




Moreeni tehokäyttöön!

HUUMA, Heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostaminen infra-rakentamisessa

Kirjoittajat: Leena Korkiala-Tanttu, Markku Juvankoski, Harri Kivikoski, Paula Eskola ja Markku Kiviniemi

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Moreeni tehokäyttöön!		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö, Markus Alapassi	Asiakkaan viite	
Projektin nimi HUUMA, Heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostaminen infrarakentamisessa	Projektin numero/lyhytnimi HUUMA/7002	
Raportin laatija(t) Leena Korkiala-Tanttu, Markku Juvankoski, Harri Kivikoski, Paula Eskola ja Markku Kiviniemi	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 74 s. + liitt. 57 s.	
Avainsanat moreeni, heikkolaatuinen, toimivuus, elinkaarikustannukset, ympäristövaikutukset, jalostusmenetelmät	Raportin numero VTT-R-07854-08	
Tiivistelmä		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 30.9.2008		
Laatija  Leena Korkiala-Tanttu erikoistutkija	Tarkastaja  Jouko Törnqvist erikoistutkija	Hyväksyjä  Eila Lehmus teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tampereen kaupunki, Ympäristöministeriö, Tiehallinto, Helsingin kaupunki, Skanska Infra, Hyvinkään Tieliuska Oy, Ratahallintokeskus, VTT Arkisto, tekijät		
<p style="text-align: center;">VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>		

Tiivistelmä

Ympäristöministeriön UUMA-kehitysohjelman HUUMA-projektissa tutkittiin heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostamista. Tavoitteena oli selvittää ja edistää heikkolaatuisten materiaalien hyötykäyttömahdollisuuksia parempilaatuisten materiaalien korvaajana. Hyötykäytöllä voidaan pienentää materiaalien läjitystarvetta ja vähentää kuljetettavien massojen määriä. Massojen paikalla hyödyntäminen säästää myös kustannuksia ja vähentää kuljetuksista aiheutuvia ympäristövaikutuksia.

Tutkimus keskittyi erityisesti moreeniin. Moreeni on Suomen yleisin maalaji ja sitä tavataan ympäri koko maata. Moreeni on parhaimmillaan erittäin kantava ja pitkäikäinen materiaali, mutta sen laatua heikentävät tyypillisesti suuret kivet ja korkeahko hienoainespitoisuus, josta aiheutuu olosuhdeherkkyyttä.

Moreenin hyötykäyttöä väylä- ja infrarakentamisessa voidaan merkittävästi kasvattaa. Jalostamattomana moreenin käytön lisäämistä pidetään potentiaalisimpina meluvallissa, kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa ja sekalaisessa käytössä. Moreenin jalostuksella sen käyttöä on lisättävissä eniten yleisillä teillä, lähes 15 prosenttiyksikköä, eli käyttömäärät ovat yli kaksinkertaistettavissa.

Hankkeessa selvitettiin vanhojen koerakennuskohteiden pitkäaikais-käyttäytymistä. Kohteissa on käytetty pohjamaan homogenisointia, stabilointia sekä lujitteita. Koerakenteet ovat toimineet paremmin tai vähintään yhtä hyvin kuin vertailurakenteet. Kuivatuskerrosten voidaan laskennallisesti osoittaa tasoittavan tien poikkisuuntaista kantavuutta merkittävästi.

Moreenin jalostukseen parhaiten soveltuvat menetelmät ovat murskaus, erottelu, kivien poisto, karkeampien aineiden sekoitus sekä stabilointi. Pohjamaana olevaa moreenia voidaan edullisesti jalostaa homogenisoimalla. Toistaiseksi moreenin jalostusyrietykset ovat olleet hajanaisia, eikä menetelmiä ole tuotteistettu tai ohjeistettu. Tämän tueksi tarvitaan laitteisto- ja menetelmäkehittämistä.

Kustannus-, toimivuus-, tuotanto- ja ympäristökuormituksia vertailtaessa moreenirakenteet osoittivat olevansa kautta linjan kustannustehokkaita, toimivia ja ympäristöystävällisempiä kuin tavanomaisesti käytetyt murskerakenteet. Toimivuudeltaan vähintään samanvertaisiksi arvioidut teräsverkon sisältävät rakenteet, joissa lievästi routivaa moreenia oli käytetty jakavassa kerroksessa, olivat noin 10 % edullisempia kuin vastaavat murskerakenteet.

Tutkimuksessa tuli esille useita heikkolaatuisten materiaalien hyötykäytön esteitä tai ongelmia, joihin hyötykäyttösuunnitelmat helposti kariutuvat. Nyt esiin nousivat erityisesti lupakäytännöt, niihin ja kaavoitukseen liittyvät valituskierrokset, riskien jakamisen periaatteiden puuttuminen, aikataulu- ja varastointilakusymykset, kilpailuttamisvaatimukset, ympäristöllisten ja taloudellisten kannustimien puute sekä se, että heikkolaatuisten materiaalien jalostamisen työtekniikoita, tuotteita tai menetelmiä ei ole tuotteistettu. Massatalouden kokonaisuuden hallintaan tarvittaisiin siis uusia ja riittävän ohjaavia tekijöitä. Ohjaavia tekijöitä voisivat olla mm. lähellä olevien maan-vastaanottoa paikkojen hintataso, erilaiset jäteveromaksut sekä tarjouspyynnöissä esitetyt vaatimukset massojen käsittelylle ja ympäristövaikutuksille.

Alkusanat

Tämä raportti on ”Heikkolaatuisten maarakennusmateriaalien hyötykäytön tehostaminen infrarakentamisessa (HUUMA)” -projektin loppuraportti. Tutkimuksesta julkaistaan tämän raportin lisäksi englanninkielinen tiivistelmäraportti (VTT Research Report VTT-R-08297-08).

Tutkimus käynnistyi syksyllä 2006 ja se päättyi 31.9.2008. Tutkimus oli osa Ympäristöministeriön rahoittamaa Uuma-kehitysohjelmaa. Tutkimuksessa tehtiin yhteistyötä myös muiden Uuma-ohjelman projektien kanssa. Tutkimuksen pilotkohteena oli Vuoreksen aluerakentamiskohde Tampereella. Vuores-projektin yhdyshenkilönä toimi Sakari Koivisto Tampereen kaupungilta ja kohteen suunnittelijoina Pentti Häkkinen ja Petri Tyynelä Ramboll Tampereelta. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin yhteistyötä myös Metso Mineralsin, Heikki Onnisen (Destia) sekä Ilkka Vertaisen (Megawatti Oy) kanssa.

VTT:llä vastuullisena johtajana toimi tutkimuspäällikkö Matti Kokkala 31.12.2006 asti, jonka jälkeen Eva Häkkä-Rönholm. Projektipäällikkönä toimi Markku Tuhola 31.12.2006 saakka ja siitä eteenpäin Leena Korkiala-Tanttu. Tutkijoina olivat Harri Kivikoski, Markku Juvankoski, Markku Kiviniemi, Paula Eskola sekä Rainer Laaksonen. Tutkimuksen valmisteluun osallistuvat lisäksi Pasi Vahanne ja Jouko Törnqvist.

