

Marja-Terttu Sikiö
Matti Viravuori

MAANTEIDEN LUISKA- SUOJAUSTEN STABILITEETTI- JA KUIVATUSTARKASTELUT

Suunnitteluohjeen laatimista varten



Marja-Terttu Sikiö, Matti Viravuori

Maanteiden luiskasuojausten stabiliteetti- ja kuivatustarkastelut

Suunnitteluohjeen laatimista varten

Väyläviraston tutkimuksia 3/2019

Väylävirasto

Helsinki 2019

Kannen kuva: Jetro Matilainen (Väylän kuvapankki Flickr:ssä)

Verkojulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-0982

ISBN 978-952-317-660-7

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Marja-Terttu Sikiö ja Matti Viravuori: Maanteiden luiskasuojauksen stabiliteetti- ja kuivatus-tarkastelut – Suunnitteluohjeen laatimista varten. Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 3/2019. 27 sivua ja 1 liite. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-660-7.

Avainsanat: maantiet, luiskat, suojaus, pohjavesi, stabiliteetti, hulevesi, kuivatus

Tiivistelmä

Maanteiden luiskasuojauksia rakennetaan tiesuolauksen aiheuttamien pohjavesi-haittojen vähentämiseksi ja vaarallisten aineiden kuljetusonnettomuuksien varalta. Luiskasuojauksessa leikatun ja tasatun pohjamaan päälle asennetaan tiivistyskerrokseksi limisaumoin bentoniittimatto ja sen päälle muovikalvo. Tiivistyskerroksen päälle asennetaan tarvittavat rakennekerrokset, jotka tehdään karkearakeisista maa-aineksista. Luiskasuojauksen rakenne ja materiaalivaatimukset on esitetty **InfraRYL:n 14230** -luvussa. Luiskasuojauksen suunnittelu on ohjeistettu Liikenneviraston ohjeessa **Pohjaveden suojaus tien kohdalla**.

Maanteiden luiskasuojauksen stabiliteetti- ja kuivatustarkastelut -selvityksessä tehtiin pohjaveden luiskasuojauksen stabiliteettitarkasteluja sekä salaojien vesimäärien tarkasteluja vuonna 2018 päivitetyn **InfraRYL:n 14230** -luvun mukaisilla rakenteilla. Selvitys tehtiin Liikenneviraston ohjeen **Pohjaveden suojaus tien kohdalla** päivittämistä varten.

Maanteiden luiskasuojauksissa on tapahtunut penkereiden sortumia, jotka ovat yleensä liittyneet muovikalvon ja sen ylä- ja alapuolisen maarakenteen yhteistoimintaan. Luiskasuojauksen rakenteen toimivuuteen vaikuttavat pengerkorkeus, luiskakaltevuus, luiskan pituus sekä perusmaan, rakennekerrosmateriaalien ja muiden käytettyjen materiaalien ominaisuudet. Kokemuseräistä tietoa luiskien pysyvyydestä on sileällä muovikalvolla rakennetuista luiskista. Pintakuivuuksien (eli kitkapinnoitettujen) muovikalvojen käytöstä maanteiden luiskasuojauksissa ei ole kokemuksia Suomesta.

Lähtökohtana stabiliteettitarkasteluissa käytettiin InfraRYL:n luvun 14231 mukaista pohjaveden luiskasuojauksen rakennetta ja materiaaleja. Laskennat tehtiin GeoCalc-ohjelmistolla ja tasapainoyhtälöillä. Sileän muovikalvon, kitkapintaisen muovikalvon ja bentoniittimaton mitoitusarvot laskentoja varten saatiin materiaalitoimittajalta. Maakerroksille käytettiin kirjallisuudesta löytyviä materiaaliparametreja. Geosyntetisten materiaalien ankkurointia ei otettu laskennassa huomioon. Maanteiden luiskasuojauksissa tulisi laskennallisesti saavuttaa vähintään varmuusluku $F=1,5$.

Maksimivesimäärätarkastelussa selvitettiin maanteiden pohjaveden luiskasuojauksen vesimääriä. Tavoitteena oli selvittää, toimiiko kuivatus luiskasuojauksissa vakiokoon salaojaputkilla. Maalajien vedenjohtavuuden ja huokoisuuden arvoina käytettiin kirjallisuudesta löytyviä arvoja. Tarkastelut tehtiin soralle, karkealle hiekalle, keskikarkealle hiekalle sekä soraiselle hiekkamoreenille. Mitoitussateen rankkuutena käytettiin ($270 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$). Tarkastelut tehtiin sekä sisältä sileäpintaisille putkille että sisäpinnaltaan aallotetuille putkille. Salaojien tukkeutumista ei otettu laskennassa huomioon. Tarvittavat salaojien putkikoot laskettiin eri mittaisille tieosuuksille. Lisäksi tehtiin tulvatarkasteluja tilanteista, joissa vesi nousisi ojan pohjalla yli 0,5 m korkeudelle ojan pohjan vesijuoksusta.

Vuoteen 2018 asti pohjaveden luiskasuojauksen pintakerros tehtiin usein hienosta hiekasta tai hiekkamoreenista. Siirtyminen tutkitun hiekkamoreenin kaltaisesta pintakerrosmateriaalista tasarakeisempiin maa-aineksiin, jolloin luiskatäytteen vedenläpäisevyys voi kasvaa useita kertaluokkia, voi edellyttää salaojaputken koon kasvattamista nykyisestä.

Marja-Terttu Sikiö och Matti Viravuori: Granskningar av stabilitet och dränering i släntskydd vid landsvägar: För utarbetande av planeringsanvisning. Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 3/2019. 27 sidor och 1 bilaga. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-660-7.

Nyckelord: landsvägar, slänter, skydd, grundvatten, stabilitet, dagvatten, dränering

Sammanfattning

Släntskydd vid landsvägar byggs för att minska de grundvattensskador som vägsaltning orsakar samt med tanke på olyckor vid transport av farliga ämnen. I släntskydd installeras som tätskikt ovanpå den kapade och utjämnade undergrunden en bentonitmatta med överlappande fogar och ovanpå den en plastfilm. Ovanpå tätskiktet installeras nödvändiga konstruktionslager, som görs av grovkorniga jordmaterial. Konstruktions- och materialkraven för släntskydd presenteras i kapitel **14230 i InfraRYL**. Anvisningar för planeringen av släntskydd finns i Trafikverkets anvisning **Pohjaveden suojaus tien kohdalla ("Skydd av grundvatten vid vägar")**.

Granskningarna av stabiliteten hos släntskydd för grundvatten och av vattenmängder i täckdiken, som gjordes i utredningen Granskningar av stabilitet och dränering i släntskydd vid landsvägar, genomfördes med konstruktioner enligt kapitel **14230 i InfraRYL**, som uppdaterats 2018. Utredningen gjordes för att uppdatera Trafikverkets anvisning **Pohjaveden suojaus tien kohdalla**.

Vid släntskydd vid landsvägar har det förekommit att vägbankar har rasat, vilket vanligen haft att göra med en samverkan mellan plastfilmen och markkonstruktionerna ovanför och under plastfilmen. Funktionen hos släntskyddens konstruktion påverkas av vägbankens höjd, släntlutning och släntlängd och av egenskaperna hos marken, hos konstruktionslagrens material och hos övriga material som använts. Det finns erfarenhetsbaserad kunskap om slänternas beständighet för slänter byggda med plastfilm. I Finland finns det däremot inte erfarenhet av användningen av plastfilm med ytmönster (dvs. friktionsyta) i släntskydd vid landsvägar.

Som utgångspunkt vid stabilitetsgranskningarna användes en konstruktion och material för släntskydd för grundvatten enligt kapitel 14231 i InfraRYL. Beräkningarna utfördes med programmet GeoCalc och balansekvationer. För beräkningarna erhöles dimensioneringsvärdena för den släta plastfilmen, för plastfilmen med friktionsyta och för bentonitmattan av materialleverantören. För jordlagren användes materialparametrar ur litteraturen. Förankring av geosyntetiska material beaktades inte vid beräkningen. I släntskydd vid landsvägar bör man kalkylmässigt uppnå minst säkerhetsstalet $F=1,5$.

Vid granskningen av maximala vattenmängder utreddes vattenmängderna i släntskydd för grundvatten vid landsvägar. Målet var att utreda huruvida dränering i släntskydd fungerar med täckdikesrör av standardstorlek. Värdena för jordarternas vattenledningsförmåga och porositet togs ur litteraturen. Granskningarna utfördes för grus, grov sand, mellangrov sand och grusig sandmorän. Som intensitet för dimensionerande regn användes (270 l/(s*ha)). Granskningarna utfördes både för rör med slät inre yta och för rör med korrugerad inre yta. Stockningar i täckdikena beaktades inte i beräkningen. Rördimensionerna som behövdes för täckdikena beräknades för olika långa vägvagnsintervall. Dessutom utfördes översvämningssgranskningar i situationer där vattnet i dikesbotten skulle stiga till över 0,5 m höjd över vattenflödet i dikesbotten.

Fram till 2018 gjordes ytlagret i släntskydden för grundvatten ofta av fin sand eller sandmorän. En övergång från det ytlagermaterial av sandmoräntyp som undersöktes till mer jämnkorniga jordmaterial, varvid släntfyllningens vattenpermeabilitet kan bli flera gånger större, kan kräva täckdikesrör av större dimension än det nuvarande.

Marja-Terttu Sikiö och Matti Viravuori: Stability and drainage calculations of groundwater protection structures of road side-slopes. Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the Finnish Transport Infrastructure Agency 3/2019. 27 pages and 1 appendix. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-660-7.

Key words: groundwater protection structure, stability, stormwater, drainage

Abstract

Groundwater protection structures of road side-slopes are built to prevent groundwater contamination caused by de-icing of roads and transport accidents of hazardous substances. The groundwater protection structure consists of a compaction layer of geosynthetic clay liner and geomembrane (mounted with overlapping not-welded joints) and a surface course that is constructed with coarse-grained soil materials. The structure and the materials of a groundwater protection structure is presented in **InfraRYL 14230**. The instructions for planning of a groundwater protection structure is presented at the FTIA guideline **Pohjaveden suojaus tien kohdalla**.

In this report stability and drainage calculations of a groundwater protection structure equivalent to the requirements of **InfraRYL chapter 14230** (updated 2018) were conducted. The aim of the study was to produce information for the updating of the FTIA guideline **Pohjaveden suojaus tien kohdalla**.

There have been failures of groundwater protection structures of road side-slopes, which have usually been related to the interaction between the geomembrane and the soil layers above and below. The stability of the groundwater protection structures is affected by the height of the embankment, the steepness and the length of the slope and the characteristics of the subsoil, mineral materials and other materials used. There is practical experience of stability of groundwater protection structures of road side-slopes that have been built with smooth geomembranes. Geomembranes with friction coating have not been used before.

