä rankkasateen kanssa Kittilässä ja Ivalossa toukokuussa 2006. Näiden perusteella voitiin arvioida niitä vahinkoja ja haittoja, jotka seurasivat ääritulvista.

Vastaavia, toisenlaisia ääri-ilmiöitä ovat olleet esimerkiksi liukkaus pääkaupunkiseudulla maaliskuussa 2005 ja Konginkankaalla maaliskuussa 2004 sekä talviset lumimyrskyt esimerkiksi lokakuussa 2006. Näiden perusteella voidaan kuvata ja arvioida tien ylläpidon ongelmia vaikeissa, ääreisissä ilmasto-oloissa ja mahdollista tienpidon kehittämistarvetta ääri-ilmiöiden yleistyessä.

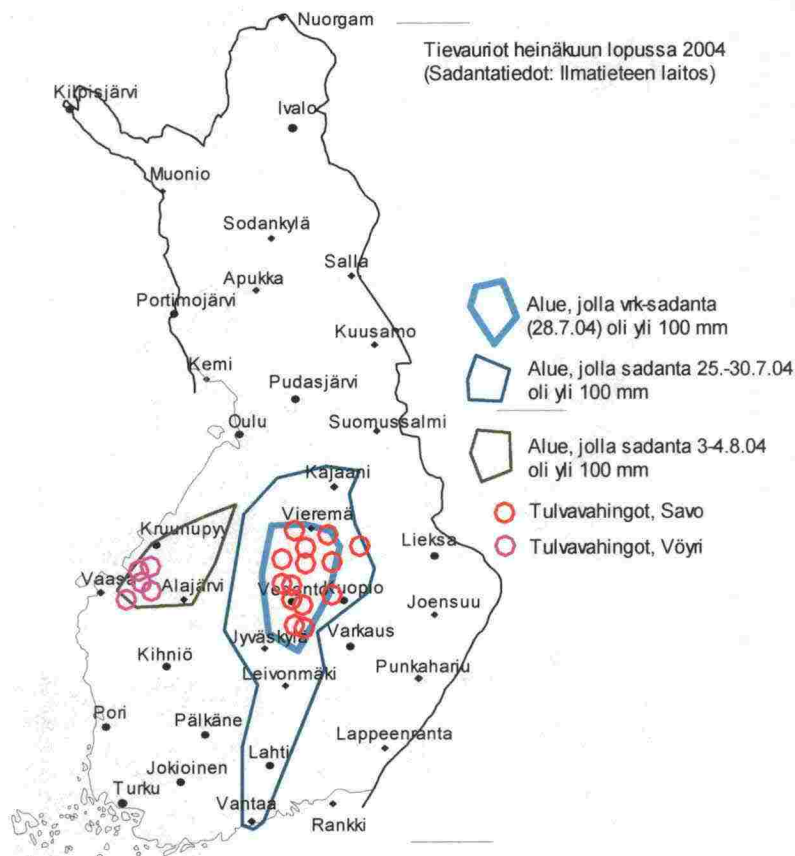
### 2.2 Tulvat Pohjois-Savossa ja Keski-Suomessa heinäkuussa 2005

Heinäkuun lopun 2004 runsaat sateet liittyivät Suomeen etelästä saapuneeseen matalapaineeseen, joka pysyi lähes paikallaan maan eteläosan yllä. Sadekertymät olivat suuria, koska matalapaineen sateet kiersivät Suomen yllä matalapaineen keskuksen ympärillä.

Sateet olivat Ilmatieteen laitoksen mukaan 27. ja 28. heinäkuuta erityisen runsaita Uudellamaalla, Hämeessä, Keski-Suomessa, Savon maakunnissa sekä Oulun läänissä, jossa kahden vuorokauden yhteenlasketut sademäärät olivat paikoin yli 100 millimetriä. Tällaiset sadekertymät ovat jopa kaksinkertaisia heinäkuun keskimääräisiin kuukausisademääriin verrattuina (kuva 11).



Heinäkuun lopussa 2004 yhden vuorokauden aikana mitattu suurin sademäärä oli 122 mm ja se saavutettiin 28.7.2004 Vesannolla Pohjois-Savossa. Rankkasateet, jotka sattuiivat linjan Helsinki - Kajaani ympärillä, jatkuivat peräkkäin kolmekin vuorokautta. Vuoden 2004 rankkasateet olivat alueellisesti laajimpia, joita on koettu 1900-luvun alun jälkeen (Ilmatieteen laitos 2004).



Kuva 11 Tulvavahinkojen ilmoitettu sijainti ja rankkasateiden esiintyminen heinä-elo-kuussa 2004. (Tiehallinnon ja Ilmatieteen laitoksen www-sivut).



Kuva 12 Mt. 5511 Vesanto. Sortuma heinäkuun lopulla 2004 (valokuva: J. Kohonen)



Kuva 13 Mt. 551, Vesanto. Kevyen liikenteen väylä sortumassa (valokuva: J. Kohonen).

## 2.2.1 Tulvavahingot

Savo-Karjalassa vahingot olivat pääasiassa alemmalla tieverkolla (sorateillä) esiintyneitä (vrt kuvat 12 ja 13):

- rumpuvaurioita
- tien luiskan kulumia ja eroosiota
- tiepenkereen syöpymistä
- siltakeilojen vaurioitumista

Kustannukset olivat noin 175 000 euroa. Liikenteen haittojen kesto oli yleensä alle vuorokauden (Pöyhönen 2006).

Kesä/heinäkuun vaihteessa 2006 havaittiin reikä päällysteessä Vesannolla, Seututiellä 659 Istonmäki-Muikunlahti, Lollankosken sillan louhepenkereen kohdalla (kuva 14). Kantavan kerroksen alapuolella oli ontelo, jonka arvioitiin syntyneen penkereen vettymisen ja hienoaineksen varisemisen vaikutuksesta. Vastaavaa reikiintymistä havaittiin myös Kittilässä tulvan aikana keväällä 2005 ja Vöyri-Oravainen alueella (tiemestari Djupsjöbacka, suull. ilm. 2006).



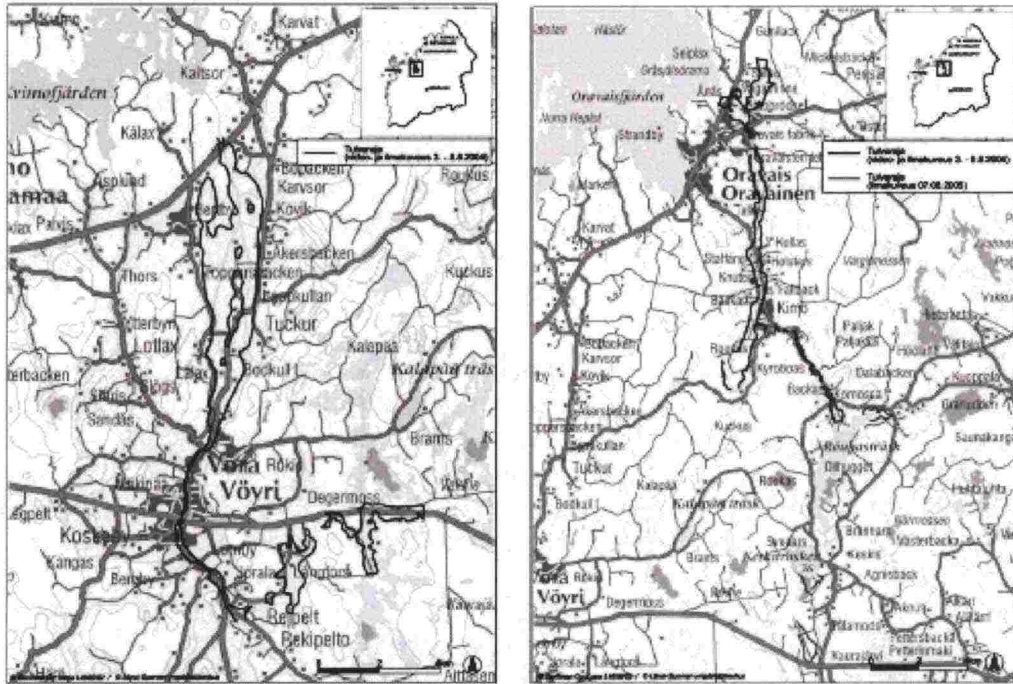
Kuva 14 Lollankosken siltapenger heinäkuussa 2006 (kuva A. Raatikainen).

## 2.3 Ennätyksellisen kaatosateen aiheuttama tulva Pohjanmaalla 4.8.2004

3.8.2004 illalla ja seuraavana yönä voimakas ukkossade aiheutti noin 150 millimetrin kaatosateen lähinnä Oravaisten kunnassa. Alle vuorokaudessa 150 millimetriä tai sitä suurempia sademääriä saadaan paikallisesti keskimäärin kerran sadassa vuodessa.