Työn ohjausryhmä koostui sen rahoittajista. Ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Tuomo Kallionpää (Tiehallinto) sekä jäseninä Markus Alapassi (Ympäristöministeriö), Risto Laaksonen (Tampereen kaupunki), Arto Hovi (Ratahallintokeskus), Juhani Ilmonen (Skanska Infra), Valto Tikkanen (Hyvinkään Tieluiska Oy) sekä Veli-Matti Uotinen (Helsingin kaupunki). Muuna asiantuntijana ohjausryhmässä toimi Jouko Törnqvist VTT:ltä.

Työssä mukana olleet tahot edustivat laajasti eri tehtävissä toimivia henkilöitä. Tällä kokoonpanolla varmistettiin projektin teoreettinen osaaminen ja käytännön kokemus. Tutkimusryhmä haluaa kiittää rahoittajia, ohjausryhmän jäseniä sekä muita yhteistyökumppaneita hyvästä ja rakentavasta yhteistyöstä.

Espoo, syyskuu 2008

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	6
2 Kiviaineisten hyötykäyttömahdollisuudet	7
2.1 Infrarakentamisen materiaalien määrät ja luonnonesiintymät	7
2.2 Kiviainesten käyttö ja hyötykäyttö Euroopassa ja Suomessa	8
2.3 Kiviainesten käyttö Ruotsissa	10
3 Moreeni	11
3.1 Moreenien synty ja esiintyminen	11
3.2 Moreenimaalajien ominaisuudet	13
4 Jalostus- ja käsittelyprosessit ja niiden soveltuvuus	15
4.1 Yleistä	15
4.2 Moreenin jalostaminen	16
4.3 Päälysrakennekerrosten laatuvaatimukset.....	20
4.4 Raivatun puuston käsittely- ja jalostusmenetelmät	21
5 Koerakenteiden pitkäaikaiskäyttäytyminen	23
5.1 Koerakenteet.....	23
5.2 Vt 21 Peera	23
5.3 Mt 941 Männikkövaara.....	25
5.4 Mt 595 Kiuruvesi	28
5.5 Mt 5950 Salahmi	31
5.6 Viikin savikatu	35
5.7 Johtopäätökset koerakenteista	42
6 Moreenin laskennallinen käyttäytyminen tierakenteissa	42
6.1 Tarkastelujen taustaa.....	42
6.2 Tulosten arviointi.....	43
7 Vuoreksen pilot-kohde.....	44
7.1 Kohteen esittely ja tutkimuksen tavoitteet	44
7.2 Vuoreksen alueen massojen hallinta	45
7.3 Moreenin hyötykäyttömahdollisuuksia Vuoreksessa.....	47
7.4 Luonnonmateriaaleja vai murskattuja materiaaleja - vertailu Vuoreksen olosuhteissa	50
7.5 Hyötykäytön ongelmia Vuoreksessa	52
8 Tuotannolliset, taloudelliset, ympäristölliset ja toimivuusarviot vertailurakenteille	53
8.1 Yleistä	53
8.2 Tierakenne	53
8.3 Piha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteet	61
8.4 Kuljetuskustannukset	65
9 Moreenin hyötykäyttömahdollisuuksia ja ominaisuuksien arvottaminen	66

10 Moreenin tyyppirakenteet	69
11 Johtopäätökset	70
12 Jatkotutkimusehdotukset	72

LIITTEET

- LIITE 1. Viikin savikatu, pudotuspainolaitemittaukset
- LIITE 2. Moreenin vedenimuominaisuuksien ja vedenläpäisyyden määrittäminen
- LIITE 3. Jakavan kerroksen moreeni; laskennalliset tarkastelut
- LIITE 4. Analytical Hierarchy Process (AHP): periaatteet ja kysely
- LIITE 5. Moreenin jalostamiseen soveltuva kalusto
- LIITE 6. Vertailurakenteiden kustannusvertailu

1 Johdanto

Infrarakentamisessa käsitellään ylijäämämassoina merkittäviä määriä teknisesti heikkolaatuisia luonnonmateriaaleja, kuten routivia moreeneja ja silttejä. Näiden materiaalien hyötykäyttö on vaikeaa tai ainakin työlästä, minkä takia massat kuljetetaan valtaosin läjitysalueille. Heikkolaatuisten materiaalien tehokkaamman käytön rajoitteena on toistaiseksi ollut parempilaatuisten materiaalien suhteellisen helppo saatavuus sekä edullinen hinta. Tällä hetkellä alkaa paikoitellen olla puute hyvälaatuisista murske- ja luonnonmateriaaleista. Toisaalta myös heikkolaatuisten materiaalien läjitykseen soveltuvista kohteista, erityisesti pääkaupunkiseudulla, on kova pula.

Heikkolaatuisten materiaalien käyttöä rajoittaa myös se, ettei johdonmukaista ja pitkäjänteistä materiaalien ja niiden vaatimien suunnittelu- ja rakennusmenetelmien kehitystyötä ole tehty riittävästi. Tästä aiheutuu muun muassa seuraavia ongelmia:

- yleisesti hyväksytyt mitoitusmenetelmät puuttuvat ja materiaalien tekninen soveltuvuus käyttökohteisiin on ollut epävarmaa
- materiaalien laadunhallintaan ja laatuominaisuuksien selvittämiseen on kiinnitetty riittämättömästi huomiota
- materiaalien pitkäaikaiskäyttämisen ei kaikin osin ole riittävästi tietoa ja
- materiaaleja hyödyntävät rakennuskohteet ovat olleet luonteeltaan koerakentamista, jolloin työtekniikoita, tuotteita ja menetelmiä ei ole tuotteistettu.

Muita käyttöä rajoittavia tai ongelmallisia tekijöitä ovat olleet esimerkiksi:

- vastuukysymykset esimerkiksi rakenteiden käyttöaikana syntyvistä haitoista ja toimivuuden muuttumisesta
- elinkaarinäkökulma ei ole toistaiseksi ohjannut materiaalien valintaa
- materiaalien paikallisuus ja saatavuus aiheuttavat kapasiteettiongelmia
- yksittäiset, erilliset rakennushankkeet ovat pieniä, jolloin ei saada taloudellisia ratkaisuja
- ympäristöllisten ja taloudellisten kannustimien puute
- lievästi likaantuneiden materiaalien riskikommunikaation ongelmat ja materiaalien ympäristövaikutuksiin kohdistuvat epäluulot sekä
- ympäristölupakäytäntö on tai sen pelätään olevan hidasta, työlästä, riskialtista ja käsittelijästä riippuvaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää menetelmiä heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostamiseksi ja etsiä ratkaisuja hyötykäytön teknisten ja ympäristöllisten (ympäristövaikutukset ja -riskit) esteiden poistamiseksi. Heikkolaatuisten materiaalien teknisten ominaisuuksien ja käyttökelpoisuuden parantamiseksi arvioitiin sopivia jatkojalostus- ja käsittelymenetelmiä. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin aiemmissa tutkimushankkeissa heikkolaatuisista maamateriaaleista tehtyjen koerakenteiden toimivuutta. Tätä arvioita täydennettiin mitoituksellisilla menettelyillä. Arviossa on mukana INFRARYL 2006:ssä /Rakennustieto 2006/ esitettyjä sandwich-tyyppisiä vaihtoehtoja.

Tutkimuksen koekohteena oli Vuoreksen aluerakentamiskohde Tampereella, johon kehitettiin vaihtoehtoisia rakenteita paikallisista materiaaleista ja arvioitiin laskennallisesti (Meli-ohjelma) niiden käytöstä aiheutuvia ympäristövaikutuksia suhteessa tavanomaisiin materiaaleihin.

Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti moreenin hyötykäytön tarkasteluun. Tutkimukseen sisältyi myös projekti- ja ohjausryhmän arvio moreenin hyötykäyttöpotentiaalista. Kuivakuorisavien, pintamaan, silttien sekä stabiloitujen savimateriaalien jalostamista ja hyötykäyttöä käsiteltiin myös lyhyesti.

2 Kiviaineisten hyötykäyttömahdollisuudet

2.1 Infrarakentamisen materiaalien määrät ja luonnonesiintymät

Geologinen tutkimuslaitos ja Tielaitos inventoivat 1970-luvulla maamme sora- ja hiekkavarat. Kaikkiaan tutkittuja kohteita oli yli 21 000 ja niiden yhteispinta-ala noin 750 000 km². Hiekan ja soran yhteismääräksi saatiin 47,5 miljardia m³. Nykykäytöllä näiden varojen arvioidaan riittävän vähintään 200 vuodeksi, mutta aines ei jakaudu kovinkaan tasaisesti kautta maan. Salpausselissä valtakunnan eteläosassa on noin puolet kaikesta hiekasta ja sorasta, vaikka mainittujen muodostumien pinta-ala peittää vain kymmenesosan maasta /GTK 2008/.

Erilaisia kiviaineita käytetään Suomessa noin 90 miljoonaa tonnia vuodessa eli jokaista suomalaista kohti noin 18 tonnia. Aineksesta tierakentamiseen kuluu runsaat puolet, betonituotantoon kuluu kymmenesosa ja yhdyskuntarakentamiseen sekä asfalttipinnoitteisiin loput.

'Väylärakentamisen ympäristövaikutukset ja ekoindikaattorit' -hankkeessa arvioitiin karkeasti tien-, kadun- ja radanrakentamisen aiheuttama ympäristökuormitus Suomessa vuositasolla /Korkiala-Tanttu et al. 2006/. Arvion tarkoituksena oli selvittää eri osatekijöiden merkitsevyys väylärakentamisen aiheuttamasta ympäristökuormituksesta sekä toisaalta arvioida väylärakentamisen merkitsevyyttä Suomen tasolla aiheutuvasta ympäristökuormituksesta.

Arviointituloksen mukaan (taulukko 2.1) tienrakentaminen aiheuttaa vuosittain noin 40 miljoonan tonnin uusiutumattomien luonnon raaka-aineiden kulutuksen. Tienrakentaminen aiheuttaa lisäksi vuositasolla noin 6 300 terajoulen uusiutumattoman energiaressurin kulutuksen ja noin 0,5 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt. Vastaavasti kadunrakennus aiheuttaa noin 0,3 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt ja ratarakentaminen noin 0,1 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt vuosittain. Koko väylärakentaminen yhteensä aiheuttaa noin 52 miljoonan tonnin uusiutumattoman raaka-ainekulutuksen ja noin 0,8 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt. Infrarakentaminen aiheuttaa suuruusluokaltaan noin 1 %:n osuuden (0,6 - 1,1 %:n osuuden) Suomen uusiutumattoman energian kulutuksesta ja hiilen, rikin ja typen oksidien päästöistä. Osuus on huomattavasti pienempi kuin teollisuuden kokonaisuus, mutta on samaa suuruusluokkaa kuin joidenkin yksittäisten teollisuusalojen osuus.

Taulukko 2.1. Tien-, kadun- ja ratarakentamisen aiheuttama ympäristökuormitus sekä Suomen tasolla aiheutuva ympäristökuormitus /Korkiala-Tanttu et al. 2006/.

Kuormituslaji	Yksikkö	Tienrakentaminen	Kadunrakentaminen	Ratarakentaminen	Teiden, katujen ja ratojen rakentaminen yhteensä	Suomi/ osuus prosentteina
Uusiutumaton energia	TJ	6 300	4 100	978	11 400	1 130 000 /1 %
Uusiutumaton raaka-aine	milj. tonnia	40	6,7	5,1	52 *	92 */56 %
CO ₂	milj. tonnia	0,49	0,32	0,096	0,81	73 /1,1 %
SO ₂	tonnia	300	200	91	590	99 000 /0,6 %
NO _x	tonnia	710	290	277	1 300	219 000 /0,6 %
CH ₄	tonnia	33	7,0	86	126	236 000 /0,5 %
NMVOC	tonnia	31	15	9,9	56	145 000/0,04 %
PM10	tonnia	53	19	3 520	3 600	55 000 /6,5 %

* Luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska väylärakentamisen luvussa mukana ovat myös muut raaka-aineet kuin kallio- ja maa-aineet (kuten fossiiliset raaka-aineet), kun taas Suomen luvussa ovat mukana vain kallio- ja maa-aineet.

Väylien rakentamisen ympäristökuormitus muiden kuin uusiutumattomien luonnon raaka-aineiden kulutuksen osalta aiheutuu suurelta osin asfaltin valmistuksesta. Tien-, kadun- ja ratarakentamisen aiheuttama uusiutumattomien raaka-aineiden kulutus on hyvin merkittävä koko Suomen tasoon verrattuna. Väylärakentamisen arvioissa luvussa on mukana kaikki luonnon raaka-aineet esimerkiksi fossiiliset raaka-aineet mukaan lukien. Täten tulos ei ole täysin vertailukelpoinen Suomen tasolla esitettyyn lukuun, koska siinä on mukana vain maa- ja kallioainekset. Väylärakentaminen aiheuttaa noin puolet maa- ja kallioainesten kulutuksesta Suomesta.

2.2 Kiviainesten käyttö ja hyötykäyttö Euroopassa ja Suomessa

Kiviainesten käyttö Euroopan eri maissa on runsasta ja sen tuotantomäärät ovat noin 3 070 miljoonaa tonnia. Tähän määrään on laskettuna luonnonkiviainekset, kalliokiviainekset, kierrätetyt kiviainekset ja teollisuuden prosesseissa syntyneet kiviainekset. Määrätiedoissa on kuitenkin huomattavia maakohtaisia eroja ylijäämämateriaalien määrien ilmoittamisessa, sillä tilastointia ei tehdä kaikissa maissa samojen perusteiden mukaisesti /Rekola 2008/. Taulukossa 2.2 on esitetty tuotannon jakaantuminen eri osa-alueille eri maissa.

Kierrätettyjen materiaalien tuotanto taulukossa 2.2 kattaa rakennustyömailta ja purkutyömailta peräisin olevat materiaalit, joita voidaan käyttää rakentamisen kiviaineksina. Taulukossa 2.3 on esitetty kierrätettyjen kiviainesten osuus kokonaistuotannosta. Tehokkainta kierrätys on selkeästi Alankomailla, jossa jopa 42 % kiviaineksista kierrätetään. Lisäksi tilastosta nousevat esiin Iso-Britannia ja Belgia. Pohjoismaista korkeampiin tuloksiin pääsee taulukon mukaan ainoastaan

Ruotsi, jossa kierrätettyjen materiaalien osuus on 10 % kokonaistuotannosta. Alankomaiden ja Belgian osalta on kuitenkin huomattava, että tuotantomäärät kokonaisuudessaan ovat huomattavasti pienempiä kuin esimerkiksi Iso-Britannian tuotantomäärät. Myös Saksalla on kierrätettyjen kiviainesten määrä suuri, vaikka osuus kokonaistuotannosta ei nousekaan niin korkeaksi /Rekola 2008/.