The starting point for the stability examinations was the structure and materials presented in **InfraRYL chapter 14231**. Calculations were done using GeoCalc software and equilibrium-equations. The calculation parameters for geomembranes and geosynthetic clay liner were obtained from the importer of the materials. For the soil layers the material parameters from literature were used. The anchoring of geosynthetic materials was not taken into account. At least the safety factor $F = 1.5$ should be achieved for the structures.

The drainage conditions of groundwater protection structures of road side-slopes were investigated to find out whether the drainage works with standard size underground drains. The parameters for hydraulic conductivity and porosity were selected from literature. The calculations were made for gravel, coarse sand, medium sand and gravelly sand moraine. The design storm value that was used is $270 \text{ l} / (\text{s} * \text{ha})$. The calculations were carried out both on smooth-surface underground drains and on corrugated underground drains. The clogging of the drains was not taken into account in the calculation. The required sizes of the drains were calculated for road sections of different dimensions. Also flooding analysis of the groundwater protection structures was carried out. A flood would be a situation where the water level rises 0,5 m above the bottom of the side-ditch since at that level through holes of the compaction layer are allowed.

Until 2018 the surface course of groundwater protection was often made of fine sand or sand moraine. Shifting the quality requirement of surface course from investigated sand moraine to more evenly graded soils, whereby the hydraulic conductivity of the surface course might increase ten or hundred times bigger, may require increasing the size of the underground drains the current praxis.

Esipuhe

Työssä tehtiin stabiliteettitarkasteluja ja salaojien vesimäärien tarkasteluja teiden pohjaveden luiskasuojusrakenteista. Työ tehtiin suunnitteluohjeen laatimista varten.

Työn on tilannut Liikennevirasto (1.1.2019 alkaen Väylävirasto) ja sitä ovat ohjanneet Laura Pennanen ja Kari Lehtonen. Työn on toteuttanut Destia Oy, jossa projektipäällikkönä on toiminut Marja-Terttu Sikiö ja asiantuntijana Matti Viravuori.

Helsingissä tammikuussa 2019

Väylävirasto
Tekniikka- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	LUISKASUOJAUSTEN STABILITEETTITARKASTELUT	8
1.1	Stabiliteettitarkastelujen lähtökohdat	8
1.2	Stabiliteettitarkastelujen laskentatapausten esittely	9
1.3	Laskentatulokset.....	11
1.3.1	Sileä kalvo	11
1.3.2	Kitkapintainen kalvo	13
2	LUISKASUOJAUSTEN MAKSIMIVESIMÄÄRÄTARKASTELUT	15
2.1	Maksimivesimäärätarkastelujen lähtökohdat	15
2.2	Maksimivesimäärätarkastelujen laskentatapausten esittely	16
2.3	Laskennan kulku	17
2.4	Laskentatulokset.....	23
LIITTEET		
Liite 1	Tasapainoyhtälöt (Designing with Geosynthetics, Robert M. Koerner)	

1 Luiskasuojauksen stabiliteettitarkastelut

1.1 Stabiliteettitarkastelujen lähtökohdat

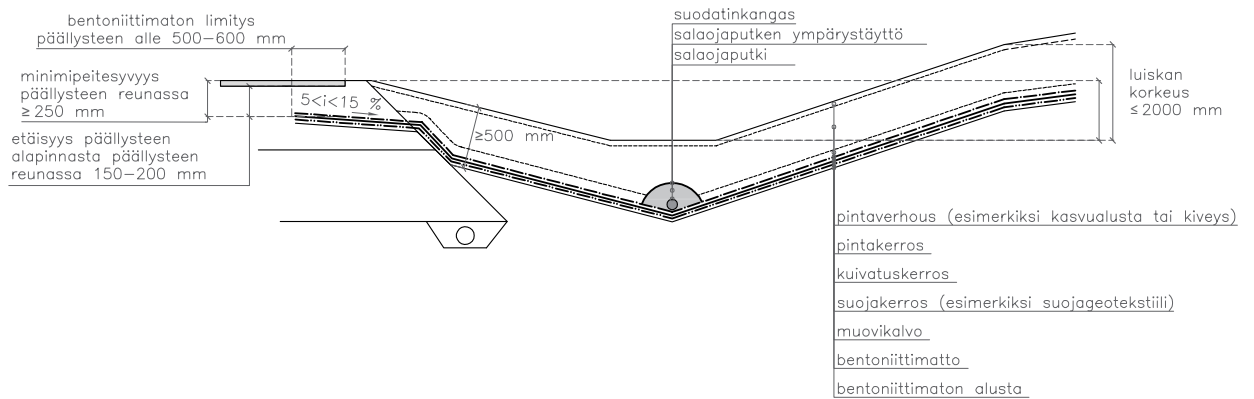
Nykyisellä maanteiden luiskasuojauksen suunnittelun ohjeistuksella ja toimintatavoilla on törmätty toteutetuissa pohjaveden suojauskohteissa penkereiden sortumiin. Sortumat ovat liittyneet yleensä muovikalvon ja sen ylä- ja alapuolisen maarakenteen yhteistoimintaan (kitka ja koheesio muovikalvon pinnoilla). Jotta luiskasuojusrakenne olisi pysyvä, tulee sekä siinä käytettyjen geosynteettisten tuotteiden välinen, että niiden ja maa-aineskerrosten välinen kitka olla riittävä ja suurempi kuin luiskan pinnan suuntaan vaikuttava leikkausvoima. Vetojännityksestä johtuvien murtumien ja repeämisten välttämiseksi tulisi lisäksi geomembraanin alapuolisen kitkan olla suurempi kuin yläpuolisen kitkan (**Kaatopaikan tiivistysrakenteet, SYKE 36/2002**). Erityisen sortumaherkkiä rakenteet ovat yleensä sellaisissa kohdissa, jossa geomembraani on asennettu vedellä kyllästetyn koheesiomaalajin pinnalle ja kuormituksen surauksena koheesiomaalajista vapautuva vesi heikentää geomembraanin ja maan välistä leikkauslujuutta (**Kaatopaikan tiivistysrakenteet, SYKE 36/2002**).

Tässä selvityksessä tehtiin laskennallisia tarkasteluja eri pohjaveden luiskasuojauksen rakennevaihtoehtojen stabiliteetista suunnitteluohjeen laatimista varten. Luiskasortuma maanteiden luiskasuojauksissa tapahtuu yleensä herkimmin geosynteettisten tuotteiden eli bentoniittimaton ja muovikalvon tai muovikalvon ja suojageotekstiilin välissä. Ympyrämuotoiset liukupinnat eivät ole luiskasuojusrakenteissa tavanomaisia. Sortuma voi tapahtua myös geomembraanin päällä olevassa suoja-, kuivatus- ja pintakerrosmateriaalissa. Sekä geosynteettisten tuotteiden välistä, että geosynteettisen tuotteen ja maa-aineksen välistä kitkaa voidaan lisätä käyttämällä pintakuvioituja geomembraaneja (**Kaatopaikan tiivistysrakenteet, SYKE 36/2002**). Myös luiskasuojauksen pintakerroksen materiaalivalinnalla voidaan vaikuttaa luiskan pysyvyyteen.

Luiskasuojauksen rakenteen stabiliteettiin vaikuttavat mm. pengerkorkeus, luiskakaltevuus, luiskan pituus, perusmaan laatu, rakennekerrosmateriaalien laatu sekä muiden käytettyjen materiaalien ominaisuudet. Kokemusperäisesti on todettu, että kitkakulma on työn aikana alle 2 m korkeissa pohjaveden suojausluiskissa riittävä, kun luiskakaltevuus on 1:4 tai luiska on sitä loivempi. Luiskasortumariskien tarkastelussa geosynteettisten tuotteiden määräävimmit ominaisuudet ovat tuotteiden lujuus-muodonmuutosominaisuudet sekä tuotteiden kitka ja koheesio suhteessa ympäröivään maahan/täyttökerrokseen. Lujitteen ja maan välinen kitka riippuu mm. vallitsevasta paineesta, maakerroksen tiivyydestä, maalajin raekoosta ja -muodosta sekä geosynteettisen tuotteen pinnan ominaisuuksista.

Lähtökohtana tehdyissä stabiliteettitarkasteluissa käytettiin **InfraRYL:n luvun 14231** mukaista pohjaveden luiskasuojusrakennetta (luonnos 12/2017) ja materiaaleja. InfraRYL:ssä esitetyt rakenteet soveltuvat tapauksiin, joissa suojattavan luiskan korkeus on enintään 2 m ja luiskakaltevuus sileää muovikalvoa käytettäessä 1:4 tai kitkapinnoitettua muovikalvoa käytettäessä 1:3. Jos edellä mainittu ohjeistus ei täyty, tulee luiskastabilitetti tarkistaa laskelmin ja

laatia kohdekohtaiset suunnitelmat Liikenneviraston ohjeen **Pohjaveden suojaus tien kohdalla** mukaisesti. Tämän selvityksen tarkasteluissa käytetty pohjaveden luiskasuojauksen rakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. InfraRYLin luvun 14231 mukainen maanteiden luiskasuojaurakenne.

1.1 Stabiliateettitarkastelujen laskentatapausten esittely

Laskennallisiin tarkasteluihin valittiin maanteiden pohjavesisuojausissa tyyppillisiä luiskakaltevuuksia. Laskentojen tuloksina saatiin kokonaisvarmuusluku luiskan sortumista vastaan. Tavoitteena maanteiden luiskasuojaurakenteissa tulisi olla rakenteen kokonaisvarmuus $F \geq 1,5$.

Laskennat tehtiin GeoCalc-ohjelmistolla, joka on Suomessa kehitetty työkalu geoteknisiin laskentoihin (painumalaskenta, stabiliateetti, tukiseinälaskenta, paalulaskenta). GeoCalc-ohjelmassa geolujitteiden laskentaan soveltuvia menetelmiä ovat geolujitettujen maarakenteiden käsikirjan mukaan Janbu Simplified, Morgenstern-Price ja GLE. Tässä työssä luiskastabiliateettitarkastelut tehtiin Janbu Simplified 2D menetelmää käyttäen.