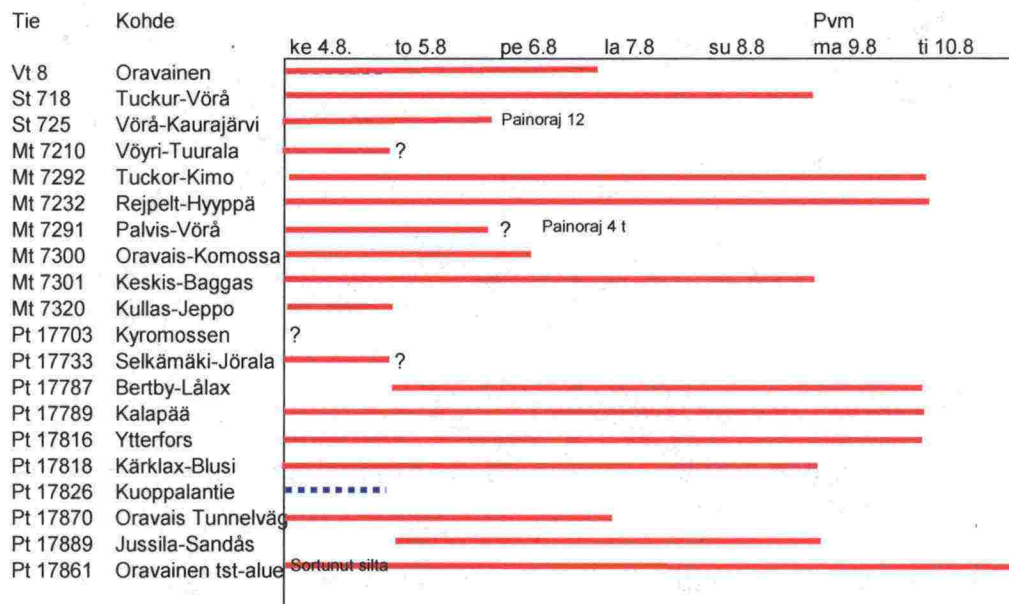
Tulva keskittyi Vöyri- ja Kimojoen valuma-alueille (kuva 15) ja vauriot keskittyivät alueelle, jossa vuorokausisadanta oli yli 100 mm (kuva 11). Vaikka

rankkasade ulottui myös Lapuanjoen valuma-alueelle, ei täällä ilmoitettu merkittävistä vaurioista tai liikennehaitoista.



Kuva 15 Vöyrinjoen ja Kimojoen tulva-alueet (Raivio et al. 2006, Länsi-Suomen ympäristökeskus 2004).

Tulvan aiheuttamien tien sulkemisten kestoa on esitetty kuvassa 16 ja tulvan aiheuttamia vauriokustannuksia taulukossa 3.



Kuva 16 Vöyri, Oravainen. Tulvien aiheuttamat häiriöt liikenneyhteisissä elokuussa 2004 (Djupsjöbacka 2006).

Taulukko 3. Tulvavahinkojen kustannuksia, Vaasa 7.9.2004 (Rkm. Urmas Alho)

YHTEENVETO TOTEUTUNEISTA KUSTANNUKSISTA,		
TILANNE 15.11.2004		
Laskutetut kustannukset tuotteittain 15.11.2004 olivat seuraavat:		
Liikenneympäristön hoito	120	24 700 €
Rakenteiden ja laitteiden hoito	130	
Sorateiden hoito	140	294 100 €
Rakenteiden ja laitteiden ylläpito	220	89 600 €
15.11.2004 laskutetut kustannukset yhteensä:		408 400 €

Esimerkkitapausten kuvaamia pääasiallisia vaurioita olivat:

- rumpujen vaurioituminen ja sortumat,
- siltojen ja rumpujen keilojen vauriot
- tulvaveden padotuksen aiheuttamat vauriot
- tien luiskansortumat
- tiepenkereen ja päällysrakenteen kulumisvauriot (erityisesti sorateillä)
- veden nousu tielle ja alikulkukäytäviin.

Tulvan vuoksi tie oli poikki Vöyrin-Oravaisten teillä pisimmillään noin viikon ajan.

#### 2.4 Merenpinnan nousu Suomenlahden rannikolla tammi-kuussa 2005

Syvän matalapaineen ja voimakkaan, pitkäaikaisen länsituulen (jopa 28 m/s) vaikutuksesta etelärannikon merenpinta nousi. Turussa nousu oli noin 1,3 metriä normaalin yläpuolelle, Helsingissä noin 1,5 metriä, Loviisassa noin 1,7 metriä ja Haminassa noin 1,95 metriä. Merenpinta oli korkeimmillaan koko havaintoaikana 1870-luvulta lähtien (Merentutkimuslaitos 2005).

Tulva aiheutti lukuisia liikennekatkoksia alavilla teillä ja korjaustarvetta eroosion, luiskan sortumien ja tien laitteiden vaurioiden vuoksi. Välittömät korjaukset voitiin tehdä budjetoiduissa rajoissa, eikä vahinkoja siksi tarkemmin selvitetty. Yleisiä teitä ei tämän tulvan aikana suljettu. Vaikutukset kaupunkialueilla olivat dramaattisempia veden noustessa kaduille, kellareihin ja maanalaisiin tiloihin.

Tulva aiheutti Uudellamaalla ja Varsinais-Suomessa noin 40 tiekohteessa pääasiassa liikenteen häiriöitä ja keskeytyksiä, joiden kesto oli 1–2 päivää. Haitta johtui veden noususta tielle. Vesi tiellä rajoitti liikennettä, ja esti sen, kun vesisyvyys kasvoi yli 0,1–0,15 metrin. Kaakkois-Suomen tiepiiristä saatujen tietojen mukaan seitsemässä kohteessa oli vettä tiellä, ja että yhdessä kohteessa tie oli poikki. Lisäksi ilmoitettiin yhdestä sillasta, jonka maakeilaa arvioitiin jouduttavan korjaamaan.

Eräissä kohteissa todettiin aiheutuneen tarvetta päällysteen korjaukseen (PAB).

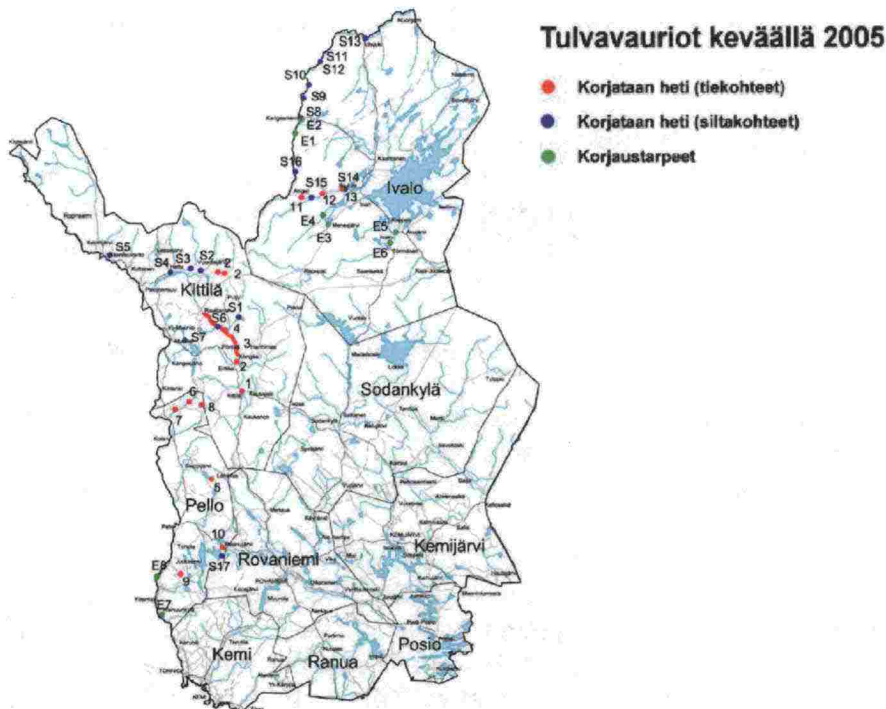
## 2.5 Lumen sulamisen ja rankkasateen aiheuttamat tulvat Lapissa touko- ja kesäkuun vaihteessa 2005

Nopea lumen sulaminen ja voimakas sade aiheuttivat eräiden jokien virtaaman voimakkaan kasvun Pohjois-Lapissa. Ounasjoella ja Ivalojoella vedenpinta nousi 2 metriä (Kittilässä jopa 6 metriä) normaalin tason yläpuolelle normaalista aiheuttaen tulvan tieverkolla ja jokivarsien kylissä.

Havaittuja välittömiä vaurioita olivat (Kaitala 2005):

- 17 siltaa vaurioitui (siltakeilat)
- Matalia tienkohtia korotettiin rakentamalla penkereitä
- Rumpuja rakennettiin uusiksi
- Liikennettä ohjattiin kiertoteille (tulva katkaisi yhteensä 15 tietä)
- Tulvan huuhtomille sorateille ajettiin lisää murskettä
- Tiekaiteita poistettiin ja rakennettiin uusia tilalle
- Kiviä ja soraa ajettiin tiepenkereiden ja siltojen pelastamiseksi
- Päivystys ja teiden ja siltojen tarkkailu yötä päivää laajalla alueella vaati paljon resursseja.

Tulvavahinkojen sijaintia on esitetty kartalla (kuva 17). Tulva aiheutti liikennehaittoja noin viikon ajan (kuva 18).



Kuva 17 Lapin tiepiiri. Tulvavauriokohteet keväällä 2005 (Lapin tiepiiri 2005).