Taulukko 2.2. Kiviainesten tuotanto Euroopassa 2005 /UEPG 2007/.

Country	Companies	Sites	Production (Million t)				
			Sand & Gravel (2)	Crushed Rocks (3)	Recycled Aggregates (4)	Artificial Aggregates (5)	Total
Austria	950	1 255	66	32	3,5	3	104,5
Belgium	183	267	13,9	38	12	1,2	65,1
Czech Republic	220	607	25,5	38	3,4	0,3	67,2
Denmark	350	400	58	0,3			58,3
Finland	400	3 600	53	45	0,5		98,5
France	1 770	2 680	170	223	10	7	410
Germany	1 890	3 180	263	174	46	30	513
Ireland	250	450	54	79	1	0	134
Italy	1 750	2 460	225	145	4,5	3	377,5
Netherlands	135	185	24	4	20,2		48,2
Norway	740	4 600	15	38	0,2		53,2
Poland	2 044	2 620	104,3	37,7	7,2	1,6	150,8
Portugal**	331	357	6,3	82			88,3
Slovakia	170	208	8,9	16,9	0,2	0,3	26,3
Spain	1 500	1 920	159	300	1,3	0	460,3
Sweden	150	1 840	23	49	7,9	0,2	80,1
Switzerland	329	500	46,5	5,3	5,3		57,1
United Kingdom	350	1 300	124	85	56	12	277
Total	13 512	28 429	1 439,40	1 392,20	179,2	58,6	3 069,40

* Data 2004	** Data 2003	Not available
-------------	--------------	---------------

Rekolan /2008/ kyselytutkimusten mukaan kaikki käyttökelpoinen ylijäämämateriaali pyritään hyödyntämään Suomessa. Ylijäämäkiviaineksista 89,2 % ohjataan hyötykäyttöön. Muilla materiaaleilla hyötykäyttö on vähäisempää. Ylijäämämateriaaleista vain 44,2 % ohjautuu hyötykäyttöön ja luonnonkiviteollisuuden sivukivistä vain 13,3 %. Hajonta erityisesti ylijäämämateriaalien hyödyntämistiedoissa oli suurta.

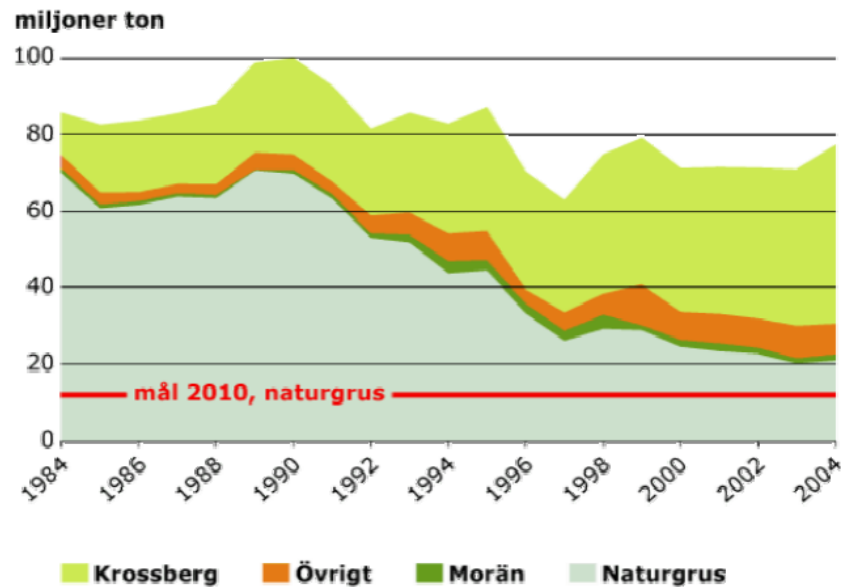
Taulukko 2.3. Kierrätettyjen kiviainesten osuus kokonaistuotannosta /UEPG 2007/.

Country	Recycled Aggregates (4)	Total	%
Austria	3,5	104,5	3 %
Belgium	12,0	65,1	18 %
Czech Republic	3,4	67,2	5 %
Denmark		58,3	0 %
Finland	0,5	98,5	1 %
France	10,0	410,0	2 %
Germany	46,0	513,0	9 %
Ireland	1,0	134,0	1 %
Italy	4,5	377,5	1 %
Netherlands	20,2	48,2	42 %
Norway	0,2	53,2	0 %
Poland	7,2	150,8	5 %
Portugal**		88,3	0 %
Slovakia	0,2	26,3	1 %
Spain	1,3	460,3	0 %
Sweden	7,9	80,1	10 %
Switzerland	5,3	57,1	9 %
United Kingdom	56,0	277,0	20 %
TOTAL	179,2	3 069,4	6 %

2.3 Kiviainesten käyttö Ruotsissa

Ruotsissa käytettävä kiviaines on pääosin kallion ja maaperän kiviaineksia. Teollisuuden sivutuotteiden lisäksi saadaan kiviaineksia kaivosteollisuuden, luonnonkiviteollisuuden ja ylijäämämaa- ja kiviainesten muodossa. Kiviainesten tuotanto on kasvanut hieman, ja vuonna 2004 se oli yhteensä noin 77,4 miljoonaa tonnia. Tästä noin 27 prosenttia, eli yhteensä noin 21,0 miljoonaa tonnia koostui harjukiviaineksista. Niiden osuus on kuitenkin vähenemässä. Harjukiviainesten osuutta pyritään vähentämään siten, että vuoteen 2010 mennessä olisi sen osuus kokonaistuotannosta enää korkeintaan 12 miljoonaa tonnia. /SGU 2007a/. Nämä tuotantomäärät sisältävät myös muun kuin infrarakentamisen.

Pääosa kiviaineksesta - noin 60 prosenttia - koostui kalliomurskeesta. Kalliomurskeen tuotanto oli vuonna 2004 määrältään 47 miljoonaa tonnia. Kalliokiviaineksen käyttö on kasvanut vahvasti viime vuosien aikana, koska harjukiviaineksin käyttöä on osittain pyritty korvaamaan kalliokiviaineksilla. Muiden kiviainesten tuotanto kattoi noin 10 prosenttia, eli vain noin 8 miljoonaa tonnia. Luonnonkiviaineksia on pyritty korvaamaan mm. teollisuuden sivutuotteilla. Hankalia kohteita ovat kuitenkin Suomen tapaan rakennuskohteet, joissa harjukiviaineksia ei pystytä korvaamaan muilla materiaaleilla. Tällaisia ovat mm. valimohiekat, betoni tuotanto ja veden suodattaminen. Tavoitteena kuitenkin on, että uusiomateriaalien osuus, mihin nämä ”muut kiviainekset” voidaan lukea, kasvaisi vuoteen 2010 mennessä 15 prosenttiin kiviaineksen kokonaistuotannosta. /SGU2007a/. On mielenkiintoista huomata, että Ruotsissa käytetään jonkin verran myös moreenia (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Kiviainestuotanto Ruotsissa /SGU 2007b/.