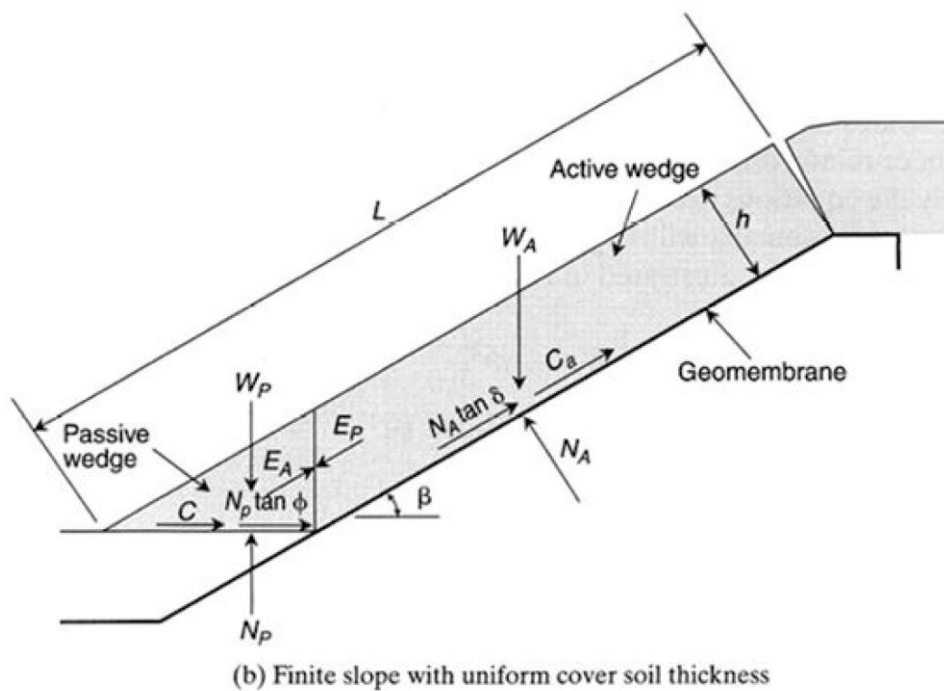
Pohjaveden luiskasuojauksen rakennekerrokset mallinnettiin GeoCalc-ohjelmistoon taulukon 1 mukaisilla parametreillä. Geosynteettisten materiaalien mitoitusarvot saatiin laskentoja varten materiaalitoimittajilta. Geosynteettisen materiaalin ala- ja yläpuolisen kitkakertoimen ja koheesion arvoilla on merkittävä vaikutus laskennan lopputulokseen, mistä syystä suunnitteluhankkeen mahdollisissa stabiliateettilaskennoissa tulisi aina käyttää todellisia kohteeseen valittujen materiaalien mitoitusparametrejä. Maakerroksille käytettiin tavanomaisia kirjallisuudesta löytyviä materiaaliparametreja. Luiskan korkeutena käytettiin 1,0–3,0 m:ä. Luiskan kaltevuuksina käytettiin 1:3, 1:2 ja 1:1,5.

Ensimmäisessä laskennassa liukusortuma pakotettiin tapahtumaan muovikalvon ja bentoniittimaton välisellä pinnalla. Toisessa laskennassa liukusortuma pakotettiin tapahtumaan muovikalvon ja suojakerroksen välisellä pinnalla. Liukusortuman muoto pakotettiin vastaamaan luiskasuojaurakenteissa tyyppilistä liukusortuman muotoa.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit

Kerros	Paksuus (mm)	Kitkakulma Φ (°)	Koheesio c [kPa]
Pintakerros (kitkamaa: Mr, Hk tai Sr)	300	35	0
Kuivatuskerros (kitkamaa: Hk tai Sr)	100	35	0
Suojakerros (kitkamaa: Hk)	100	35	0
Pinta 1, muovikalvon yläpuoli			
- suojakerros (Hk) – sileä muovikalvo		21	0
- suojakerros (Hk) – kitkapinnoitettu muovikalvo		34	0
Pinta 2, muovikalvon alapuoli			
- sileä muovikalvo – bentoniittimatto		10	0
- kitkapinnoitettu muovikalvo – bentoniittimatto		23	8

Samat stabiliteettilaskennat tehtiin myös tasapainoyhtälöitä käyttäen. Laskennassa käytettiin kokonaisvarmuusluvun laskentamenetelmää, joka on kuvattu julkaisussa *Designing with Geosynthetics* (Robert M. Koerner, 2012, luku 5.3.5 Side-Slope Considerations). Laskennassa käytetyt kaavat on esitetty tämän selvityksen liitteessä 1.



Kuva 2. Luiskan vakavuus, laskennassa käytetyn tasapainoyhtälön muuttujat (Robert M. Koerner, 2012, luku 5.3.5 Side-Slope Considerations)

1.3 Laskentatulokset

1.3.1 Sileä kalvo

Laskentatulokset sileällä kalvolla on esitetty taulukoissa 2 ja 3 sekä kuvissa 3 ja 4. Tulosten mukaan varmuusluku $F=1,5$ alittuu sileän kalvon alapinnassa kaikissa yli 1 m luiskissa. Muovin yläpinnalla varmuusluku $F=1,5$ saavutetaan luiskakaltevuudella 1:3 vielä 3 m korkeuteen asti.

Kokemusten mukaan sileä muovi ja sen päällä oleva maa pysyy 1:4 luiskassa aina 2 m sisäluiskakorkeuteen asti. Sen sijaan muovin päällä oleva maa on usein valunut, kun sisäluiskan korkeus on yli 2 m, tai luiskakaltevuus on jyrkempi kuin 1:3. Muovitetuista 1 m korkuisista 1:2 tai 1:1,5 luiskista ei ole kokemuksia, koska matalan sisäluiskan kaltevuus on yleensä 1:4 eikä 1:2 ulko-luiskassa ole käytetty koko leveydellä muovia.

Laskelmien ja kokemusten ero johtuu osittain siitä, että laskelmassa ei otettu huomioon muovin yläreunan ankkurointia tien rakennekerrosten väliin.

Taulukko 2. GeoCalc-ohjelmalla laskettu kokonaisvarmuusluku (F) **sileällä muovikalvolla** eri luiskakaltevuuksissa, liukusortuma on pakotettu tapahtumaan muovikalvon ylä- tai alapinnalla.

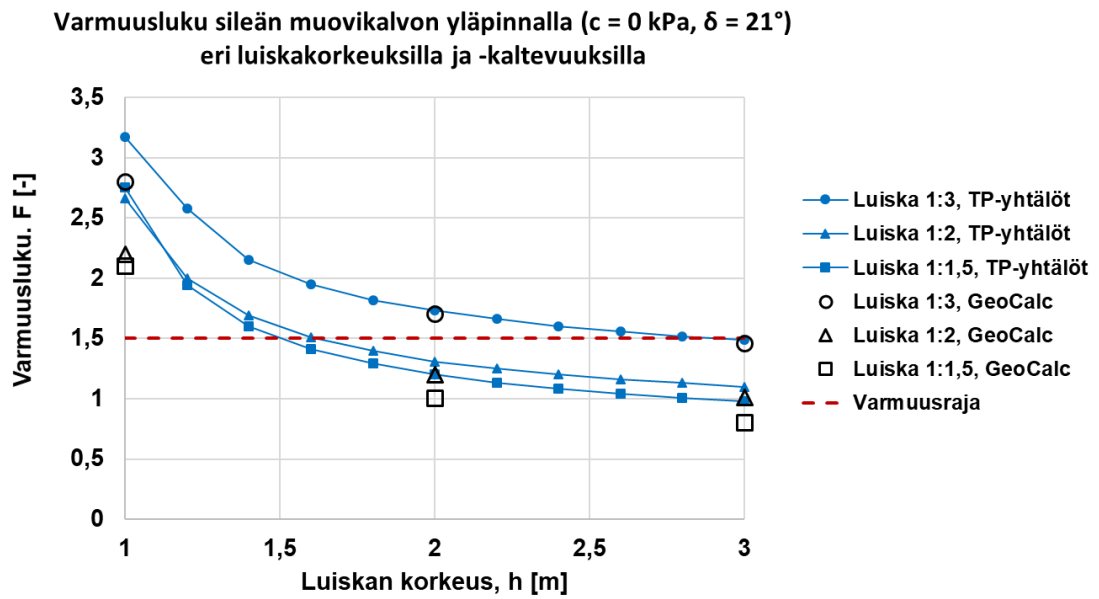
Luiskan korkeus	Luiskan kaltevuus	1:3	1:2	1:1,5
3 m	yläpinta	1,5	1,0	0,8
	alapinta	0,8	0,6	0,5
2 m	yläpinta	1,7	1,2	1,0
	alapinta	1,0	0,7	0,6
1 m	yläpinta	2,8	2,2	2,1
	alapinta	2,3	1,7	

Taulukossa on **punaisella** tapaukset, joissa varmuusluku on tavoitetta ($F=1,5$) alhaisempi. Taulukossa on **alleiviivattuna** tapaukset, joissa kokemusten mukaan suojaverhous on pysynyt sileän muovin päällä valumatta.

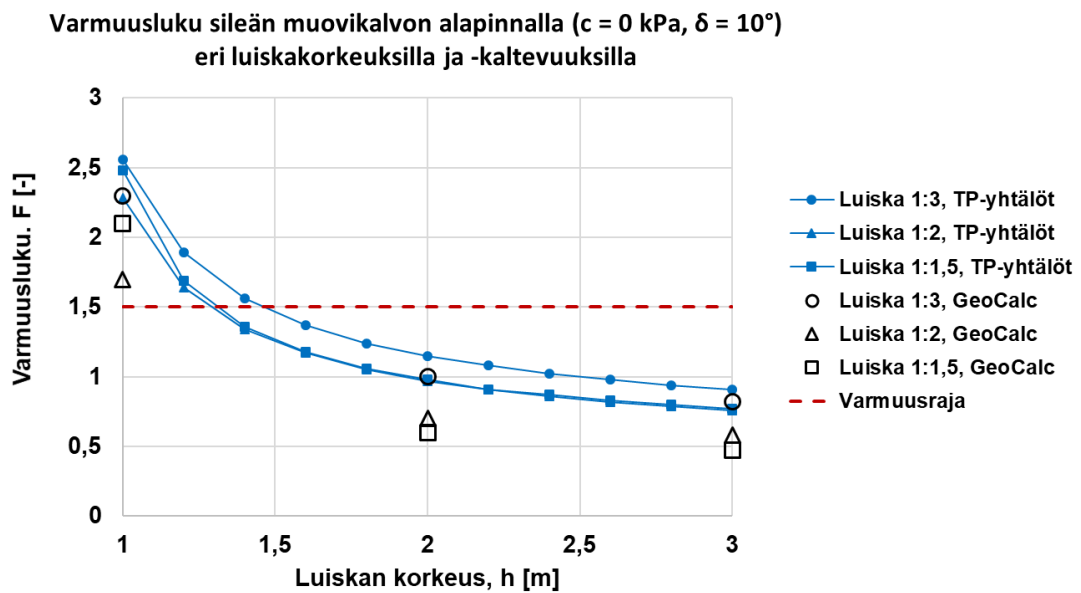
Taulukko 3. Tasapainoyhtälöillä laskettu kokonaisvarmuusluku (F) **sileällä muovikalvolla** eri luiskakaltevuuksissa, liukusortuma on pakotettu tapahtumaan muovikalvon ylä- tai alapinnalla

Luiskan korkeus	Luiskan kaltevuus	1:3	1:2	1:1,5
3 m	yläpinta	1,5	1,2	1,0
	alapinta	0,9	0,7	0,7
2 m	yläpinta	1,7	1,3	1,2
	alapinta	1,2	0,9	0,9
1 m	yläpinta	3,2	2,7	2,7
	alapinta	2,6	2,3	2,5

Taulukossa on **punaisella** tapaukset, joissa varmuusluku on tavoitetta ($F=1,5$) alhaisempi. Taulukossa on **alleiviivattuna** tapaukset, joissa kokemusten mukaan suojaverhous on pysynyt sileän muovin päällä valumatta.