Tie	Kohde	Pvm													
		26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	1,6	2,6	3,6	4,6	5,6			
Vt 4	Kerttuoja	*****													
Kt 79	Muo-Kit		*****												
Kt 80	Kit-Sod		*****												
Kt 83	Pel-Rov			*****											
Mt 940	Kol-Äkä				*****										
Mt 956	Kit-Tep	*****													
Mt 9553	Angeli			*****											
Mt 9562	Tep-Raa		*****												
Mt 9682	Kop-Iva			*****											
Mt 9691	Ivalo Ik			*****											
Mt 9784	Ang-Kar	*****													
Pt 19618	Kainuunk		*****												
Pt 19634	Kuivakangas				*****										
Pt 19722	Äkäsjoki		*****												
Pt 19874	Pakatti		*****												
Pt 19875	Alakittilä		*****												
Pt 19996	Aihujärvi		*****												

Kuva 18 Lapin tiepiiri. Touko/kesäkuun 2005 tulvien aiheuttamat tien sulkemiset ja haitat Kittilän ja Ivalon alueilla (Lapin tiepiiri 2005, Schultz 2006).

Maanteillä teiden välittömät korjauskustannukset olivat noin 604 000 euroa. Tulvan alle jääneiden tieosien korottamiseen arvioitiin tarvittavan lisäksi 233 000 euroa.

Näissä kustannuksissa eivät ole mukana liikenteelle aiheutetun häiriön vaikutukset, eikä tiessä myöhemmin mahdollisesti ilmenevät, hitaasti kehittyvät vauriot, kuten huuhtoutumisen aiheuttamat ontelot, pehmenemisestä seuraava epätasaisuuden kasvu yms. Riskitaso riippuu siitä, miten nykyiset rakenteet on mitoitettu ja suunniteltu tietyn ilmastovaikutuksen suhteen (sadata, tuulen nopeus, lämpötila jne.). Jos ilmastovaikutus on voimakkaampi, syntyy vaurioita, joiden suuruus kasvaa vaikutuksen kasvaessa. Mitoituskriteeriä ei ole asetettu kustannusten vaan muiden perusteiden mukaan (esimerkiksi turvallisuus).

## 2.6 Tulvien aiheuttamat vauriot ja ongelmat

Tulvaselvityksissä ilmeni erilaisia vedenpinnan noususta ja virtaamisesta aiheutuneita vaurioita ja ongelmia. Pääosin ongelmat olivat välittömästi haitallisia, kuten veden nousu tielle, sortumat, pintaerosiovauriot, tien laitteiden tai rakenteiden vauriot ym.

Jälkivaurioita arvioitiin syntyneen vähitellen sisäisen eroosion seurauksena. Muita hitaasti kehittyviä jälkivaurioita voisivat olla esimerkiksi tierakenteen pehmenemisestä aiheutuvat pysyvät vauriot ja virumadeformaatiot tms.

Akuutteja ongelmia olivat:

- luiskaerosio
- luiskan sortumat
- rumpupadotus
- rummun sortuma
- siltakeilojen vauriot
- päällystevauriot
- siltapenkereen eroosio
- vesi tiellä.

Hitaasti kehittyviä ongelmia olivat

- sisäisen eroosion aiheuttama onkaloituminen
- reikiintyminen
- jälkipainumat.

Vauriokuvausten perusteella ei ole voitu päätellä, oliko vaurioitunut rakenne hyvän tienrakennustavan mukainen ts. vastasiko se nykyisten ohjeiden mukaista teknistä tasoa.

Rakenne on optimoitu, jos parantamis- tai suojaustoimenpiteen kustannus on suurempi kuin vahingon ja häiriön poistumisesta ja käyttöiän pitenemisestä aiheutuva kustannussäästö vuositasolla.

### 2.6.1 Vahinkokustannukset

Ilmastonmuutoksen taloudelliset vaikutukset voidaan jakaa seuraaviin osiin:

- ennakointi ja varautuminen
- välittömät korjaukset ja suojaukset
- liikenteelle aiheutuneet häiriöt
- arvonalennus (käyttöiän lyheneminen, piilevä korjaustarve, lisääntynyt ylläpitotarve).

Normaalissa kielenkäytössä vauriokustannuksina pidetään vain välittömiä kustannuksia. Liikenteessä keskeytyksen aiheuttama haitta jakautuu laajalle, eikä haitan kohdetta voida tunnistaa. Käyttöiän osalta tien elinkaariominaisuudet eivät ole niin hyvin tiedossa, että piileviä, hitaasti kehittyviä vaurioita voitaisiin teknistaloudellisesti arvioida.

Perustienpidon vuosibudjettiin sisältyy tietty varautuminen poikkeuksellisiin tilanteisiin. Tämä on osoittautunut riittäväksi "normaalivuosina". Poikkeustilanteissa on korjaustoimintaan tarvittu lisää resursseja.

### 2.6.2 Muut ongelmat

Rankkasade liittyy usein voimakkaaseen matalapaineeseen, jolloin myrskytuulet aiheuttavat puiden kaatumista tielle, sähkölinjoille jne.

Penkereiden ja luiskien sortumariski lisääntyy rankkasateiden lisääntyessä. Nousevat kesälämpötilat saattavat aiheuttaa painumaongelmia pehmeiköillä (Rydell et al. 2001).

Kylmänä vuodenaikana liukkaus aiheuttaa onnettomuusriskin nousun. Erityisen ongelmallinen on tilanne silloin, kun liukkaus ilmenee yllättäen (vrt. Konginkangas 19.03.2004, Pääkaupunkiseutu 17.03.2005). Voimakas lumentulo myrskytuulen kanssa on usein äkillinen ja aina haitallinen. Myös kelirikon alkaminen ja päättyminen ovat säistä riippuvia ongelmia.



### 3 VARAUTUMISTARVE SEKÄ SUUNNITTELU- JA RAKENTAMISTAVAN MUUTOSTARPEET

#### 3.1 Ennakointi ja varautuminen

Ilmastonmuutoksen vaikutuksiin voidaan varautua, jos vaikutusten suuruus ja kohdistuminen osataan ennalta arvioida. Rankkasateiden, myrskytuulien ja ilman lämpötilakehityksen ennakointi liittyy sään ennustamiseen ja sääsimulointeihin lyhyellä aikavälillä ja ilmastoskenaarioihin pitkällä aikavälillä. Tienpitotoiminnan ja rakenteiden sopeuttamisen mahdollisuudet ilmastovai- kutuksille haittojen ja vahinkojen minimoimiseksi riippuvat siitä, milloin pää- töksiä on mahdollista tehdä laadittujen ennusteiden ja skenaarioiden pohjal- ta. Ennuste muuttuu tällöin suunnitteeksi, joka määrittää vaikutuksen.

Suunnittelussa ja varautumisessa tulee huolehtia, että kulkukelpoisuus yllä- pidetään yhteiskunnan ja elinkeinoelämän kannalta tärkeässä tieverkossa.

Varautuminen sisältää eriluonteisia tehtäviä, joiden laatu määräytyy aika- ennakoista:

- **suojelusuunnittelu** (suoja- ja pelastustoiminnan tehtävien, sisällön, kohdistamisen ja organisoinnin määrittely).
- **kunnossapidon sopeuttaminen** (mm. liukkaudentorjunta, lumenpoisto, tulvasuojaus, eroosiontorjunta).
- **suunnittelukriteerien tarkistaminen** (tuuli, sade, tulvakorkeudet) ja ra- kenteellinen parantaminen palvelutason varmistamiseksi.
- **rakenteiden kestävyuden parantaminen** (kuivatuksen parantaminen, eroosiosuojaus, tien tasauksen nostaminen).
- **varoitukset ja tiedotus**. Poikkeavista säävaikutuksista tulisi varoittaa ennalta reaaliaikaisesti, ja tiedotus tulisi tehdä oikealla tavalla ja oikeita kanavia käyttäen.

#### 3.2 Tien kuivatustarpeen paikallinen arviointi ja rakennerat- kaisut

Tien kuivatus tehdään sekä tien rakenteellisen kantavuuden varmistamiseksi että tulvavaaran ja vahinkojen estämiseksi. Peruskuivatus tehdään tien ra- kenteellisen kantavuuden kannalta. Tulvan edellyttämän pintakuivatuksen tarkoituksena on ohjata rankkasateen ja lumen sulamisen aikana kertyvät valumavedet niin, että vedenpinnan nousu ei aiheuta haittaa tai vaaraa tien rakenteille tai liikenteelle.

Tien kuivatussuunnittelua rankkasade- ja tulvatilanteita varten on tarvetta kehittää. Tällöin tulevat kysymykseen alueellisen kuivatussuunnittelun mene- telmät (valumamallit), joiden avulla voidaan selvittää veden kertymistä tien kuivatuslaitteisiin, virtaamia, veden padotustasoja jne. Näin voidaan määrit- tää tarkemmin rumpujen ja silta-aukkojen mitoitusta poikkeustilanteissa, eroosiosuojaustarvetta ja -rakenteita sekä tarpeellisia suojaustoimenpiteitä tulvan aikana. Tulvaa voidaan viivyttää järjestämällä tiealueelle ja sen ulko- puolelle pintavesiallaskapasiteettia.

Normaalisti tierummut olisi mitoitettava niin, että ne pystyvät johtamaan rankkasateen tai lumen sulamisen aiheuttaman maksimivirtaaman. Mitoitus perustuu valuma-alueen pinta-alaan, laatuun ja kaltevuussuhteisiin. Kapasiteetti voi käydä riittämättömäksi, jos valumaa nopeutetaan esimerkiksi ojittamalla. Huippuvirtaamia voidaan pienentää myös virtaaman viivytysjärjestelyillä kuten allastamalla.