3 Moreeni

3.1 Moreenien synty ja esiintyminen

Moreeniksi nimitetään jäätikön murskaamaa ja kuljettamaa lajittumatonta maainesta, joka raekooltaan vaihtelee savesta suuriin lohkaraisiin. Se on useimmiten kerrostunut suoraan kalliolle myötäillen ohuena kerroksena kallioperän pinnan muotoja. Moreenikerrostuminen paksuus vaihtelee alueellisesti siten, että Etelä-Suomen kerrostumat ovat paksumpia. Tavallisesti moreenin paksuus on suurimmillaan alavissa kallioperän painanteissa ja mäkien suojapuolella jäätikön liikkumissuuntaan nähden /Kauranne 1972/.

Moreeni on Suomen yleisin maalaji ja sen osuus maapinta-alasta on noin 48 % /TIEL 1995/Moreeni nimenä viittaa sen geologiseen taustaan. Uudet EU standardit /SFS-EN ISO 2008/ perustuvat materiaalien rakeisuuksiin, joten ne eivät tunne moreeninimitystä. Standardi on tässä vaiheessa käännetty suomeksi, mutta varsinaista kansallista sovellutusta ei toistaiseksi ole esitetty. Standardin mukaan moreenin tilalle ovat tulossa erilaiset yhdistelmänimet (esim. siltinen, sorainen hiekka). Moreeninimeä voidaan jatkossakin käyttää, kun halutaan painottaa materiaalin syntyperää.

Moreenin aineksesta osa kulkeutui jäätikön pohjaosissa ja osa kohosi jään sisäisten virtausten vaikutuksesta jäätikön sisä- ja pintakerroksiin. Kasautumistapansa mukaan erotetaan jäätikön pohjalla kulkeutunut ja jään alle kasautunut pohjamoreeni ja jäätikön sulaessa sen pinnalle paljastunut ja sieltä eri tavoin kasautunut pintamoreeni. Syntytapansa vuoksi pohjamoreeni on tiivistä ja usein hyvin hienoainespitoista. Pintamoreeni on sulamisvesien huuhtovan vaikutuksen seurauksena usein löyhää ja hiekkaista. Raekoostumukseltaan pohjamoreeni on yleisimmin siltistä hiekkamoreenia. Pohjamoreenikerros on ohuimmillaan Etelä- ja Lounais-Suomen rannikkoalueilla.

Pohjamoreenin pintaosa (usein alle 1 m paksuudelta) on usein kivinen ja vähemmän hienoainesta sisältävä kuin syvemmät osat /TIEL 1995/. Pohjamoreenin

päällä esiintyy ohuena kerroksena pintamoreenia, joka syntytapansa vuoksi on löyhempään kerrostunutta. Muita moreenimuodostumia ovat mm. reunamoreenit, jotka ovat vallimaisia, jäätikön reunan suuntaisia seläniteitä. Drumliinit ovat syntyneet joko jäätikön aktiivisen etenemisen aikana tai jäätikön vetäytymisvaiheessa. Drumliinit ovat jäätikön liikkeen suuntaisia seläniteitä ja ne muodostavat usein laajoja, virtaviivaisista seläniteistä koostuvia kenttiä. Tällöin suurin osa drumliineista koostuu pelkästään maa-aineksesta. Yksittäiset seläniteet sisältävät yleensä kalliosydämen tai ovat muodostuneet kalliokohouman taakse jään virtausuuntaan nähden. Drumliinien materiaali on tavallisesti tiivistä hiekkamoreenia ja/tai siltistä hiekkamoreenia, jossa kivisyys on vähäinen. Lajittunutta ainesta tavataan lähinnä drumliinien "häntäosassa". Drumliinit ovat yleensä 0,1 - 7 km pitkiä ja 0,05 - 4 km leveitä. Niiden korkeus voi olla kymmeniä metrejä. Drumliineja esiintyy etenkin Savossa ja Kainuussa /TIEL 1995/. Materiaaliltaan reunamoreenit ja osa drumliineista on vaihtelevia ja sisältävät moreenin ohella myös lajituneita aineksia /Kauranne 1972/.

Reunamoreenit ovat sulavan jäätikön reunaosaan syntyneitä jään liikesuuntaa vastaan poikittaisia moreenimuodostumia. Suomen reunamoreenit ovat pääasiassa päätemoreeneita. Suuria reunamoreeneita esiintyy suurten reunamuodostumien, kuten Salpausselkien yhteydessä. Pienehköjä reunamoreeneja (De Geer-moreeneita) on runsaasti Uudellamaalla ja Vaasan saaristossa. Päätemoreenien aines on pääasiassa moreenia, mutta niissä voi esiintyä myös lajituneita aineksia. Kumpumoreeni/ablaatiomoreenimuodostumia on syntynyt jäätikön reunavyöhykkeessä jään liikkeen pysähtyessä ja jään sulaessa paikoilleen. Näin tapahtuu, kun runsaasti mineraaliainesta sisältävän jäätikön reuna päättyy laaksoalueilla kuivalle maalle tai melko matalaan veteen. Tällöin epätasaisen sulamisen ja sulavesien vaikutuksesta syntyy vaihtelevan muotoisia kumpareita ja seläniteitä ilman yhtenäistä suuntausta. Pintakerrosten moreeniaines on kumpumoreenimaastossa useimmiten löyhempää, kivisempää ja lohkareisempää kuin pohjamoreeni. Rae-koostumukseltaan moreeni vaihtelee ja sisältää usein sora- ja hiekkakerroksia. Kumpumoreenimuodostumat voivat olla hyvin laaja-alaisia ja niihin liittyy myös muita moreenimuodostumia. Yleisesti kumpumoreeneita esiintyy myös harjujaksojen yhteydessä. Kumpumoreenit esiintyvät yleensä korkeimman rannan yläpuolisella supra-akvaattisella alueella. /TIEL 1995/

Erot moreenimaalajien välillä ovat riippuvaisia ensisijaisesti moreenimuodostumista ja niiden rakenteesta. Moreenin raekoon ja sekä kivi- ja lohkarepitoisuuteen vaikuttaa lisäksi huomattavasti alustan kallioperän kivilajikoostumus. Tämän johdosta karkearakeisia ja kivipitoisia moreeneja esiintyy mm. Kaakkois-Suomessa, Uudenkaupungin-Rauman alueella, Vaasan ympäristössä ja monin paikoin sisämaassa. Hienorakeisempia ja kivettömämpiä moreeneja tavataan Itä-Suomen liuskejaksojen alueilla /Kauranne 1972/.

Pohjamoreenin paksuus on yleensä pienimmillään Etelä- ja Lounais-Suomen rannikkoalueilla. Moreenikerros saattaa olla rannikolla monin paikoin vain 0,5 - 1 m paksuinen. Keskimääräisen pohjamoreenin paksuutena voidaan Etelä-Suomessa pitää 2 - 3 metriä. Sisä-Suomessa moreenin keskimääräinen paksuus on paria metriä suurempi kuin Etelä-Suomessa. Paksummat moreenikerrostumat tavataan yleensä Pohjois-Suomessa, yksittäisten paikallisten kerrospaksuuksien ollessa kymmeniä metrejä. Pintamoreenin osuus tästä on vain 1 - 2 m /Kauranne 1972/.

Etelä- ja Keski-Suomessa moreenikerrokset ovat rakeisuudeltaan melko tasalaa-tuisia. Epähomogeenisuuksia aiheuttavat lähinnä välikerroksin tavattavat lajittu-neet hiekkavaltaiset kerrokset. Pohjois-Suomessa sen sijaan saattaa moreenissa esiintyä useankin metrin paksuisia hiekka- ja sorakerroksia ja kahden eri-ikäisen moreenipatjan välissä turve- ja hiekkakerroksia /Kauranne 1972/.