Kuva 3. Laskentatulokset sileän muovikalvon yläpinnalla



Kuva 4. Laskentatulokset sileän muovikalvon alapinnalla

1.3.2 Kitkapintainen kalvo

Laskentatulokset kitkapintaisella kalvolla on esitetty taulukoissa 4 ja 5 sekä kuvissa 5 ja 6. Tulosten mukaan varmuusluku $F=1,5$ saavutetaan kitkapintaisen muovin alapinnassa korkeuteen 3 m asti. Yläpinnan osalta luiskakaltevuuksella 1:1,5 jo 2 m pengerkorkeus voisi olla liikaa

Kitkapintaisista kalvoista ei ole käytännön kokemuksia suomalaisilta teiltä. Yli 2 m luiskissa muoviin voi kohdistua suurta vetoa.

Tulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon, että laskennassa ei ole tarkasteltu ankkuroinnin vaikutusta muovin pysyvyyteen.

*Taulukko 4. GeoCalc-ohjelmalla laskettu kokonaisvarmuusluku (F) **kitkapinnoitetulla muovikalvolla** eri luiskakaltevuuksissa, liukusortuma on pakotettu tapahtumaan muovikalvon ylä- tai alapinnalla*

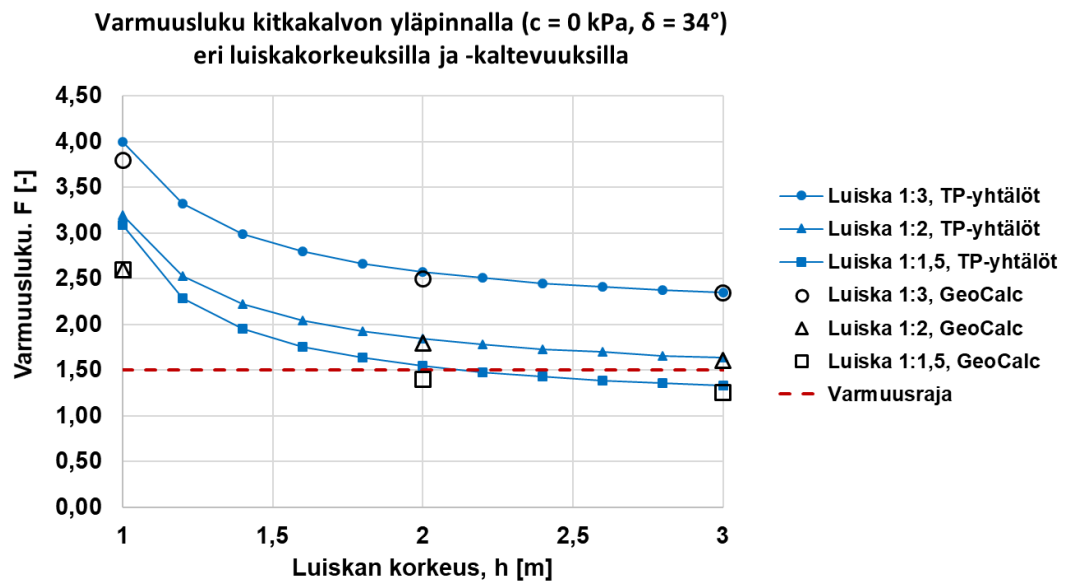
Luiskan korkeus	Luiskan kaltevuus	1:3	1:2	1:1,5
3 m	yläpinta	2,4	1,6	1,3
	alapinta	3,8	2,7	2,2
2 m	yläpinta	2,5	1,8	1,4
	alapinta	4,0	2,9	2,3
1 m	yläpinta	3,8	2,6	
	alapinta	5,4	4,1	2,6

Taulukossa on punaisella tapaukset, joissa varmuusluku on tavoitetta ($F=1,5$) alhaisempi.

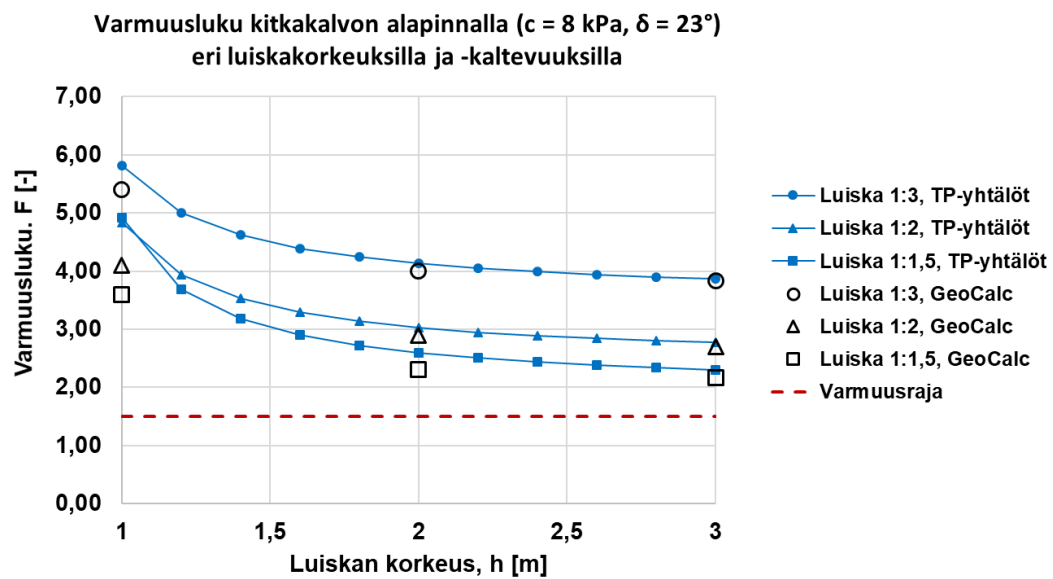
*Taulukko 5. Tasapainoyhtälöillä laskettu kokonaisvarmuusluku (F) **kitkapinnoitetulla muovikalvolla** eri luiskakaltevuuksissa, liukusortuma on pakotettu tapahtumaan muovikalvon ylä- tai alapinnalla*

Luiskan korkeus	Luiskan kaltevuus	1:3	1:2	1:1,5
3 m	yläpinta	2,3	1,7	1,3
	alapinta	3,8	2,7	2,3
2 m	yläpinta	2,7	1,8	1,6
	alapinta	4,2	3,0	2,6
1 m	yläpinta	4,0	3,2	3,1
	alapinta	5,8	4,8	4,8

**) Taulukossa on punaisella tapaukset, joissa varmuusluku on tavoitetta ($F=1,5$) alhaisempi.*



Kuva 5. Laskentatulokset kitkapiinnoitetun muovikalvon yläpinnalla



Kuva 6. Laskentatulokset kitkapiinnoitetun muovikalvon alapinnalla

2 Luiskasuojauksen maksimivesimäärätarkastelut

2.1 Maksimivesimäärätarkastelujen lähtökohdat

Maksimivesimäärätarkastelussa selvitettiin laskennallisesti maanteiden pohjaveden luiskasuojauksen vesimääriä. Tavoitteena oli selvittää esimerkkirakenteiden tarkastelulla, toimiiko rakenteiden kuivatus luiskasuojauksissa vakiokoon salaojaputkilla. Tietoa tarvitaan mm. materiaalien valinnassa sekä rakenteen suunnittelussa ja mitoittamisessa. Työssä käytettiin lähtöaineistona aikaisempia pohjaveden luiskasuojauksen suunnitelmia, pohjaveden luiskasuojauksen aikaisempia tutkimuksia, aikaisempia materiaalitutkimuksia, voimassa olevaa kuivatuksen suunnittelun ja hulevesien hallinnan ohjeistusta sekä aihealueen kirjallisuutta.

Salaoja on maassa oleva putkioja, jonka sisään vesi pääsee koko putken pituudelta. Salaojien kautta poistuu se osa maan huokosissa olevasta vedestä, joka liikkuu painovoiman vaikutuksesta. Aivan sadetapahtuman alussa vesi pidättyy rakentamattomissa olosuhteissa kasvillisuuteen. Kuiva maaperä on usein imeytyskyvyltään heikkoa, joten aluksi vesi muodostaa lätäköitä painannevarastoihin. Sen jälkeen vesi alkaa imeytyä maahan, aluksi nopeasti, mutta pintakerroksen kostuttua imeytyminen etenee tasaisella nopeudella. Veden imeytymisnopeus on maalajista riippuen 0,003–0,8 mm/min ja se voi olla maaperän makrohuokosissa suurempikin.

Salaojien kapasiteetin riittävyyden tarkasteluissa oletettiin, että osa sadanasta valuu pintaajia pitkin purkupaikkaan, osa suotautuu luiskaverhouksen ja salaojan ympärystytön kautta purkupaikkaan ja osa kulkee purkupaikkaan salaojaputkessa. Veden imeytymisen nopeuden arvioitiin vastaavan maalajien keskimääräisiä vedenjohtavuuden arvoja. Maalajien vedenjohtavuuden ja huokoisuuden arvoina käytettiin kirjallisuudesta löytyviä arvoja.

Laskelmissa mitoitusasteen rankkuus määritettiin mitoitusasteen kestoajan (käytettiin 10 min) ja mitoitusvirtaaman toistuvuuden (käytettiin 50 vuotta) perusteella. Mitoitusasteen arvoina käytettiin tarkasteluissa 270 l/(s*ha), mikä on $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Mitoitusarvo valittiin **Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu** -ohjeen kuvan 4 nomogrammista.