Suurilla virtaamilla veden virtaus aiheuttaa pintojen ja rakenteiden kulumista, mikä voi johtaa vaurioihin ja ääritilassa sortumiin. Tämän vuoksi olisi tarpeen selvittää, millä järjestelyillä veden virtausta voidaan rajoittaa niin, että eroosio voidaan estää. Tätä varten tarvitaan tietoja ojien ja virtausuomien virtaamista, kaltevuuksista ja muodoista.

Tien kuivatussuunnittelun tavoitteita, sisältöä ja toteutustapaa on kuvattu suunnitteluohjeissa (Tiehallinto, Kuivatus 1993).

Kehitettäessä kuivatusmenetelmiä lisääntyville rankkasateille olisi hyödyllistä dokumentoida ja analysoida tulvavahinkojen olosuhteita ja syntymistä. Näin voidaan testata suunnittelumalleja ja vauriorajoja sekä tarkastella näillä perustein myös soveltuvia, kestäviä korjausvaihtoehtoja.

### **3.3 Varautuminen rankkasateen aiheuttamiin vesistötulviin**

#### **3.3.1 Tulvariskin arviointi**

Tulva aiheutuu yleensä rankkasateesta tai lumen sulamisesta tai näiden yhteisvaikutuksesta Ympäristöhallinnon seurannassa olevien vesialtaiden ja -uomien vedenkorkeuksista on tietoa ympäristöviranomaisella, joka tekee tarvittaessa arvion tulvan kehittymisestä. Ongelmallisia ovat sen sijaan säännöstelemättömät vesistöalueet. Jos näiden alueelle sattuu voimakas rankkasade, on tulvakorkeuden arviointi ja tulvan ennakointi vesistömallinnuksella vaikeaa. Tällöin voidaan arviointiperusteena käyttää mm. paikallista kokemusta ja, jos on saatavissa, dokumentoitua tietoa korkeimmista vedenpinnoista (Sane et al. 2006, Suurtulvatyöryhmä 2003).

Suomen ympäristökeskuksella (SYKE) ja alueellisilla ympäristökeskuksilla on käytössä koko Suomen kattava Vesistömallijärjestelmä, jolla tehdään vesistöjen vedenkorkeus- ja virtaamaennusteet ja varoitetaan tulvista. Vesistömalleilla arvioidaan myös ilmastonmuutoksen vaikutusta vesivaroihin. Havaintokohteiden vedenkorkeusennusteet samoin kuin virtaamaennusteet ovat tarvittaessa saatavissa, samoin tiedot tulvakorkeuksista ja niiden toistuvuuksista. Säännöstellyissä vesistöissä nämä asiat on päätöksellä määritetty, ja niistä poikkeaminen on luvanvaraista.

Luonnontilaisten vesistöjen purkautumisvirtaamat voidaan määrittää mallintamalla. Vedenkorkeuksia voidaan likimäärin arvioida hydraulisen mallintamisen avulla, joka edellyttää laskenta-alueen numeerista kuvausta. Tulvariskiä voidaan myös arvioida toteutuneiden, dokumentoitujen tulvatietojen perusteella. Sadannan kasvaessa ilmastonmuutoksen myötä myös virtaamat ja vedenkorkeudet muuttuvat. Näiden selvittäminen on tarpeen myös valvotuilla vesistöalueilla.

Liikennehaitta syntyy, kun vedenpinta nousee tien pinnan yläpuolelle 0,1–0,2 metriä. Mahdollisuudet tulvanaran tien tasauksen korottamiseksi olisi selvitettävä tietä parannettaessa sekä uuden tien suunnittelun yhteydessä

Vaikka tulva ei maastossa nousisikaan tielle, niin tiepenger voi padottaa vettä, jos penkereen rummut ovat ahtaat. Merkittävien rumpujen ja silta-aukkojen mitoituksesta antaa ympäristöviranomaisen lausunnon. Jos maankäyttö tai ojitusolot yläpuolisella valuma-alueella ovat merkittävästi muuttuneet, mitoituservot voivat muuttua.

### 3.3.2 Vesistötulvan vaikutusten rajoittaminen

Tulvanarka tie on sellainen, jonka pinta on tulvarajan alapuolella tai sen tuntumassa. Tämä tapahtuu vertaamalla tien tasausta tulvaveden korkeuteen. Tulvariskiä arvioidaan myös tien kuivatuksen ja mm. rumpujen kapasiteetin perusteella. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi tienparannusten suunnittelun yhteydessä.

Kun tulvariskikohde on todettu, arvioidaan tulvariskiä omaavan tieosan pituus maastokartan perusteella.

Tierakenteen vaurioriskiä ja liikenteelle aiheutuvaa haittaa voidaan arvioida dokumentoitujen esimerkkitapausten perusteella tai vesistötulvan simulointitietojen perusteella.

Tulvan liikenneturvallisuuSHAITTOJA voidaan vähentää rajoittamalla tai keskeyttämällä liikenne tulvan alla olevalla tieosalla ja ohjaamalla liikenne muulle reitille.

Tulvan syntymistä voidaan rajoittaa ja estää pengerryksin, korottamalla tien tasausta tilapäisesti tai pysyvästi, parantamalla tiealueen pintakuivatusta, vahvistamalla voimakkaan virtauksen kohteeksi joutuvia rakenteita kuten siltakeiloja, rumpuja sekä muotoilemalla uomaa niin, että pyörteinen virtaus estyy.

### 3.3.3 Pelastus- ja suojelutoimenpiteet vesistötulvatilanteessa

Kokemuksia suojelu- ja pelastustoiminnasta tulvatilanteissa on raportoitu viime aikoina (vrt. mm. Raivio et al. 2006, Suhonen et al. 2006, Lapin tiepiiri 2006 ym.).

Niissä on painotettu mm. toimintasuunnitelmien laatimista tulvatapahtumia varten, viranomaisten yhteistyövalmiuksien parantamista, operaatioissa tarvittavan miehityksen ja kaluston saatavuutta, suojelumateriaalien ja -rakenteiden varaamista ennakolta.

Tärkeä tieto on ennakkotieto tulvariskistä, jonka perusteella suojelutoimenpiteet voidaan käynnistää. Samoin eri toimijoiden välisten yhteyksien olemassaolo on varmistettava sekä tiedottaminen tien käyttäjille poikkeusolosuhteista ja riskeistä ennalta suunniteltava ja hoidettava.

Tulvatilanteen jälkeen on pyrittävä keräämään ja dokumentoimaan kokemukset koskien tulvan syntytapaa, vaikutuksia ja kohdistumista, vaurioita ja liikennehaittoja, vaurioiden korjausta, korjauskustannuksia sekä arviota vahinkojen estämiseksi mahdollisista ja tarpeellisista tieteknisistä toimenpiteistä.

### **3.4 Varautuminen merenpinnan nousuun**

#### **3.4.1 Tulvariskin arviointi ja rajoittaminen**

Tulvakorkeutta on arvioitu yhdyskuntien suunnittelua ja rakentamista varten ympäristöviranomaisten toimesta. Tavoitteena on rajoittaa rakentamista alueille, jotka joutuvat tulvan alle noin kerran 200 vuodessa. Vastaavia suosituksia voidaan laatia erilaisille tierakenteille ja erilaisilla toistuvuuksilla.

Nykyisissä tieverkkotiedoissa samoin kuin tierekisterissäkään ei ole ollut tietoa tien tasauksesta. Korkeustietoa voidaan hankkia vaaitsemalla, GPS-laitteilla, laserkeilauksella tai tiesuunnitelman pituusleikkauksesta. Eräänä mahdollisuutena on määrittää tielinjan korkeus fotogrammetrisesti ilmakuvilta tien xy-koordinaattijonon perusteella, joka on määritetty joko maastossa mitaten tai pääpistelaskennan tietojen perusteella.

Tulvanarka tieosa on sellainen, joka on tulvavedenkorkeuden alapuolella tai sen tuntumassa. Myös aallonkorkeus tulisi ottaa huomioon. Tieverkossa tulvariskin alaiset tieosat voidaan määrittää digitaalisen maastotiedon ja tierekisteritietojen perusteella. Arvio voidaan varmentaa, jos historiallista tietoa tulvan alle joutuneista tieosista on käytettävissä.

Merenrannan tulva saattaa aiheuttaa eroosiovaurioita ja erityistapauksissa kantavuusvaurioita tierakenteen vettyessä. Tieyhteyksien sulkemisesta aiheutuu merkittävämpiä liikenne- ja kuljetushaittoja, jos korvaava tieyhteys on pitkä. Haittoja voidaan arvioida mm. määrittämällä liikennevirroissa ja kuljetussuoritteissa tapahtuvaa muutosta verkkotasolla, jos oletetaan tieosan liikenteen estyvän. Tällä tavoin on mahdollista arvioida kuljetussuoritteen lisääntymistä, kustannusvaikutuksia sekä sitä, kuinka paljon kannattaa investoida haitan poistamiseksi esimerkiksi tietä korottamalla.

Merenrannan tulvaa voidaan rajoittaa ja estää ensi sijassa vain tietä korottamalla. Eroosiosuojauksissa on aiheellista ottaa huomioon aaltovaikutukset tulva-alueen tielinjoilla.

Tulva-arviointia olisi ehkä tarpeen selvittää pilottikohteissa, joissa voitaisiin testata eri arviomenetelmien soveltuvuutta ja kehittää hyvää suunnittelutapaa.