3.2 Moreenimaalajien ominaisuudet

Geoteknisen maalajiluokituksen (GEO-luokitus) mukaisesti moreenit jaetaan sora-, hiekka- ja silttimoreeneihin. Soramoreenin (keskimääräinen raekoko $d_{50} > 2$ mm) hienoainepitoisuus ($\leq 0,06$ mm) on ≥ 5 % ja sorapitoisuus > 50 %, hiekkamoreenin ($d_{50} > 0,06 - 2$ mm) hienoainepitoisuus 5 - 50 % ja sorapitoisuus samoin 5 - 50 % ja silttimoreenin ($d_{50} \leq 0,06$ mm) hienoainepitoisuus ≥ 50 % ja sorapitoisuus ≥ 50 %. Lajitepitoisuuden perusteella moreenimaalajit voivat saada lisämääreet sorainen, hiekkainen tai silttinen, jos määreen mukaisen lajitteen määrä on ≥ 30 % /Korhonen & Gardemeister 1975/.

Moreeniaineksen lohkareisuus ja kivisyys riippuu alueen kallioperästä. Myös savilajitteen ja hienoainespitoisuuden määrä riippuvat kallioperästä. Moreenin sisältämä savilajitteen määrä on Suomessa yleensä 0 - 5 %. Myös moreenin ainek-sen mineraalikoostumus edustaa yleensä välittömän lähialueen kallioperää. Rakeet ovat syntyvasta johtuen tavallisesti särmikkäitä tai terävsärmäisiä /Kauranne 1972/.

Raeominaisuuksien ohella moreenien geotekniset ominaisuudet ovat suuresti riip-puvaisia tiivyydestä. Eräitä moreenien geoteknisiä ominaisuuksia on esitetty tau-lukoissa 3.1 ja 3.2. Moreenien kokoonpuristuvuus on yleensä samaa luokkaa kuin keskimääräistä raekokoa vastaavalla karkearakeisella maalla.

Etenkin hienoainesta sisältävät moreenit ovat herkkiä häiriintymään jo kaivetta-essa tai kuljetuksen tai läjityksen aikana. Häiriintymisherkkyys riippuu kuitenkin suuresti vesipitoisuudesta. Häiriintymistä alkaa esiintyä vesipitoisuuden noustessa lähelle juoksurajaa. Tyypillisessä hiekkamoreenissa tämä vesipitoisuus on noin 11 - 13 % /Kauranne 1972/. Moreenien vedenläpäisevyyttä on tarkasteltu lähemmin luvussa 5 ja liitteissä 2 ja 3.

Taulukko 3.1. Moreenien geoteknisiä ominaisuuksia rakennusteknisen luokituksen (RT) mukaan /Kauranne 1972/. Taulukkoon on lisätty Geoluokitus.

Geoluokitus	RT-luo-kitus	Huokoisuus, %	Tilavuus-paino t/m ³	Luonnontil. vesipit. %	Kitkakulma, °	
					Löyhä (1.5 - 7 t/m ³)	Tiivis (2.1 - 2.3 t/m ³)
SrMr	SrMr			5...15	31	43
	HkMr	29...47	1.8...2.2		29	41
HkMr	HtMr	23...41	1.9...2.2	15...25	27	39
	HsMr	38...52	1.8...2.1		25	37

Taulukko 3.2. Eräitä moreenien geoteknisiä ominaisuuksia /Tielaitos 1993/.

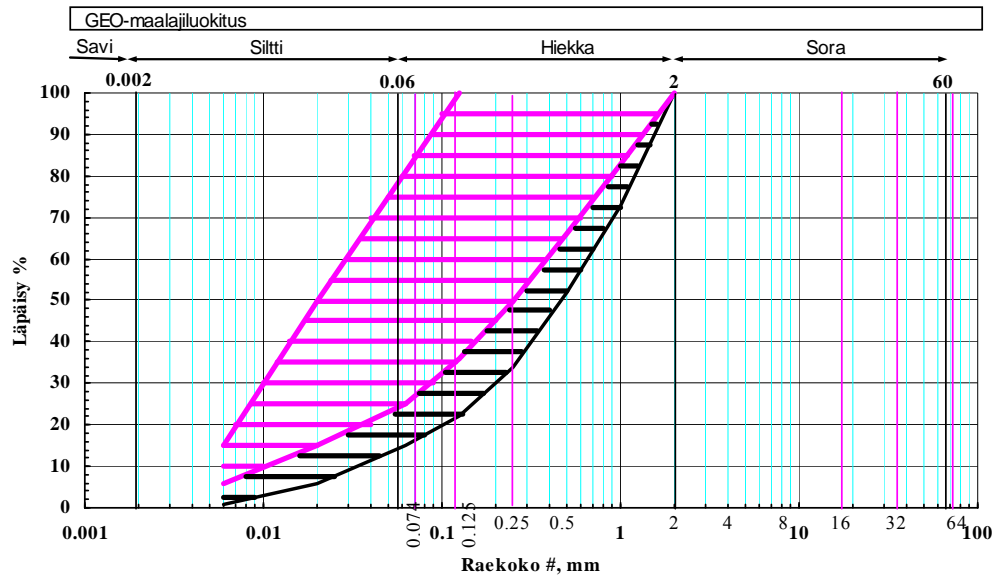
GEO-luokituksen mukainen nimi	SiMr	HkMr	SrMr
Huokoisuus, n , %	23 - 41	29 - 47	
Huokosluku, e , -	0,3 - 0,7	0,4 - 0,9	
Kiintotiheys, ρ_s , kN/m^3	2,69 - 2,70	2,69 - 2,70	2,69 - 2,70
Tilavuuspaino, ρ , kN/m^3	19 - 22	18 - 22	20 - 22
Vedenläpäisevyys, k , $\text{m/s}^{1)}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-2} - 0^{-4}$
Luonnontilainen vesipitoisuus, w , %	5 - 25	5 - 15	5 - 15
Proctortiiveys, $\gamma_{d \max}$, kN/m^3	20 - 23	20 - 23	20 - 23
Optimivesipitoisuus, w_{opt} , %	8 - 12	5 - 10	5 - 8
Koheesio, c , kPa	2 - 29	2 - 29	0
Kitkakulma, φ , $^{\circ 2)}$	32 ± 6	35 ± 6	37 ± 6
Kapillaarinen nousukorkeus, h_c , $\text{m}^{3)}$	> 1	(> 1) $0,5 - 2$	(> 1) $0,5 - 2$

¹⁾ Vedenläpäisevyys vaihtelee riippuen moreenien tiivyydestä ja hienoainespitoisuudesta.
²⁾ Tiivyyden vaikutus: hyvin tiivis $+6^{\circ}$, tiivis $+3^{\circ}$, keskitiivis $+0^{\circ}$, löyhä -3° , hyvin löyhä -6°
³⁾ Löyhässä, epähomogeenisessa moreenissa 0,5 - 2 m; tiiviissä hienorakeisessa moreenissa kapillaarinen nousukorkeus voi olla useita metrejä.