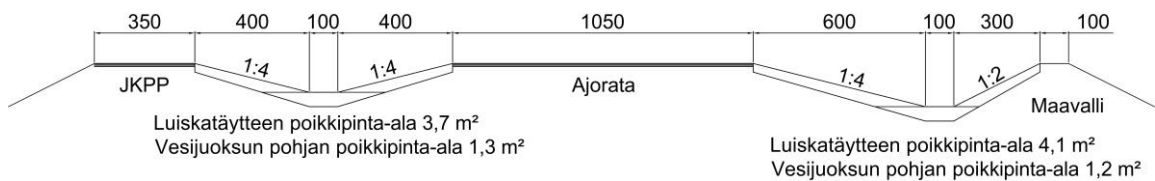
Ilmastonmuutoksen myötä sademäärät tulevat ennusteiden mukaan kaikkialla Suomessa kasvamaan. Sadeolojen ennustetaan myös äärevöityvän eli ilmaston muuttuessa yleistyvät pitkät kuivat kaudet ja toisaalta nykyistä voimakkaammat rankkasateet. Ilmastonmuutos tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa rakenteita, joiden oletettu käyttöikä on pitkä. Riittävä likiarvo mitoitusasteen saadaan ohjeiden mukaan lisäämällä 20 % nyt arvioituihin maksimisadantoihin ja -valuntoihin.

2.2 Maksimivesimäärätarkastelujen laskenta- tapausten esittely

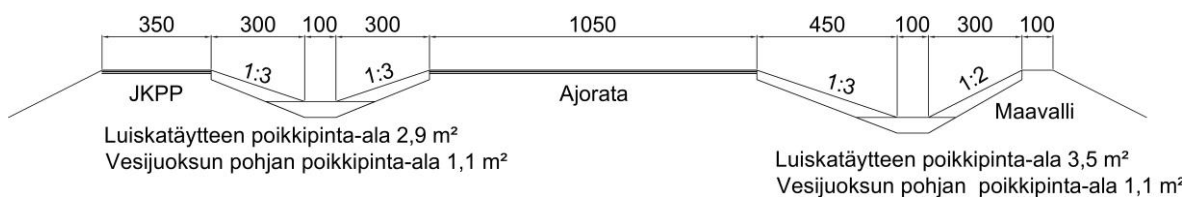
Tarkastelut tehtiin kuvissa 7 ja 8 esitetyillä poikkileikkauksilla. Tarkastellussa poikkileikkauksessa tie on yksiajoratainen. Laskennan tavoitteena oli selvittää kuivatuskapasiteetin riittävyyden kannalta pahin mahdollinen tilanne. Tien vasemmalla puolella on jalankulun ja pyöräilyn väylä ja tien oikealla puolella maavalli. Laskennat tehtiin oikean puolen ojan osalta niin, että käytettiin ajoradan päällysteen kaltevuutena yksipuoleista oikealle suuntautuvaa kaltevuutta ja vasemman puolen ojan osalta niin, että käytettiin ajoradan päällysteen kaltevuutena yksipuoleista vasemmalle suuntautuvaa kaltevuutta ja jalankulku- ja pyöräilyväylän osalta yksipuoleista oikealle suuntautuvaa kaltevuutta.

Laskennassa luiskasuojuuksen päällä olevan maakerroksen oletettiin olevan homogeenista maa-ainesta (sora, karkea hiekka, keskikarkea hiekka tai sorainen hiekkamoreeni). Luiskatäytteen maakerroksen kokonaispaksuutena käytettiin 0,5 m ojan pohjalla ja 0,3 m ajoradan reunassa.

Hulevesimäärien arvioinnissa käytettiin taulukossa 6 esitettyjä leveyksiä.



Kuva 7. Esimerkki 1 – luiskakaltevuudet 1:4/1:2



Kuva 8. Esimerkki 2 – luiskakaltevuudet 1:3/1:2

Taulukko 6. Hulevesimäärien arvioinnissa käytetyt leveydet eri laskentatapauksissa

Luiska-kaltevuudet	Sivuoja	Ajoradan kaltevuus	Asfaltti, leveys (m)	Sora, leveys (m)	Nurmi, leveys (m)
1:4/1:2	oikea	1-puoleinen, oikealle	9,5	0,5	10
	vasen	1-puoleinen, vasemmalle jkpp 1-puoleinen, oikealle	13	0,5	9
1:3/1:2	oikea	1-puoleinen, oikealle	9,5	0,5	9,5
	vasen	1-puoleinen, vasemmalle jkpp 1-puoleinen, oikealle	13	0,5	7

2.3 Laskennan kulku

Laskennassa tarkasteltiin salaojien kykyä kuivattaa vedet rankkasade-tilanteessa. Mitoitussateen arvoina käytettiin tarkasteluissa 270 l/(s*ha), mikä on $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ (sateen kesto aika 10 min ja mitoitusvirtaaman toistuvuus 50 vuotta). Mitoitustarkastelut tehtiin käyttäen luiskasuojausmateriaaleille tyypillisiä huokoisuuden ja vedenjohtavuuden arvoja, Darcyn kaavaa sekä Darcy-Weisbachin ja Manningin kaavoja tasaiselle virtaukselle salaojan kapasiteetin riittävyyden arvioinnissa. Darcy-Weisbachin kaava soveltuu sisältä sileäpintaisten putkien virtaaman tarkasteluun. Manningin kaava soveltuu sisäpinnaltaan aallotettujen putkien tarkasteluun. Aallotetun putken kapasiteetti on vastaavan sisähalkaisijan omaavaa sileäpintaista putkea heikompi.

Darcy-Weisbachin ja Manningin kaavojen käyttö salaojien mitoituksessa on kuvattu tarkemmin esimerkiksi teoksessa: **Järvelä, J. (2016). Luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteet. Teoksessa: M. Paasonen-Kivekäs, R. Peltomaa, P. Vakkilainen, & H. Äijö (Toimittajat), Maan vesi- ja ravinnetalous: Ojitus, kastelu ja ympäristö (2. täydennetty painos toim., Sivut 230-239). Helsinki: Salaojayhdistys ry.** Kaavat perustuvat virtaaman määrään (Q), hydrauliseen gradienttiin (i), putken halkaisijaan (d) sekä putken seinämän karkeuteen. Salaojayhdistyksen julkaisussa on esitetty tasaisen virtauksen laskentakaavat sisältä sileille putkille Darcy-Weisbachin kaavaan perustuen ja aallotetuille putkille Manningin kaavaan perustuen.

Sisältä sileille putkille, tasainen virtaus $Q = 50 \cdot d^{2,71} \cdot i^{0,57}$ (kaava 1)

Sisältä aallotetuille putkille, tasainen virtaus $Q = 22 \cdot d^{2,67} \cdot i^{0,50}$ (kaava 2)

Kaavoissa Q = putkivirtaama (m^3/s), d = putken sisähalkaisija (m) ja i = hydraulinen gradientti. Tasaisessa virtauksessa hydraulinen gradientti on vakio ja sen oletetaan noudattavan putken yläreunan kaltevuutta.

Maksimivirtausta voivat aikaa myöten pienentää esimerkiksi salaojaputkiin kertyvät liete- tai rautasaostumat. Virtaaman pienentymiseen varaudutaan peltosalaojien mitoituksessa lisäämällä putkivirtaaman (Q) arvoon 25 %. Tässä selvityksessä esitellyissä laskelmissa tukkeutumista ei ole otettu huomioon, koska **InfraRYL:n luvun 14230** päivityksen myötä pohjaveden luiskasuojausrakenteissa salaojan ympärystytön päällä ja sivuilla tullaan käyttämään suodatinkangasta. Lisäksi salaojan ympärystytön materiaalin sallittu hienoainespitoisuus on alhainen ja myös muiden rakennekerrosten materiaalien sallittua hienoainespitoisuutta on pienennetty.

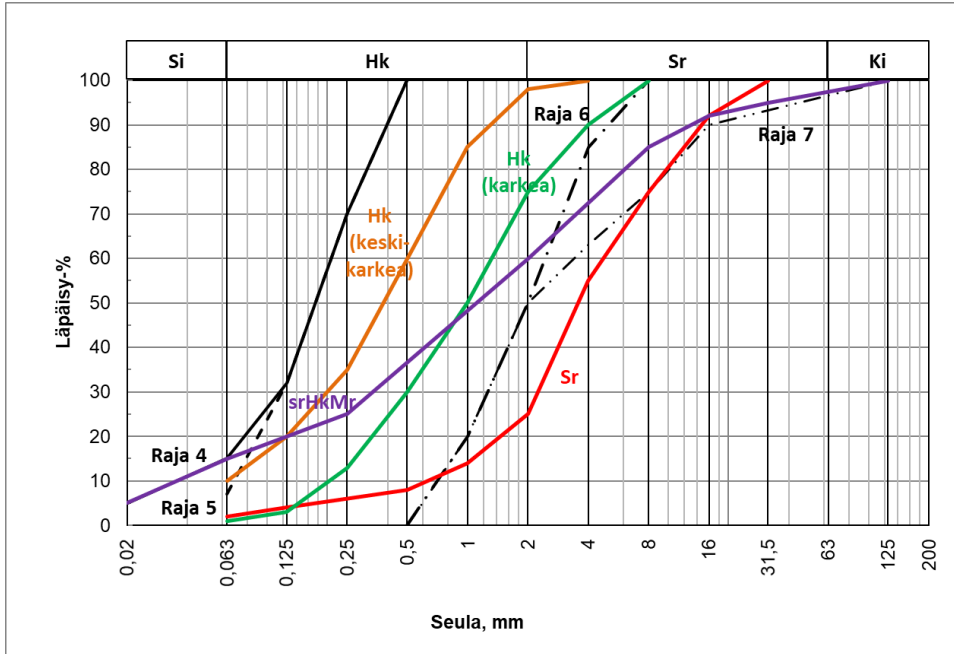
Salaojaputken kuivatuskapasiteetin riittävyttä tarkasteltiin laskennallisesti alajuoksulla salaojan purkupisteessä eri mittaisilla tieosuuksilla. Laskennassa otettiin huomioon myös luiskatäytteen ja salaojan ympärystytön kuivatuskapasiteetti, jotka ovat kuitenkin salaojan kuivatuskapasiteettiin verrattuna hyvin pieniä.

Salaojaan suotautuvan veden määrä sadetilanteessa arvioitiin luiskatäytteen maalajin vedenläpäisevyyden ja huokostilavuuden perusteella. Maalajien rakeisuus on esitetty kuvassa 9. Luiskamateriaaleille laskennassa käytetyt vedenläpäisevyyden ja huokostilavuuden arvot valittiin kirjallisuuden perusteella ja ne on esitetty taulukossa 7. Maalajin tehokkaan raekoon d10 perusteella on määritetty vedenläpäisevyys soralle, karkealle hiekalle ja keskikarkealle hiekalle **RIL 157-1 s. 419 kuvan** perusteella olettaen kerroksen löyhäksi. Sama kuva on esitetty myös **InfraRYL:ssä (kuva 142525:K2)**. Soraiselle hiekkamoreeniille laskennassa käytetty vedenläpäisevyys vastaa keskimääräistä soraisen hiekkamoreenin vedenläpäisevyyttä Suomen ympäristökeskuksen julkaisun **Suomen maalajien ominaisuuksia** mukaisesti (tutkittuja hiekkamoreenin vedenläpäisevyyden arvoja on esitetty kuvassa 10).