#### **3.4.2 Pelastus- ja suojelutoimenpiteet tulvatilanteessa**

Kokemuksia suojelu- ja pelastustoiminnasta merenrannan tulvatilanteissa on raportoitu viime aikoina niukasti (vrt. Helsingin kaupunki 2006, Espoon kaupunki 2006 ym.). Niissä on painotettu toimintasuunnitelmien laatimista tulvatapahtumia varten, viranomaisten yhteistyövalmiuksien parantamista, ope-

raatioissa tarvittavan miehityksen ja kaluston saatavuutta, suojelumateriaalien ja -rakenteiden varaamista ennakolta.

Tärkeä tieto on ennakkotieto tulvariskistä, jonka perusteella suojeletoimenpiteet voidaan käynnistää. Samoin eri toimijoiden välisten yhteyksien olemassaolo on varmistettava sekä tiedottaminen tien käyttäjille poikkeusolosuhteista ja riskeistä ennalta suunniteltava ja hoidettava. Tulvatilanteen jälkeen on pyrittävä keräämään ja dokumentoimaan kokemukset koskien tulvan syntytapaa, vaikutuksia ja kohdistumista, vaurioita ja liikennehaittoja, vaurioiden korjausta, korjauskustannuksia sekä arviota vahinkojen estämiseksi mahdollisista ja tarpeellisista tieteknisistä toimenpiteistä.

### **3.5 Liukkaudentorjunnan kehittäminen**

#### **3.5.1 Liukkauden tunnistaminen ja ennakointi**

Liukkaudella ymmärretään tienpinnan kitkakertoimen alenemista, joka aiheuttaa onnettomuusriskin nousun. Onnettomuusriski kasvaa, jos liukkaus ilmenee huonon näkyvyyden (sumun, lumisateen) kanssa. Liukkaudentorjunnan tavoitteena on nostaa liukkaan tienpinnan kitkakerrointa. Liukkaudentorjunnan toimenpide on normaalisti jään tai lumen sulattaminen suolauksella. Suolauksen jälkeen jää- tai lumisohjo poistetaan pinnalta auraamalla ja tarvittaessa tiehöylällä.

Suolan käytöstä aiheutuu vaaraa pohjavesien pilaantumiselle sekä korroosioriskiä ajoneuvoille. Tiesuola lienee eräs merkittävä komponentti pienhiukkasissa, jotka muodostuvat ilmanlaadun ongelmaksi loppukeväästä (Jantunen 2005).

Liukkauden osalta ongelmia liittyy toisaalta liukkaudentorjunnan ajoitukseen jäätymiseen nähden ja toisaalta liukkaudentorjuntamenetelmän sekä torjunta-aineen valintaan ja sen levitysmäärän määrittämiseen kitkan palauttamiseksi.

Liukkaustilanteen syntyminen on vaikeasti ennakoitavissa sekä ajallisesti että paikallisesti, sillä liukkaus kehittyy usein sään muuttuessa, ja se on paikallisesti vaihtelevaa. Liukkauden esiintymistä voidaan arvioida tiesääasematietojen perusteella. Erytistilanteessa, mm. syksyllä, paikallista liukkautta voidaan kokemuseräisesti arvioida paikallisen mikroilmaston mukaan. Liukkauden ennakointi perustuu tienpinnan keliennusteeseen, joka laaditaan sää tietojen perusteella. Tällöin on olennaista, kuinka suurella ennakolla voidaan liukkaudentorjuntaan ryhtyä, jotta turvalliset keliolosuhteet saadaan ylläpidettyä. Samoin on olennaista se, miten paljon suolaa tarvitaan kitkan palauttamiseksi.

Liukkaustilanne tunnistetaan kenttätarkastuksessa, jolloin kitkan aleneminen voidaan todeta ajoneuvomittauksin (kitkamittaus). Liukkautta voidaan arvioida myös tiesääasemien liukkaasanturitietojen perusteella ja suolauksen täydennystarvetta tienpinnan suolapitoisuus/sähkön-johtavuustietojen perusteella (Kangas et al. 2001). Suolan levitysmäärää olisi mahdollista määrittää tienpinnan jäänmuodostuskyvyn perusteella.

Liikkaus kehitty reaalitilanteessa nopeasti muuttuvissa sääoloissa. Jos halutaan täsmentää suolan käyttöä ja liukkaudentorjuntamenetelmän valintaa, olisi liukkauden ennakoimismalleja testattava, eri torjuntamenetelmiä vertailtava ja menetelmien tehokkuutta arvioitava hallituissa olosuhteissa säähallissa. Kun jäänmuodostusmalli ja menetelmien reseptointi on selvitetty, on mahdollista viedä menetelmät sovellettavaksi tosioloihin.

Liukkaudentorjunnan kehittämisen tavoitteena on suolan käytön vähentäminen. Liukkaudentorjunnan ympäristökuormituksen vähentäminen edellyttää laatutason parempaa hallintaa ja liukkauden täsmällisempää ennakointia.

### 3.5.2 Liukkaudentorjuntamenetelmät

Liikkautta voidaan torjua suolauksella (kostutettu rakeinen suola tai suolaliuos), hiekoittamalla tai suolahiekoituksella. Kokeiluja on tehty myös kuumennetulla hiekalla ja kostealla hiekalla. Suolan ja erityisesti suolaliuoksen levitysmäärää voidaan säätää. Kloridien ohella suolausta voidaan tehdä käyttäen esimerkiksi kaliumformiaattia. Kaliumformiaatti on orgaanista ja ilmassa hajoavaa toisin kuin kloridit. Kaliumformiaatin ympäristövaikutuksia selvitetään.

Liukkaudentorjunnassa suolaus on tehokkaampaa, jos se voidaan tehdä ennen jäätymistä. Tällöin tarvittava suolamäärä on pienempi kuin jäänpoistoon tähtäävässä jälkisuolauksessa. Ennakkosuolaus voidaan tehdä suolaliuoksella, kun taas jälkisuolauksessa on käytettävä kostutettua rakeista suolaa.

Selvitysten perusteella on ilmeistä, että Etelä-Suomessa liukkaudentorjunnan tarve pysyy ennallaan tai vähenee nykyisestä, Keski-Suomessa pysyy nykyisellään tai lisääntyy, ja Pohjois-Suomessa lisääntyy nykyisestä. Ottaen huomioon suolan, erityisesti kloridien, ympäristövaikutukset sekä suolaveden aiheuttaman korroosioriski ajoneuvokalustolle, olisi liukkaudentorjuntaa edelleen kehitettävä niin, että suolan käyttö minimoidaan, ja että liikkausriskit ovat hallinnassa ajassa ja paikassa.

Liukkaudentorjunnan menetelmien tehokkuutta ja reseptointia samoin kuin liukkauden mallintamista olisi mahdollista testata ja täsmentää esimerkiksi hallikokeilla.

### 3.5.3 Pelastus- ja suojelutoimenpiteet liikkaustilanteessa

Valmiutta poikkeustoiimiin erityistilanteissa tulisi suunnitelmallisesti lisätä. Tämä on mahdollista vain parantamalla liukkauden ennakoinnin ja tunnistamisen luotettavuutta.

Olisi myös tarpeen tehdä selvityksiä vakavista liikkaustilanteista, niiden kehittymisestä säätekijöihin nähden sekä liukkaudentorjunnan toimenpiteistä, mm. liikkausvaroituksen ennakoimista varten. Edelleen olisi tarpeen selvittää niitä pelastus/suojelutoimenpiteitä, joihin on ryhdyttävä vakaviksi arvioiduissa liikkaustilanteissa (ennalta suolaus, muuttuvat nopeusrajoitukset, liikenteenohjaus jne.).

### **3.6 Varautuminen lumimyrskyihin**

#### **3.6.1 Lumiolojen muuttuminen**

Nykyisin lumenpoisto on teiden talvihoidon ongelma koko maassa. Se on pääongelma Pohjois- ja Keski-Suomessa, ja ajoittainen ongelma Etelä-Suomessa (Laine et al. 2000). Nykyisin Pohjois-Suomen lumipeitteen vesi-arvo on pieni, joskin tiheys pieni ja paksuus suuri, sillä sadanta on vähäinen ja talven lämpötilat alhaiset. Keski- ja Etelä-Suomessa lumisateita on enemmän, ja välillä lumi pinnasta sulaa, jolloin vesi-arvo kasvaa. Talvien lämpenemisen myötä myös talvisateet lisääntyvät, mikä tarkoittanee pohjoisessa lumipeitteen ja sen vesi-arvon kasvua.

#### **3.6.2 Lumisateen, kinostumisen ja auraustarpeen ennakointi**

Lumimyrskyjen lukuisuus kasvaa puuttomilla aukeilla Pohjois-Lapissa. Muuallakin avoimessa maastossa, missä tuulen nopeudet voivat olla merkittävän suuria, kinostuminen voimistuu aiheuttaen auraustarpeen lisääntymisen.

Lumisateiden ennustaminen samoin kuin kinostavien tuulien ennakointi kuuluvat tiesään ennustamiseen. Kinostumisherkkien tieosien tunnistaminen edellyttää aikaisempaa tietoa tieosien auraustarpeesta.

Lumenpoistotarvetta voidaan ennakoida. Käytettävissä olevat lumenpoiston menetelmät ja kaluston tarve voivat jossakin määrin riippua siitä, miten aikaisin kinostumisriski on ennakoitavissa ja paikannettavissa. Tarvittaessa on tienkäyttäjää voitava varoittaa. Samoin olisi varauduttava erityistoimenpiteisiin, jos tieyhteys joudutaan kinostumisen vuoksi katkaisemaan.