Moreeni routii aina routimiselle suotuisissa olosuhteissa, kun se sisältää yli 35 % hienoainesta (0,074/64) /Tielaitos 1993/. Tavanomaiseen rakeisuuskäyrään perustuvaa routivuuden arviointia voidaan moreenien osalta tarkentaa käyttämällä Beskowin nimenomaan moreeneille laatimaa, rakeisuuteen ja kapillaariseen nousukorkeuteen perustuvaa luokitusta. Kuvassa 3.1 on esitetty Beskowin mallin mukaan /Tielaitos 1993/ laaditut rakeisuusohjealueet. Luokitus perustuu alle 2 mm:ä pienemmästä aineksesta määritettyihin 0,062 mm ja 0,125 mm rakeiden määrään (paino-%) /Committee on Frost Actions in Soils 1976/. Moreenimateriaali on

- routimatonta, kun # 0,062 < 15 %, # 0,125 < 22 % ja $h_c = 1$ m,
- routivaa tietyissä olosuhteissa, kuten korkean pohjavedenpinnan ja hitaan roustaantumisen vallitessa, kun # 0,062 on 15 - 25 %, # 0,125 22 - 36 % ja $h_c = 1 - 1,75$ m ja
- normaalisti routivaa pohjavedenpinnan syvyydellä 1,5 m, kun # 0,062 > 25 %, # 0,125 > 36 % ja $h_c = 2 - n. 20$ m

Hiekkamoreenien vesipitoisuus vaikeuttaa tiivistämistä, jos hienoainesta (0,074) on paljon (yli 35 %) Yli 20 % hienoainesta sisältävät moreenit häiriintyvät helposti, kun vesipitoisuus nousee yli 1 - 2 %-yksikköä yli optimivesipitoisuuden /Tielaitos 1993/.



Kuva 3.1. Beskowin routivuuskriteeri moreeneille /Tielaitos 1993/.

4 Jalostus- ja käsittelyprosessit ja niiden soveltuvuus

4.1 Yleistä

Kiviainesten jalostus- ja käsittelymenetelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: mekaaniset, kemialliset ja nämä yhdistävät menetelmät. Mekaaniset menetelmät pyrkivät parantamaan materiaalien ominaisuuksia muuttamalla niiden rakeisuutta seulomalla, kuivaamalla, murskaamalla, karkean kiviaineksen lisäyksellä tai hienoaineksen poistamisella pesemällä. Kemiallisilla eli erilaisilla stabilointimenetelmillä pyritään kasvattamaan materiaalien lujuutta ja jäykkyyttä sekä vähentämällä olosuhdeherkkyyttä (kosteus, routa). Käytettävät sideaineet voivat olla hydraulisia tai bitumisia. Ne voivat olla myös erilaisia materiaalien käsittelyaineita. Edelliset yhdistävä käsittelymenetelmä on pelletointi, jota tutkittiin erityisesti 1990 -luvun puolivälissä. Erilaisia suositeltavia käsittelymenetelmiä eri materiaaleille on esitetty taulukossa 4.1. Taulukko perustuu VTT:n asiantuntijoiden arvioon.

Taulukko 4.1. Eri materiaalien käsittely- ja jalostusmenetelmiä.

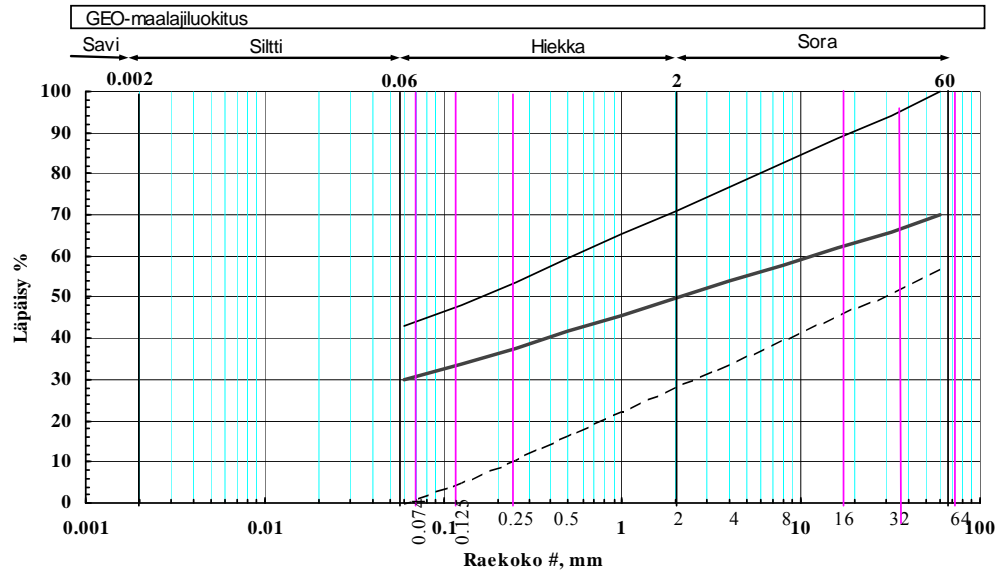
Materiaali	Ominaisuus, johon yritetään vaikuttaa	Menetelmät
vesipitoiset ylijäämämaat	huono tiivistyminen, olosuhdeherkkyys, routivuus, painumat	kuivatusmenetelmät, stabilointi
hienorakeiset ja eloperäiset ylijäämämaat	huono tiivistyminen, olosuhdeherkkyys, routivuus, painumat	stabiloinnit
moreenit*	olosuhdeherkkyys, routivuus, painumat	murskaus, seulonta, sekoitus, käsittelyaineet, pelletointi
teollisuuden sivutuotteet	laadun vaihtelu (ajallisesti, paikallisesti, tuotantolaitoskohtaisesti)	homogenisointi, lajittelu, reseptointi seostaminen, stabilointi, lisäaineet, murskaus, seulonta, kuivatus
vanhat maarakenne-materiaalit		käyttö sellaisenaan jalostaminen alkuperäisellä paikalla materiaalin siirtäminen ja jalostaminen muualla mekaaninen käsittely + stabilointi
pilaantuneet maat	päästöjen ehkäisy	haitta-aineiden poisto pesulla (märkäerotus), huokoskaasukäsittelyllä, biologisella tai termisellä käsittelyllä seulonta, murskaus stabilointi ja kiinteytys (sitovat haitta-aineet ja parantaa materiaalin ominaisuuksia)

* moreenin jalostamista on käsitelty seikkaperäisemmin myöhemmin.

4.2 Moreenin jalostaminen

Tienrakennusta silmälläpitäen moreenin ominaisuuksia voidaan selvästi parantaa vähentämällä hienoainespitoisuutta mekaanisesti tai kemiallisesti (stabilointi). Hienoainespitoisuutta vähentämällä voidaan routivasta moreenista tehdä routimatonta ja samalla lisätä moreenin kantavuutta ja sen pysyvyyttä märkänä. Mekaanisessa jalostuksessa pyritään saamaan moreenille haluttu raekokojakautuma.

Moreenin jalostuksessa **erottelu** voidaan toteuttaa välppäyksellä, seulonnalla tai pesulla. Erottelulla käsiteltävästä kiviaineksesta poistetaan joko liian suuret kivet tai ylimääräinen hienoaines. Erotettaessa karkein kiviaine pois, lisätään hienoaineksen määrää ja vastaavasti eroteltaessa hienoaines pois lisätään karkean aineksen määrää. Usein eri erotusmenetelmiä yhdistetään toisiinsa halutun lopputuloksen saavuttamiseksi /Tielaitos 1993/. Kuvassa 4.1 ja taulukossa 4.2 on esitetty esimerkkinä erottelun vaikutus kiviaineksen rakeisuuteen kun alkuperäisestä materiaalista poistetaan ensimmäisessä tapauksessa kivet ja toisessa tapauksessa hienoaines. Molempien fraktioiden osuus on alun perin 30 %.