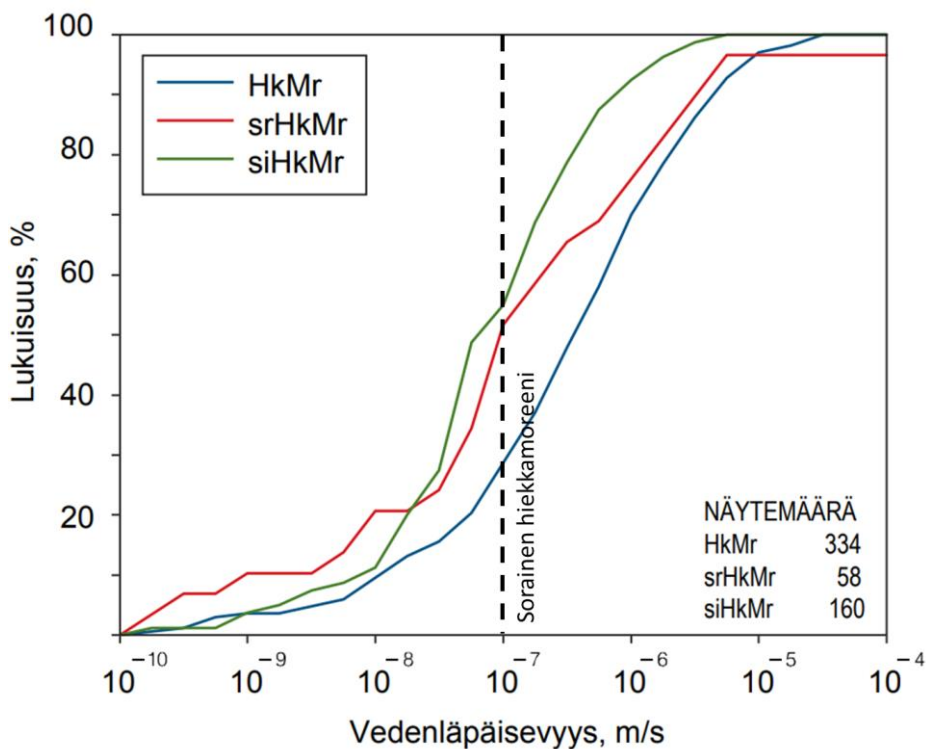
Taulukko 7. Laskennassa käytetyt maalajien vedenläpäisevyydet ja huokostilavuudet

Maalaji	Vedenläpäisevyys, m/s	Tehokas raekoko d10, mm
Sora	$1 \cdot 10^{-3}$	0,6
Hiekka (karkea)	$1 \cdot 10^{-4}$	0,2
Hiekka (keskikarkea)	$1 \cdot 10^{-5}$	0,063
Sorainen hiekkamoreeni	$1 \cdot 10^{-7}$	0,035

Kuvassa 9 on esitetty maalajien rakeisuuksien lisäksi myös **InfraRYLin luvun 14230** mukainen pintakerroksen rakeisuusvaatimus. Materiaaleista sora ei kelpaisi pohjaveden luiskasuojauksen pintakerrokseen. Rajan 5 ylittävä keskikarkea hiekka kelpaisi vain, jos rakenteeseen tehdään erillinen kuivatuskerros. Rajat 5 ja 6 ylittävä sorainen hiekkamoreeni kelpaisi vain, jos rakenteeseen tehdään erillinen kuivatuskerros ja muovin päälle asennetaan suojageotekstiili.



Kuva 9. InfraRYLin mukainen pintakerroksen rakeisuusvaatimus ja esimerkki laskennassa käytettyjen maalajien mahdollisista rakeisuuskäyristä.



Kuva 10. Suomen ympäristökeskuksen julkaisun 2/2012 "Suomen maalajien ominaisuuksia, Nanna Ronkainen" mukaiset vedenläpäisevyydet hiekkamoreenille, soraiselle hiekkamoreenille ja silttiselle hiekkamoreenille sekä laskennassa käytetty vedenläpäisevyyden arvo soraiselle hiekkamoreenille.

Laskennassa oletettiin, että sadevesi ensisijaisesti suotautuu luiskasuojausrakenteen läpi ja toissijaisesti kulkee pintavaluntana. Tarkastelut tehtiin siis siten, että esimerkiksi sorarakenteella, jossa on hyvä vedenläpäisevyys, koko sadanta suotautuu joko rakenteen kautta salaojaan tai rakennekerroksia pitkin gradientin suuntaan eikä pintaojia pitkin valu lainkaan vettä. Toisaalta esimerkiksi soramoreenirakenteella, jolla on alhainen vedenläpäisevyys, lähes koko sadanta valuu pintaojia pitkin, koska rakenteen läpi suotautuu vain pieni osa, noin 4%, sadevedestä. Luiskasuojausrakenteeseen imeytyvien suotovesien virtaus kohti purkupaikkaa tapahtuu ensisijaisesti salaojaputken kautta. Maa-ainesten läpi tien pituussuunnassa suotautuvat vesimäärät ovat tarkastelluissa tapauksissa useita kertaluokkia pienempiä kuin salaojan kautta purkautuvan veden määrät. Esimerkiksi 100 m pitkällä 1 % kaltevuudessa olevalla osuudella vedet kulkeutuvat laskennallisesti seuraavasti:

- pystysuoraan pintamaiden läpi luiskamateriaalin maalajista riippuen suotautuu vettä $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ – $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$,
- tien pituussuunnassa salaojan ympärystytön läpi suotautuu vettä $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ja
- tien pituussuunnassa luiskatäytteen läpi suotautuu vettä maalajista riippuen $4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ – $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Hulevesien virtaama luiskatäytteen läpi salaojaan laskettiin maalajin vedenläpäisevyyden, huokostilavuuden ja kerrospaksuuden perusteella. Kerrospaksuutena käytettiin laskennassa 0,5 m:ä ja huokostilavuuden ja vedenläpäisevyyden arvoina taulukossa 7 esitettyjä arvoja. Pystysuuntaisen virtaaman laskennallisesta arvosta vähennettiin tien pituussuunnassa maa-ainesten läpi ja salaojan ympärystytön läpi tapahtuva virtaama. Lasketut virtaamat (Q , m^3/s / 100 m pitkällä 1 % kaltevuudessa) pintamaiden läpi salaojaan on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Virtaama salaojaan pintamaiden läpi, luiskakaltevuus ja tarkastelukohde (kumpi sivuoja) määräävät luiskaverhouksen pinta-alan ja tilavuuden, jotka ovat parametreinä virtaaman laskennassa

Luiska- kaltevuudet	Sivuoja	Virtaama salaojaan pintamaiden läpi, Q (m^3/s)			
		Sora	Karkea hiekk	Keski- hiekk	Hiekka- moreeni
k (m/s)		$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$
1:4/1:2	oikea	0,055 (*)	0,030	0,0030	0,000020
1:4/1:2	vasen	0,050 (*)	0,027	0,0027	0,000018
1:3/1:2	oikea	0,053 (*)	0,029	0,0028	0,000019
1:3/1:2	vasen	0,039 (*)	0,021	0,0021	0,000014

(* Yhtä suuri kuin koko sadanta kohteelle)

Virtaama-arvojen perusteella laskettiin mitoitushalkaisijat sisältä sileälle putkelle Darcy-Weisbachin kaavalla (kaava 1) ja sisältä aallotetulle putkelle Manningin kaavalla (kaava 2). Laskennalliset salaojien sisähalkaisijat 100 m pituisen tieosuuden (1 % pituuskaltevuus) salaojan purkupisteessä on esitetty taulukoissa 9 ja 10.

Taulukko 9. Salaojaputken laskennallinen mitoituslaskaisija Darcy-Weisbachin mitoitusyhtälöllä laskettuna, kun käytetään sisältä sileää putkea, tieosuus 100 m, pituuskaltevuus 1 %

Luiska- kalte- vuudet	Sivuoja	Ajouradan kaltevuus	Salaojaputken mitoituslaskaisija, Darcy-Weisbachin mitoitusyhtälö, sileä putki, d (mm), (ulkohalk./sisähalk.)			
			Sora	Karkea hiekk	Keski- hiekk	Hiekka- moreeni
k (m/s)			1*10⁻³	1*10⁻⁴	1*10⁻⁵	1*10⁻⁷
1:4/1:2	oikea	1-puol., oik.	250/233	200/176	110/95	110/95
1:4/1:2	vasen	1-puol., vas.	250/233	200/176	110/95	110/95
1:3/1:2	oikea	1-puol., oik.	250/233	200/176	110/95	110/95
1:3/1:2	vasen	1-puol., vas.	250/233	200/176	110/95	110/95

Taulukko 10. Salaojaputken laskennallinen mitoituslaskaisija Manningin mitoitusyhtälöllä laskettuna, kun käytetään sisältä aallotettua putkea, tieosuus 100 m, pituuskaltevuus 1 %

Luiska- kalte- vuudet	Sivuoja	Ajouradan kaltevuus	Salaojaputken mitoituslaskaisija, Manningin mitoitusyhtälö, aallotettu putki, d (mm), (ulkohalk./sisähalk.)			
			Sora	Karkea hiekk	Keski- hiekk	Hiekka- moreeni
k (m/s)			1*10⁻³	1*10⁻⁴	1*10⁻⁵	1*10⁻⁷
1:4/1:2	oikea	1-puol., oik.	351/277	250/233	110/95	110/95
1:4/1:2	vasen	1-puol., vas.	351/277	250/233	110/95	110/95
1:3/1:2	oikea	1-puol., oik.	351/277	250/233	110/95	110/95
1:3/1:2	vasen	1-puol., vas.	250/233	250/233	110/95	110/95

Tehtyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että pohjaveden luiskasuojauksissa voi erittäin karkeilla pintakerroksen materiaaleilla tulla eteen sadantatilanteita, joissa tavanomaisten salaojien kuivatuskapasiteetti ei riitä. Sorarakenteissa salaojien kapasiteetti ylittyisi (1% pituuskaltevuus) putkikoolla 351/277 mm laskennan mukaan jo 300 m pitkällä osuuksilla sileällä putkella (aallotetulla putkella 200 m). Karkealla hiekalla vastaavasti kapasiteetti ylittyisi 400 m pitkällä kohteilla sileällä putkella ja 300 m pitkällä kohteilla sisältä aallotetuilla putkilla.