Lunta sataa tasaisesti joka paikkaan, mutta voimakas tuuli irrottaa lunta ja kerrostaa sitä paikkoihin, missä tuulen nopeus taas pienenee. Kinostumisriski liittyy siihen, miten tie sijaitsee suhteessa aukeisiin ja vallitsevaan tuuleen suuntaan nähden, mikä on tuulen nopeus, ja mikä on lumenpinnan kulumisvastus.

#### **3.6.3 Kinostumisen torjunta**

Kinostumista voidaan aukeassa maastossa vähentää nostamalla tien taseus lumen pinnan yläpuolelle ja parantamalla tien poikkileikkauksen aerodynaamiikkaa (vrt. Saarelainen et al. 1990). Paikallisesti kinostumista on torjuttu myös kinostimia (lumiaitoja) käyttäen. Kinostuminen tielle saattaa voimistua myös tien laitteiden, mm. kaiteiden vaikutuksesta.

Lumenpoistoa on käsitelty pääasiassa auraustekniikkana. Auraustekniikka onkin Suomessa korkealla tasolla. Muita lumenpoistomenetelmiä ovat mm. lumilingot. Lumen poiston ohella on pyrittävä myös kitkan palauttamiseen, mihin voidaan päästä jälkisuolauksella, lanauksella tai polanteen teolla.

Lumimyrskyjen voimistuminen aiheuttaa tarpeen selvittää toisaalta tehokkaampia lumenpoistomenetelmiä ja toisaalta kinostumista vähentäviä raken-

neratkaisuja. Kinostumisen ennakoimista sääennusteissa ja tunnistamista tiesääsemien tuulimittauksista tulisi kehittää.

### 3.7 Varautuminen routaolojen muuttumiseen

#### 3.7.1 Roudan syvyyden ja routanousun muuttuminen

Routaantuminen ja sulaminen muuttuvat ilmaston lämmitessä. Pakkas määrän arvioidaan pienenevän keskimääräisenä talvena vuoteen 2050 mennessä noin 10 000 Kh ja vuoteen 2080 mennessä noin 20 000 Kh.

Roudan syvyys pienenesi etelässä arvosta 1,5 metriä arvoon 0,7 metriä, keski Suomessa arvosta 1,7 metriä arvoon 1,1 metriä ja pohjoisessa arvosta noin 2 metriä arvoon 1,4 metriä. Tämä tarkoittaa, että routaa esiintyy edelleen, ja se on otettava huomioon tierakenteiden suunnittelussa routivalla pohjamaalla.

Todetaan, että routamitoitettua päällysrakennetta voitaisiin ohentaa 50 vuoden kuluessa 0,3–0,5 metriä. Etelä-Suomessa näyttää kantavuusvaatimus asettavan voimakkaamman vaatimuksen kuin routa, ja ohentamismahdollisuus on näin vähäisempi.

Routasuojaus on tulevaisuudessakin välttämätöntä, eikä sen keventämiselle näytä olevan vielä lähivuosina perusteita.

#### 3.7.2 Painorajoituskauden muuttuminen

Etelä-Suomessa roudan sulamiskauden pituus lyhenee nykyisestä, noin 2 viikosta muutamaan päivään, Keski-Suomessa noin 1,5 kuukaudesta 2 viikkoon ja Pohjois-Suomessa noin 2 kuukaudesta kuukauteen.

Kelirikko on ensi sijassa sorateiden ongelma. Tiehallinnon ylläpitämistä sorateista (25 000 km) on noin kolmannes (8 000 km) kelirikkoriskin alaisia, ja painorajoitus asetetaan vuosittain noin puolelle näistä teistä (4 000 km). Kelirikko ja painorajoituksen asettaminen aiheuttaa merkittävän liikennehaitan mm. metsäteollisuuden kuljetuksille aiheuttaen puunkorjuulle, puunkuljetukselle ja metsäteollisuudelle noin 100 milj. euron vuotuiset kustannukset. Merkittävä osa teiden kunnossapitokustannuksista kohdistuu sorateiden ylläpitoon ja kelirikkovaurioiden korjaamiseen.

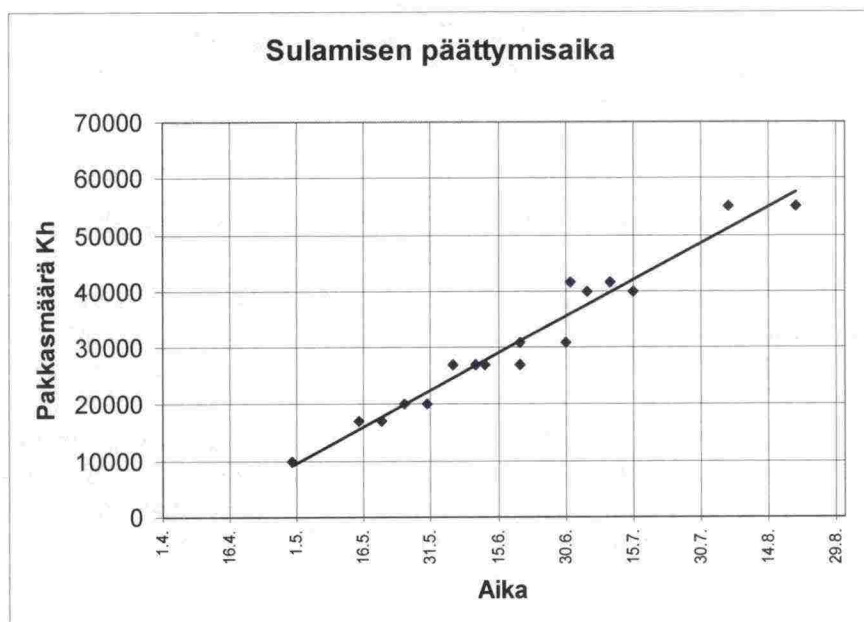
Painorajoitus asetetaan, kun tien pintakerros on sulanut noin 0,3 metrin syvyyteen. Aluksi pinnassa voi ilmetä pintakelirikko, jos pinta on altis liettymiselle. Myöhemmin sulamisen edetessä, pinnan kuivuttua ja kiinteydyttyä, alkaa runkokelirikko, johon liittyy tien kantavuuden aleneminen ja urautuminen, jos tiellä on raskasta liikennettä. Ääritilanteessa tie voi vaurioitua vakavasti, ja liikenne on keskeytettävä. Periaatteessa raskasta liikennettä on rajoitettava koko sulamisen ajan, sillä rakenne on pehmeä niin kauan kuin sulaminen jatkuu, ja jonkin verran sen jälkeenkin. Kelirikko voi kehittyä myös kesken talven, jos tie alkaa sulaa.



Tien routaantuminen on edelleenkin ilmeistä, ja sulaminen aiheuttaa routi-neissa tierakenteissa pehmenemisen ja kelirikkoriskin. Kelirikkovaurioiden välttämiseksi painorajoitetaan liikennettä kelirikkoisilla teillä.

Ilmaston lämpeneminen pienentää roudan syvyyttä, mutta lämpötilakehitys tulee likimain säilymään muuttumatta, joskin kevät alkaa hiukan aiemmin, mutta auringon lämmittävä vaikutus säilyy ennallaan. Näin roudan vähene-minen lyhentää kelirikkoajan pituutta.

Kevään sulaminen seuraa ilman lämpötilan ja auringonsäteilyn yhteis-vaikutuksesta. Saarelaisen (2003) mukaan sulamisen päättyminen riippuu edellisen talven roudansyvyydestä, joka taas on pakkasmäärän funktio (kuva 19). Etelä-Suomessa routa sulaa nykyisin keskimääräisenä talvena ( $F_2$  20 000 Kh) noin 25.5., Keski-Suomessa ( $F_2$  30 000 Kh) noin 15.6. ja Pohjois-Suomessa ( $F_2$  40 000 Kh) noin 10.7.



Kuva 19 Sulamisen päättymisaikojen edellisen talven pakkasmäärän mukaan (Saarelainen et al. 2004).

Jos pakkasmäärän pieneneminen olisi ilmaston lämmetessä  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  noin 10 000 Kh, niin Etelä-Suomen routa sulaisi keskimäärin 1.5., Keski-Suomen 25.5. ja Pohjois-Suomen 15.6., eli noin kolme viikkoa nykyistä aiemmin. Kelirikon alku voi myös hiukan aientua lumen aikaisemman sulamisen vuoksi. Jos ilman keskilämpötila nousee  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , niin sulaminen päättyy noin 6–7 viikkoa aiemmin kuin nyt.

### 3.8 Muut vaikutukset ja riskit

#### 3.8.1 Syyskelirikko

Kelirikkoa esiintyy myös kesällä tai syksyllä pitkäaikaisten sateiden pehmenettyä sorateitä. Pehmeneminen johtuu ilmeisesti siitä, että soratien kulutuskerroksen alusta on heikosti kuivuva, jolloin pinnalle tuleva vesi liettää kulu-

tuskerroksen. Liikennekuormituksen alaisena vaurioituminen voi kehittyä vakavaksi. Kun tie talvella jäätyy ja keväällä sulaa, voi kevään kelirikko muodostua epätavallisen vaikeaksi, jos sulava tierakenne on jään kyllästämä.

Veden kertymistä soratien pintakerrokseen voidaan vähentää tekemällä kuluskerroksen alle karkearakeinen salaojakerros sekä korvaamalla hienoainespitoinen kuluskerros karkeammalla materiaalilla.