Koska esimerkiksi valaisinpylväiden läpiviennit sallitaan luiskasuojaurakenteessa 0,5 m korkeudella ojan vesijuoksun pohjalta, tarkasteltiin selvityksessä myös, nouseeko vesi ojassa yli 0,5 m tasolle ojan pohjan vesijuoksusta ja kuinka kauan tulvatilanne ojassa kestäisi. Tulvatilanteen oletettiin laskennassa päättyvän, kun vesi laskee rakenteessa alle 0,5 m tasolle ojan pohjan vesijuoksusta. Tulvatilanteen alkamisajankohta (min, sateen alusta) ja tulvan kesto-aika (min) on esitetty sisältä sileälle putkelle taulukossa 11 (kohteen pituus 400 m, 1 % pituuskaltevuus) ja aallotetulle putkelle taulukossa 12 (kohteen pituus 300 m, 1 % pituuskaltevuus).

Taulukko 11. Ajanhetki (min) sateen alusta, jolloin vesipinta pohjavesisuojaus-rakenteen ojassa nousee yli 0,5 m korkeudelle ojan vesijuoksusta sekä tulvan kesto-aika (min), kun käytetään sisältä sileää putkea, tieosuus 400 m, pituuskaltevuus 1 %. Osa rakenteista ei tulvi ollenkaan laskennallisessa tapauksessa (tyhjät ruudut).

Luiska - kaltevuudet	Sivuoja	Ajouradan kaltevuus	Ajanhetki (min) sateen alusta jolloin tulva alkaa tulvan kesto-aika (min) sileä putki			
			Sora (*)	Karkea hiekka	Keskihiekka	Hiekka-moreeni
k (m/s)			1*10⁻³	1*10⁻⁴	1*10⁻⁵	1*10⁻⁷
1:4/1:2	oikea	1-puol., oik.	alku 9 min kesto 22 min	alku 15 min kesto 15 min		
1:4/1:2	vasen	1-puol., vas.	alku 8 min kesto 22 min			
1:3/1:2	oikea	1-puol., oik.	alku 8 min kesto 21 min	alku 13 min kesto 15 min		
1:3/1:2	vasen	1-puol., vas.	alku 9 min kesto 18 min			

*) Sorarakenne tulvii jo 300 m osuudella

Taulukko 11. Ajanhetki (min) sateen alusta, jolloin vesipinta pohjavesisuojaus-rakenteen ojassa nousee yli 0,5 m korkeudelle ojan vesijuoksusta sekä tulvan kesto-aika (min), kun käytetään sisältä aallotettua putkea, tieosuus 300 m, pituuskaltevuus 1 %. Osa rakenteista ei tulvi ollenkaan laskennallisessa tapauksessa (tyhjät ruudut).

Luiska - kaltevuudet	Sivuoja	Ajouradan kaltevuus	Ajanhetki (min) sateen alusta jolloin tulva alkaa tulvan kesto-aika (min) aallotettu putki			
			Sora (*)	Karkea hiekka	Keskihiekka	Hiekka-moreeni
k (m/s)			1*10⁻³	1*10⁻⁴	1*10⁻⁵	1*10⁻⁷
1:4/1:2	oikea	1-puol., oik.	alku 5 min kesto 44 min	alku 9 min kesto 33 min		
1:4/1:2	vasen	1-puol., vas.	alku 4,9 min kesto 42 min	alku 8 min kesto 31 min		
1:3/1:2	oikea	1-puol., oik.	alku 5 min kesto 43 min	alku 7 min kesto 32 min		
1:3/1:2	vasen	1-puol., vas.	alku 5 min kesto 37 min			

(* Sorarakenne tulvii jo 200 m osuudella)

2.4 Laskentatulokset

Laskennan tavoitteena oli selvittää, toimiiko rakenteiden kuivatus pohjaveden luiskasuojauksissa vakiokoon salaojaputkilla. Tavanomaisia salaojien vakio-putkikokoja ovat seuraavat (ulkohalkaisija/sisähalkaisija): 110/95 mm, 160/140 mm, 200/176 mm, 250/233 mm ja 351/277 mm. Yleensä salaojituksissa käytetään putkikokoja 110/95 mm ja suuremmat putkikoot ovat merkittävästi pienempiä putkia kalliimpia.

Taulukoissa 13 ja 14 on esitetty arvio tavanomaisten putkikokojen (mm) riittävydestä esimerkin mukaisilla eri pituisilla ja eri pituuskaltevuuden tiekohteilla sisältä sileällä putkella ja sisältä aallotetulla putkella. Maanteiden pohjaveden luiskasuojaurakenteissa salaojana käytetään yleensä sisältä sileää salaojaputkea. Taulukoissa on esitetty putkikoot rakenteessa, jossa luiskakaltevuudet ovat 1:4/1:2 ja tarkastellaan esimerkin oikean puoleista sivuoja (poikkileikkaus on esitetty kuvassa 7).

Taulukko 12. Tavanomaisten putkikokojen (mm) riittävyys eri pituisilla eri pituuskaltevuuden tiekohteilla sileällä putkella, taulukossa on esitetty arvot kuvan 7 esimerkissä, jossa luiskakaltevuudet ovat 1:4/1:2 ja tarkastellaan oikean puoleista sivuoja.

Tieosuuden pituus (m)	Pituuskaltevuus 1%	Pituuskaltevuus 2%	Pituuskaltevuus 3%
Pintakerros: sora ($k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s)			
100 m	250/233	250/233	200/176
200 m	351/277	351/277	250/233
300 m	-	-	351/277
400 m	-	-	-
Pintakerros: karkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s)			
100 m	200/176	200/176	160/140
200 m	250/233	250/233	200/176
300 m	351/277	250/233	250/233
400 m	-	351/277	250/233
500 m	-	351/277	351/277
600 m	-	-	351/277
700 m	-	-	-
Pintakerros: keskikarkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-5}$ m/s)			
100 m	110/95	110/95	110/95
200 m	110/95	110/95	110/95
300 m	160/140	110/95	110/95
400 m	160/140	160/140	160/140
500 m	160/140	160/140	160/140
600 m	200/176	160/140	160/140
700 m	200/176	160/140	160/140
800 m	200/176	160/140	160/140
900 m	200/176	200/176	160/140
1000 m	200/176	200/176	160/140
Pintakerros: sorainen hiekkamoreeni ($k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s)			
100 m	110/95	110/95	110/95
1000 m	110/95	110/95	110/95

Vuoteen 2018 asti pohjaveden luiskasuojauksen pintakerros tehtiin usein hienosta hiekasta tai hiekkamoreenista. Taulukosta 13 nähdään, että siirtyminen tutkitun hiekkamoreenin kaltaisesta pintakerrosmateriaalista tasarakeisempaan karkeaan hiekkaan ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s), joka edustaa **InfraRYL 14230** -luvun mukaisen pintakerroksen ohjealueen oikeaa puolta, edellyttää yli 200 mm salaojaputken käyttöä. Karkean hiekan käyttö voi johtaa siihen, että pääosa sadevedestä imeytyy pintakerrokseen heti sateen aikana ja oja tulvii lyhytaikaisesti taulukon 15 mukaisesti lyhytaikaisesti tiivistyskerroksen muovikalvojen limisaumojen yli. Laskelmissa ei ole otettu huomioon ojan pohjan liettymisen ja luiskan kasvillisuuden vaikutusta veden imeytymiseen pintakerrokseen. Käytännössä veden imeytyminen pintakerrokseen hidastuu ajan myötä.

InfraRYL 14230 -luvun mukaisen, kuvassa 9 esitetyn, pintakerroksen ohjealueen vasenta puoliskoa edustava keskikarkea hiekka ei vaadi alle 1 km osuuksilla yli 200 mm putkea. Myöskään sorainen hiekkamoreeni, jonka rakeisuuskäyrä alkaa rajan 4 läheltä ja päättyy rajan 7 tuntumaan ohjealueen sisällä, ei vaadi yli 110 mm putkea alle 1 km osuuksilla. Näitä materiaaleja käytettäessä suuri osa rankkasateiden vedestä virtaa avo-ojan pohjaa pitkin. Sateen alun likaisimmat tievedet ehtivät kuitenkin imeytyä pintakerrokseen ja suodattua siellä.

Taulukko 13. Tavanomaisten putkikokojen (mm) riittävyys eri pituisilla eri pituuskaltevuuden tiekohteilla sisältä aallotetulla putkella, taulukossa on esitetty arvot kuvan 7 esimerkissä, jossa luiskakaltevuudet ovat 1:4/1:2 ja tarkastellaan oikean puoleista sivuojaa.

Tieosuuden pituus (m)	Pituuskaltevuus 1%	Pituuskaltevuus 2%	Pituuskaltevuus 3%
Pintakerros: sora ($k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s)			
100 m	351/277	250/233	250/233
200 m	-	-	351/277
300 m	-	-	-
Pintakerros: karkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s)			
100 m	250/233	250/233	200/176
200 m	351/277	250/233	250/233
300 m	-	351/277	351/277
400 m	-	-	351/277
500 m	-	-	-
Pintakerros: keskikarkeahiekka ($k=1 \cdot 10^{-5}$ m/s)			
100 m	110/95	110/95	110/95
200 m	160/140	160/140	110/95
300 m	160/140	160/140	160/140
400 m	200/176	160/140	160/140
500 m	200/176	160/140	160/140
600 m	200/176	200/176	160/140
700 m	250/233	200/176	200/176
800 m	250/233	200/176	200/176
900 m	250/233	200/176	200/176
1000 m	250/233	250/233	200/176
Pintakerros: sorainen hiekkamoreeni ($k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s)			
100 m	110/95	110/95	110/95
1000 m	110/95	110/95	110/95

Kun salaojan kuivatuskapasiteetti ei riitä, vettä padottuu rakenteeseen. Koska pohjaveden luiskasuojauksessa luiskan pohja on tiivistetty, ei vesi purkaudu alaspäin, vaan veden pinta nousee ojan pohjalla. Esimerkiksi valaisinpylväiden läpiviennit sallitaan pohjaveden luiskasuojusrakenteessa 0,5 m korkeudella ojan vesijuoksun pohjalta. Vaikka läpiviennit tiivistetään, ne ovat rakenteessa epäjatkuvuuskohtia, joiden kautta hulevedet saattavat päästä muuta rakennetta helpommin purkautumaan pohjaveteen. Taulukoissa 15-16 on esitetty esimerkkirakenteella luiskasuojusrakenteen tulvan eli yli 0,5 m vedenkorkeuden laskennallinen kesto aika. Tulvatarkastelut on tehty suurimmalla laskennassa käytetyllä putkikoolla 351/277 mm. Jos suurinta sallittua putkikokoa pienennetään, tulvatilanne alkaa aikaisemmin ja pysyvän vedenpaineen tilanne kestää pidempään.