### 3.8.2 Kuivien kesien aiheuttama painumariski

Varautuminen olemassa olevien tierakenteiden lisäpainumiin ei ole mahdollista muuten kuin niitä peruskorjattaessa. Uusien teiden rakentamisessa olisi mahdollista varautua pohjaveden alenemisesta aiheutuvaan painumaan. Pohjarakennusohjeiden mukaan on perustusten painumalaskelmissa taa- jaan asutuilla alueilla oletettava pohjaveden alenevan yhden metrin verran. Pohjaveden aleneman suuruus ei ole kuitenkaan vakio, vaan riippuu pohjajasuhteista ja sijainnista valuma-alueella. Pohjaveden alenemisestä aiheutuva lisäpainuma voi olla painuvilla pohjamailla jopa yli 100 mm. Mahdollinen pohjaveden aleneminen ja sen vaikutukset rakenteisiin tulisi selvittää suunnittelutehtävässä.

### 3.8.3 Päällysteiden pakkasvaurioiden syntyminen ja estäminen

Viime talvina on havaittu, että päällysteiden reikiintyminen ym. rapautumisvauriot ovat lisääntyneet. Viime talvien olosuhteet ovat olleet leudommat kuin ennen, vettä tiellä, välillä pakkasjakso ja tien jäätyminen.

Vaurioitumisen syynä lienee päällysteiden suolautuminen ja suolapitoisen päällysteiden vaurioituminen routimisen(?) seurauksena. Routiminen ja jäänmuodostus syntyvät, kun suolavesipitoinen materiaali jäätyy. Tällainen prosessi on havaittu ja raportoitu mm. Quebecissa Kanadassa (Doré et al. 1997).

Päällysteiden pakkasrapautumisen syntytapaa ja vaikuttavia tekijöitä on syytä selvittää. Jos rapautumiseen vaikuttaa suolaveden imeytyminen materiaaliin, on suolan käytön vähentämistä harkittava.

## 4 TUTKIMUS- JA KEHITTÄMISTARVE

### 4.1 Menetelmäkehitys

Edellä esitettyjen ongelmanasettelujen lisäksi kuvataan seuraavassa eräitä yleisiä tutkimustarpeita, jotka tukevat ilmastonmuutoksen vaikutuksiin varautumista.

Eräillä keskeisillä tietekniikan ja kunnossapidon alueilla olisi tarpeen kehittää perusosaamista ja sovelluksia palvelutason parantamiseksi muuttuneissa ilmasto-oloissa (vrt. kuva 20)

- alueellinen kuivatussuunnittelu ja kuivatusrakenteet
- tulvan ennakointi ja torjunta
- liukkauden ennakointi, tunnistaminen ja torjunta
- lumisateen ja kinostumisen ennakointi, tunnistaminen ja torjunta
- kelirikon ennakointi, tunnistaminen ja torjunta.

Näillä alueilla olisi mahdollista soveltaa modernia mittaus-, monitorointi-, tiedonsiirto- ja mallintamistekniikoita operatiivisen toiminnan tukena ja rakenteiden kehittämiseksi.

	Rankkasadetulva		Vesistötulva		Merenrannan tulva		Liukkaus		Lumi		Kelirikko	
	muutos	tutkimus	muutos	tutkimus	muutos	tutkimus	muutos	tutkimus	muutos	tutkimus	muutos	tutkimus
Suojelu/pelastus	x	d	x	d, ks, kr	x	d, ks	x	d, ks	x	d, ks		d, ks
Kunnossapidon kehitt			x	d, ks			xx	d, ks, m	xx	d, ks, m	x	d, ks, m
Suunnittelu ja mitoitus	x	d, ks, m	x	d, ks, m	x	d, ks, m			x	d, ks, m	x	d, ks, m
Rakenteiden parant	x	kr	x	kr	x	kr				kr	x	kr
Varoitus ja tiedotus	x	d	x	d, ks	x	d, ks	x	d, ks	x	d, ks	x	d, ks

d dokumentointi  
ks koesuunnittelu  
kr koerakentaminen  
m menetelmäkehitys

*Kuva 20 Arvio eri ilmastorasituksen muutosten muutos- ja kehittämistarpeesta ja -toimenpiteistä.*

### 4.2 Vaurioiden ja vahinkojen dokumentointi

Ilmastonmuutoksen vaikutusten hallintaa varten tarvitaan tietoa ilmaston ääri-ilmiöiden aiheuttamista vahingoista, vahinkokustannuksista ja syntymekanismista, jotta niihin voitaisiin oikein varautua. Vahinkoselvitysten perusteella on mahdollista arvioida myös nykyisen nykyisten mitoitusmenetelmien riittävyyttä. Dokumentoinnin perusteella voidaan arvioida pelastus- ja suojelutoiminnan tuloksellisuutta ja kehittämistarvetta

### 4.3 Koesuunnittelu ja -rakentaminen

Ilmastoperäisten rasitusten muuttuminen vaikuttaa tierakenteiden ja rakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen, rakentamistapaan ja kustannuksiin. Näiden asioiden selvittämiseksi on tarpeen tehdä valituissa kohteissa koe-

suunnittelua ja -rakentamista, joka dokumentoituna ja julkaistuna kuvaa hyvää suunnittelu- ja rakentamistapaa. Samalla voidaan selvittää, millaisia kustannuseroja uudet suunnittelukriteerit aiheuttavat.

#### **4.4 Suljetun tieosan liikenteelle ja kuljetuksille aiheutuvan haitan arviointi**

Tien käyttäjille aiheutuvaa haitan ja kustannusten arviointia liikenteen keskeyttämisestä tarvitaan kustannusoptimointitarkasteluissa. Arviointi voidaan tehdä käyttäen tieverkon liikennevirtamallintamista, jolla arvioidaan liikennesuorituksen lisäystä, matka-aikaa ja lisäkustannuksia.

#### **4.5 Ilmastonmuutokseen sopeutumisen taloudellinen arviointi**

Olisi selvitettävä toimenpiteet ja niiden kustannukset, jotka ilmastonmuutokseen sopeutuminen edellyttää. Tätä on mahdollista tehdä ilmastonmuutokseen sopeutumista koskevien tutkimus- ja koerakennushankkeiden yhteydessä, mutta tiedon saanti edellyttää myös ongelmakohtaista ja alueellista paneutumista eri alueiden lähtötilanteen, vaikutusten ja ratkaisujen erojen vuoksi.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmastoskenaarioiden perusteella voitiin arvioida Suomen ilmastossa tapahtuvan tulevien sadan vuoden kuluessa seuraavia muutoksia:

- Ilman vuotuiset keskilämpötilat nousevat 3–5 °C.
- Kesien maksimilämpötilat nousevat noin 5 °C ja talvien minimilämpötilat noin 10 °C.
- Vuotuinen sademäärä kasvaa n. 15 %.
- Kuuden tunnin sekä viiden vuorokauden aikana kertyvät sademaksimit kasvavat keskimäärin 25 % ja joillakin alueilla yli 50 %. Tämän seurauksena erityisesti rankkasadetulvan riski kasvaa.
- Myös vesistöjen ja tekojärvien tulvimisriski kasvaa.
- Kevättulvat eivät merkittävästi voimistu.
- Kesät ovat kuitenkin kuivempia ja lämpimämpiä, jolloin pohjaveden pinta alenee.
- Merkittävää myrskyjen voimistumista ei tapahdu. Vähäisempi roudan syvyys voi kuitenkin johtaa runsaampaan puiden kaatumiseen talvimyrskyissä.
- Maksimilumikuormat vähenevät Etelä-Suomessa noin puoleen, mutta pysyvät Pohjois-Suomessa lähes ennallaan.
- Lumipeitteen keskimääräinen paksuus ja talven pituus vähenevät erityisesti Etelä-Suomessa.
- Lumisuuden vähenemisestä huolimatta liikennettä häiritsevien lyhytaikaisten lumisateiden voimakkuus kasvaa.
- Jääteiden ylläpitoedellytykset heikkenevät.
- Vuotuinen tienpinnan jäätymis-sulamissykli kokonaismäärä vähenee merkittävästi Etelä-Suomessa, sillä talvikausi lyhenee. Liukkaudentorjunnan tarve kasvaa Pohjois-Suomessa, kun talvet leudontuvat.
- Routasuojaus on edelleen tarpeen, vaikka roudan arvioidaan vähenevän. Kelirikkoa esiintyy kuten aiemminkin, mutta sen arvioidaan alkavan aiemmin ja kestävän lyhyemmän ajan. Syyskelirikko voi yleistyä.

Erityisesti tienpitoon vaikuttavan ilmastonmuutoksen selvittämistä on tarpeen jatkaa ja täydentää.

Vahinkotutkimusten todettiin antavan kuvaa vahinkojen kohdistumisesta ja tierakenteiden haavoittuvuudesta ääritilanteissa. Vahinkoinventointien perusteella voidaan arvioida tieverkon haavoittuvuuden lisäksi tarvittavia pelastustoimenpiteitä, varautumista, rakenteiden parantamistarvetta. Inventoinneilla voidaan myös selvittää vahinkojen aiheuttamia kustannuksia.

Varautuminen sisältää eriluonteisia tehtäviä, joiden laatu määräytyy aikaenakoista:

- suojelusuunnittelu (pelastustoimi). Suojelu- ja pelastustoiminnan tehtävien, sisällön, kohdistamisen ja organisoinnin määrittely
- kunnossapidon sopeuttaminen (mm. liukkaudentorjunta, lumenpoisto, tulvasuojaus, eroosiontorjunta).
- suunnittelukriteerien tarkistaminen (tuuli, sade, tulvakorkeudet) ja rakenteellinen parantaminen palvelutason varmistamiseksi.
- rakenteiden kestävyysparantaminen (kuivatuksen parantaminen, eroosiosuojaus, tien tasauksen nostaminen).

- varoitukset ja tiedotus. Poikkeavista säävaikutuksista tulisi varoittaa ennalta reaaliaikaisesti, ja tiedotus tulisi tehdä oikealla tavalla ja oikeita kanavia käyttäen.

Suomen oloissa arvioitiin, että merkittävimmät vaikutukset tienpidossa liittyvät talvikunnossapitoon: liukkaudentorjuntaan ja kinostumisen torjuntaan. Lisäpanostaminen näiden alueiden kehittämiseksi niin ennakoinnin, operatiivisen toiminnan kuin rakenteellisen parantamisen suhteen olisi tärkeää. Myös kelirikon hallintaa tulisi parantaa. Suunnitelmallinen varautuminen tulviin ja niiden torjuntaan katsottiin myös tärkeäksi.

## 6 VIITTEET

Ala-Outinen, T., Harmaajärvi, I., Kivikoski, H., Kouhia, I., Makkonen, L., Saarelainen, S., Tuhola, M., Törnqvist, J. 2004. Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennettuun ympäristöön. VTT Tiedotteita - Research Notes: 2227, Espoo, 83 pp. + liitt.

Carter, T.R., Jylhä, K., Perrels, A., Fronzek, S. and Kankaanpää, S. 2005. FINADAPT scenarios for the 21st century: alternative futures for considering adaptation to climate change in Finland. FINADAPT Working Paper 2, Finnish Environment Institute Mimeographs 332, Helsinki, 42 pp.

Djupsjöbacka F. 2006. Muistio Vöyrin ja Oravaisten tulvavahingoista elokuussa 2004 (ei julk.).

Doré, G., Konrad, J.M. & Roy, M. 1997. Role of deicing salt in pavement deterioration by frost action. Washington D.C. Transportation research record, No.1596, ss.70–75.

Espoon kaupunki 2005. Tulvaongelma Espoossa. Espoon tulvatyöryhmä 6.10.2005, Muistio. 25 s.

Heikkinen S. (toim) 2006. Itämeri tulvii yli äyräiden. Geologian tutkimuskeskus, Geofoorumi 1:2006, ss. 16-17.

Helsingin kaupunki 2005. Tulvantorjuntatyöryhmän loppuraportti. Muistio. 22 s.

Ilmatieteen laitos 2004. Heinäkuun sateet rikkoivat vanhoja ennätyksiä. Ilmatieteen laitos, Tiedote 2.8.2004.

Jansson A. 2005. Muistio tulvavahingoista Kaakkois-Suomen, Uusimaan ja Turun tiepiireissä tammikuussa 2005 (ei julk.).

Jantunen Matti J. 2005. Altistuminen pienhiukkasille pääkaupunki-seudulla. Kansanterveyslehti 2005:5.  
[http://www.ktl.fi/portal/suomi/julkaisut/kansanterveyslehti/lehdet\\_2005/5\\_2005/altistuminen\\_pienhiukkasille\\_paakaupunkiseudulla/](http://www.ktl.fi/portal/suomi/julkaisut/kansanterveyslehti/lehdet_2005/5_2005/altistuminen_pienhiukkasille_paakaupunkiseudulla/)

Kaitala E. 2005. Tulvakertomus 25.5.–1.6.2005 (moniste, ei julk.) 3 s.

Kangas M., M. Heikinheimo ja A. Venäläinen: Tiesäämalli -tienpinnan lämpötilan, kelin ja liikenneolosuhteiden ennustamiseen. Kunnosta on kysymys - seminaari teiden ja katujen ylläpidosta. Suomen Tieyhdistys, Tampere, 30–31.5.2001, 6 s.

Kuivatus. Teiden suunnittelu IV. Tien rakenne 4. Helsinki 1993, Tiehallinto, Tietekniikka. 68 s.

Laine V., Ehrola E. & Venäläinen A. 2000. Sää ja talvihoito. Tutkimus uuden sääindeksin tekemiseksi. Helsinki 2000. Tielaitoksen selvityksiä 22/2000. 106 s. + liitt 39 s.

Lapin tiepiiri 2005. Kevään tulvista 837 000 euron kustannukset Lapin tiepiirille. Lapin tiepiiri, Tiedote.

Lapin tiepiiri 2006. Tienpidon varautuminen tulvan aikana Lapin tiepiirissä. Lapin tiepiiri, Toimintaohje 2.5.2006. 6 s.

Länsi-Suomen ympäristökeskus (2004): Tiedote 31.8.2004.  
[www.environment.fi/print.asp?contentid=94207&clan=fi](http://www.environment.fi/print.asp?contentid=94207&clan=fi), 3.8.2005

Makkonen, L., Ruokolainen, L., Räisänen J & Tikanmäki, M., 2006: Regional climate model estimates for changes in extreme events. Lähetetty julkaisuun *Climate Research*.

Merentutkimuslaitos 2005. Itämeri nyt. Vedenkorkeusmittaukset.  
<http://www.fimr.fi/fi/itamerikanta/itamerinyt/vedenkorkeus.html>

MMM 2005. Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 1/2005. 182p.  
([http://www.mmm.fi/sopeutumisstrategia/Sopeutumisstrategia271004\\_v5.pdf](http://www.mmm.fi/sopeutumisstrategia/Sopeutumisstrategia271004_v5.pdf))

Pöyhönen A. 2006. Muistio Savo-Karjalan tulvavahingoista heinäkuussa 2004. (ei julk).

Raivio T., Gilbert Y. & Lonka H., 2006. Viranomaisten varautuminen rankkasadetulvatilanteisiin: pelastustoiminnan johtoryhmätyöskentelyn ja viranomaisten yhteistoiminnan kehittämistarpeet. Helsinki, Gaia Consulting Oy, 85 s. [http://www.pelastustoimi.fi/media/raportit/tulva06/fi\\_tulva06.pdf](http://www.pelastustoimi.fi/media/raportit/tulva06/fi_tulva06.pdf)

Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta H., 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation. FINADAPT Working Paper 15, SYKE moniste 345, 38 s.

Rydell B, Fallsvik J., Lind B. & Ottosson E. 2001. Geotekniska konsekvenser av klimatförändringar. Statusrapport och kunskapsbehov. Linköping, SGI Varia 507. 32 s.

Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, M., Samuelsson, P. and Willén, U. 2004. European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* 22, 13–31.

Saarelainen, Seppo; Kivikoski, Harri. 1990. Kinostumisen torjunta tien tasauksen ja muotoilun avulla. Koerakentaminen valtatiellä 21 Jeähkkasissa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 36 s. Tiedotteita / Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 1096. ISBN 951-38-3666-5.

Saarelainen S. 2001. Tierakenteen routamitoitus. Tiehallinto, TPPT-tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT-R18. 45 s.

Saarelainen, S. 2006a. Adaptation to climate change in the transport sector. FINADAPT Working Paper 8, Finnish Environment Institute Mimeographs 338, Helsinki, 26 pp.



Saarelainen S. 2006b. Ilmastonmuutos ja tienpito. Tieyhdistys, Väylät ja Liikenne, Tampere 4–5.10.2006, Julkaisu, ss. 101–106.

Saarelainen S. & Törnqvist J. 2004. Painorajoituksen ajoituksen ja suuruuden määrittäminen. Esiselvitys. Helsinki 2004. Tiehallinnon Selvityksiä 8/2004. 64 s. + liitt. 18 s.

Sane M., Alho P., Huokuna M., Käyhkö J. & Selin M. 2006. Opas yleispiirteisen tulvavarrakartoituksen laatimiseen. Suomen ympäristökeskus, Ympäristöopas 127. 73 s.

Schultz T. 2006 . Tulvavauriokorjaukset 27.5.2005 alkaen. (ei julk.) 1 s.

Suhonen V. & Rantakokko K. 2006. Vantaanjoen tulvantorjunnan toimintasuunnitelma. Helsinki. Uudenmaan ympäristökeskuksen raportteja 1/2006, 115 s.

Suurtulvatyöryhmän loppuraportti. Työryhmämuistio MMM 2003:6. Helsinki 2003. 125 s.

([http://www.mmm.fi/luonnonvarat\\_vesivarat\\_maanmittaus/vesivarat/tulvien\\_torjunta/Suurtulvatyoryhma\\_raportti.doc](http://www.mmm.fi/luonnonvarat_vesivarat_maanmittaus/vesivarat/tulvien_torjunta/Suurtulvatyoryhma_raportti.doc))

Tuomenvirta H, Venäläinen A., Juottonen A. & Haapala J. 2000. The impact of climate change on the Baltic Sea ice and soil frost beneath snow-free surfaces in Finland. Helsinki. Publications of the Ministry of Transport and Communications, 13/2000. 56p.

Venäläinen A. 2000. Tiesuolan käytön arviointi talvikuukausien lämpötilan avulla. Helsinki 2000. Tielaitoksen selvityksiä 9/2000. 24 s.

ISSN 1457-9871  
ISBN 978-951-803-819-4  
TIEH 3201029