Tulvatilanteen vakavuuteen esimerkiksi pohjavesien laadun kannalta vaikuttavat muun muassa hulevesien haitta-ainepitoisuudet, haitta-aineiden pidäytyminen kasvillisuuteen ja maaperään sekä rakenteen epäjatkuvuuskohtien tiivistysten ja luiskasuojauksen tiivistysrakenteiden kunto. Hulevesien haitta-ainepitoisuudet ovat suurimmillaan sadetapahtuman alussa, minkä jälkeen ne selvitysten mukaan nopeasti laimenevat. Liikenneviraston aikaisemmissa tutkimuksissa (Kaksikerrosojan suodatusvaikutus ja maantiehuleveden laatu, Diplomityö, Oulun yliopisto 2016, Ada Laitinen) on todettu, että maanteiden hulevesien sisältäviä haitta-aineita pidättyy luiskasuojauksen maamateriaaleihin.

Luiskien ojan pohjien liettyminen ja luiskien kasvillisuus muuttavat veden imeytymisnopeutta ja siten myös luiskasuojauksen tulvien kesto aikaa pohjaveden luiskasuojusrakenteissa.

Taulukko 14. **Luiskasuojusrakenteen tulvan kesto aika (min)** eri pituisilla eri pituuskaltevuuden tiekohteilla **sileällä putkella**, taulukossa on esitetty arvot kuvan 7 esimerkissä, jossa luiskakaltevuudet ovat 1:4/1:2 ja tarkastellaan oikean puoleista sivuoja. Laskennassa käytetty maksimiputkikoko on ollut suuri (351/277 mm). Tavanomaista putkikoko (110/95 mm) käytettäessä tulva alkaa aikaisemmin ja kestää pidempään. Tapaukset, joissa salaojien kapasiteetti laskennallisesti riittää, on esitetty tyhjinä ruutuina.

Tieosuuden pituus (m)	Pituuskaltevuus 1%	Pituuskaltevuus 2%	Pituuskaltevuus 3%
Pintakerros: sora ($k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s)			
200 m			
300 m	19 min	7 min	
400 m	22 min	9 min	4 min
500 m	25 min	10 min	5 min
600 m	27 min	12 min	6 min
700 m	29 min	13 min	7 min
800 m	31 min	14 min	7 min
900 m	33 min	15 min	8 min
1000 m	35 min	16 min	9 min
Pintakerros: karkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s)			
300 m			
400 m	15 min		
500 m	18 min		
600 m	20 min	7 min	
700 m	21 min	8 min	3 min
800 m	23 min	9 min	4 min
900 m	24 min	10 min	5 min
1000 m	26 min	11 min	5 min
Pintakerros: keskikarkeahiekka ($k=1 \cdot 10^{-5}$ m/s)			
1000 m			
Pintakerros: sorainen hiekkamoreeni ($k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s)			
1000 m			

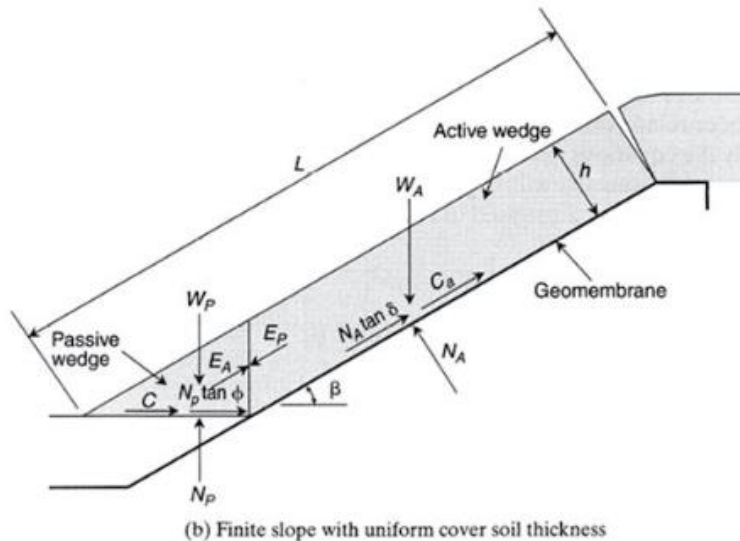
Taulukko 15. **Luiskasuojusrakenteen tulvan kesto aika (min)** eri pituisilla eri pituuskaltevuuden tiekohteilla sisältä **aallotetulla putkella**, taulukossa on esitetty arvot esimerkissä, jossa luiskakaltevuudet ovat 1:4/1:2 ja tarkastellaan oikean puoleista sivuoja. Laskennassa käytetty maksimiputkikoko on ollut suuri (351/277 mm). Tavanomaista putkikokoa (110/95 mm) käytettäessä tulva alkaa aikaisemmin ja kestää pidempään. Tapaukset, joissa salaojien kapasiteetti laskennallisesti riittää, on esitetty tyhjinä ruutuina.

Tieosuuden pituus (m)	Pituuskaltevuus 1%	Pituuskaltevuus 2%	Pituuskaltevuus 3%
Pintakerros: sora ($k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s)			
100 m			
200 m	36 min	19 min	
300 m	44 min	23 min	15 min
400 m	50 min	27 min	18 min
500 m	55 min	30 min	20 min
600 m	59 min	33 min	23 min
700 m	63 min	36 min	25 min
800 m	67 min	38 min	26 min
900 m	71 min	40 min	28 min
1000 m	74 min	42 min	29 min
Pintakerros: karkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s)			
200 m			
300 m	33 min		
400 m	37 min	20 min	
500 m	42 min	22 min	14 min
600 m	45 min	24 min	16 min
700 m	48 min	26 min	18 min
800 m	51 min	28 min	19 min
900 m	54 min	30 min	20 min
1000 m	57 min	32 min	21 min
Pintakerros: keskikarkea hiekka ($k=1 \cdot 10^{-5}$ m/s)			
1000 m			
Pintakerros: sorainen hiekkamoreeni ($k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s)			
1000 m			

Ilmastonmuutoksen myötä sademäärät tulevat ennusteiden mukaan kaikkialla Suomessa kasvamaan. Ohjeistuksen mukaan riittävä likiarvo mitoitusta varten saadaan lisäämällä 20 % nyt arvioituihin maksimisadantoihin ja -valuntoihin. Edellä kuvattu laskenta toistettiin myös ilmastonmuutoksen mukaisen tilanteen sadannalla, joka on 324 l/(s*ha) eli $3,24 \cdot 10^{-5}$ m³/(s*m²).

Laskennan perusteella voidaan todeta, että tässä selvityksessä tarkastellun tulvatilanteen kestoajat luiskasuojusrakenteissa pidentyisivät ainoastaan hyvin vettä läpäisevillä sorarakenteella, koska vain sorarakenteiden kyky johtaa vettä on laskennallisesti suurempi kuin nykytilanteen sadanta.

Tasapainoyhtälöt (Designing with Geosynthetics, Robert M. Koerner)



1. Aktiivikiila

Geometria:

$$x_1 = \frac{h}{\tan(\beta)}$$

$$x_2 = h \tan(\beta)$$

Paino (Aktiivikiila):

$$W_A = \gamma h^2 \left(\frac{L}{h} - x_1 - x_2 \right)$$

$$W_A = \gamma h^2 \left(\frac{L}{h} - \frac{1}{\tan(\beta)} - \frac{1}{2} \tan(\beta) \right)$$

Kitkavoima (Aktiivikiila):

$$N_A = W_A \cos(\beta)$$

Koheesivoima (Liukupinnalla):

$$C_a = c_a \left(L - \frac{h}{\tan(\beta)} \right)$$

Voimatasapainoehto (pystysuunta):

$$E_A \sin(\beta) = W_A - N_A \cos(\beta) - \left(\frac{N_A \tan(\delta) + C_a}{FS} + T \right) \sin(\beta)$$

Kiilojen välinen vaakavoima (aktiivipuoli):

$$E_A = \frac{(FS)(W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta)) - (N_A \tan(\delta) + C_a) \sin(\beta)}{\sin(\beta)(FS)}$$

2. Passiivikiila

Paino (Passiivikiila):

$$W_p = \frac{\gamma h^2}{\sin(2\beta)}$$

Kitkavoima (Passiivikiila):

$$N_p = W_p + E_p \sin(\beta)$$

Koheesivoima (Liukupinnalla):

$$C = c \frac{h}{\sin(\beta)}$$

Voimatasapainoehto (vaakasuunta):

$$E_p \cos(\beta) = \frac{C + N_p \tan(\varphi)}{FS}$$

$$E_p \cos(\beta) = \frac{C + (W_p + E_p \sin(\beta)) \tan(\varphi)}{FS}$$

$$(FS)E_p \cos(\beta) = C + W_p \tan(\varphi) + E_p \sin(\beta) \tan(\varphi)$$

$$E_p = \frac{C + W_p \tan(\varphi)}{(FS)\cos(\beta) - \sin(\beta) \tan(\varphi)}$$

Tasapainoehto:

$$E_A = E_p$$

$$\frac{(FS)(W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta)) - (N_A \tan(\delta) + C_\alpha) \sin(\beta)}{\sin(\beta)(FS)}$$

$$= \frac{C + W_p \tan(\varphi)}{(FS)\cos(\beta) - \sin(\beta) \tan(\varphi)}$$

$$(FS)^2 (W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta)) \cos(\beta) - (FS)(N_A \tan(\delta) + C_\alpha) \sin(\beta) \cos(\beta) -$$

$$(FS)(W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta))(\sin(\beta) \tan(\varphi)) - (N_A \tan(\delta) + C_\alpha) \sin^2(\beta) \tan(\varphi) -$$

$$(FS)(C + W_p \tan(\varphi)) \sin(\beta) = 0$$

3. Varmuusluku:

$$a(FS)^2 + b(FS) + c = 0$$

$$a = (W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta)) \cos(\beta)$$

$$b = -[(W_A - N_A \cos(\beta) - T \sin(\beta)) \sin(\beta) \tan(\varphi) + (N_A \tan(\delta) + C_\alpha) \sin(\beta) \cos(\beta) + (C + W_p \tan(\varphi)) \sin(\beta)]$$

$$c = (N_A \tan(\delta) + C_\alpha) \sin^2(\beta) \tan(\varphi)$$

$$FS = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$



ISSN 2490-0982
ISBN 978-952-317-660-7
www.vayla.fi