Kuva 4.1. Hienoaineksen (katkoviiva) ja kivien (ohut viiva) poistamisen vaikutus materiaalin (lihava viiva) rakeisuuteen /Tielaitos 1993/.

Materiaalien **sekoituksella** voidaan muuttaa moreenin raejakautumaa. Sekoituksen lähtökohtana on, että sekoituksessa saatavan materiaalin ominaisuudet ovat paremmat kuin kummankaan lähtömateriaalin. Yleensä kahden ainesosan sekoittaminen on riittävä. Käytettäviä sekoitusyhdistelmiä ovat mm. moreeni ja sora, moreenimurske ja soramurske, moreenimurske ja kalliomurske. Jos käytettävissä on sopivia materiaaleja, on sekoitus taloudellinen tapa muuttaa materiaalin rakeisuutta /Tielaitos 1993/. Kuvassa 4.2 on esitetty rakeisuudeltaan 0 - 32 mm olevan kalliomurskeen ja rakeisuudeltaan vastaavan moreenimurskeen sekoituksessa saavat rakeisuudet, kun moreenimurskeen osuutta lisätään 10 % portaisa.

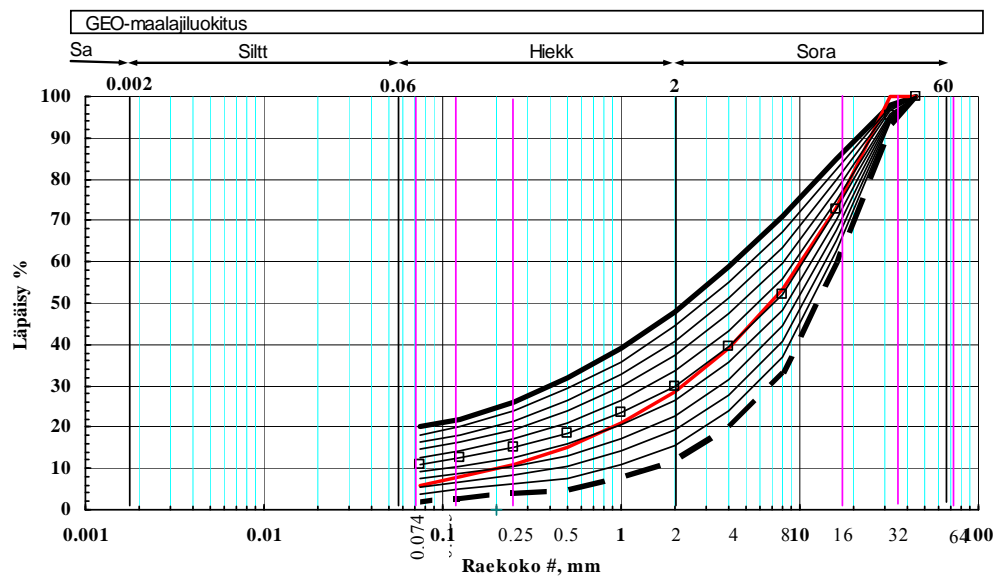
Taulukko 4.2. Kivien poistamisen tai hienoaineksen poistamisen vaikutus rakeisuuskäyrään.

Raekoko	Lähtömateriaali	Poistetaan kivet	Poistetaan hienoaines
		Uusi hieno	Uusi karkea
mm	%	%	%
60	70	100	57
32	66	94	51
16	62	88	45
8	58	83	40
4	54	77	34
2	50	71	28
1	48	65	22
0.5	42	60	17
0.25	38	54	11
0.125	34	48	5
0.063	30	43	0

Sekoitus voidaan tehdä paikan päällä sekoittamalla joko erilaisilla sekoituslaitteilla (vrt. stabiloinnin sekoituskoneet, joissa pyörivät terät sekoittavat). Yksinkertaisimmillaan sekoitus voidaan tehdä kaivinkoneen kauhalla, mutta tällöin

sekoitustyön laatu saattaa vaihdella merkittävästi. Sekoitus voidaan tehdä aumasekoituksena, jolloin materiaalit levitetään kerroksittain ja sekoitetaan paikalla. Parhaimman tuloksen saa, kun sekoitus yhdistetään esimerkiksi seulontaan vuorotellen materiaaleja. Tämä voi heikentää jonkin verran seulonnan tuottavuutta, koska läpimenevän materiaalien osuus kasvaa. Tällöin materiaalit on kuitenkin kuljetettava jonnekin käsittelyalueelle.

Muokattua moreenia voidaan käyttää jakavassa tai eristyskerroksessa sekä soratien kulutuskerroksessa. Jos moreenimursketta käytetään kantavassa kerroksessa, tulee kerroksen kuivana pysyminen kaikissa olosuhteissa varmistaa rakenteellisesti /Tielaitos 1993/.



Kuva 4.2. Moreenimurskeen (yhtenäinen viiva) ja kalliomurskeen (katkoviiva) seokset (ohuet viivat). Neliöllä merkityn materiaalin rakeisuus edustaa 1:1 seosta. Punaisella viivalla on esitetty Fullerin käyrän mukainen tiivein pakkaus.

Hyvissä olosuhteissa moreenin **murskaus** onnistuu kaikenlaisilla murskaamoilla. Moreenin korkea hienoainespitoisuus ja moreeniesiintymän liian suuri kosteuspiitoisuus tuottavat vaikeuksia kaikille murskaamotyypeille ja alentavat tehoa ja nostavat lopputuotteen hintaa. Kokemusten mukaan murskaus vaikeutuu, jos kosteuspiitoisuus nousee yli 6 %:n. Murskauksen työsaavutusta voidaan lisätä liittämällä prosessiin seulonta ja/tai välppäys ja seulomalla hienoaines aina 50 mm:n raekokoon asti syötteestä ennen murskausta. Tällä tavoin lisätään etumurskaajan kapasiteettia, estetään murskaimen tukkiutumista ja vähennetään murskaimen leukojen kulumista /Suni & Salmenkaita 1996/.

Hienoaineksen erottelun onnistumisen kannalta keskeisiä tekijöitä ovat seulat. Kokemus on osoittanut, että pitkäaukkoinen ja ohutlankainen seulaverkko on hyvä. Seulapinnan tulee olla tavanomaista suurempi. Ruotsalaiset ovat saavuttaneet lupaavia tuloksia käyttämällä 45 asteen kulmassa olevaa tankoseulaa syöttimen väljän alla. Suomalaisten kokemusten mukaan (Lemminkäinen Oy) mukaan tankoseula erottaa syötteestä myös karkeampia, 4 - 20 mm:n rakeita, joita tarvitaan itse lopputuotteessa. Jos tankoseula on kovin tiheä, se kokemusten mukaan helposti tukkeutuu /Suni & Salmenkaita 1996/.

Ruotsalaisten v. 1986 raportoimien kokemusten pohjalta on Keski-Pohjanmaan piirissä vuonna 1987 rakennettu ja kokeiltu ns. välppälajittelijaa. Välppälajittelija on suunniteltu ja rakennettu siten, että halkaisijaltaan 12 mm:n pyöröteräkset asennettiin ensimmäisessä koelajittelijassa k/k 30 mm ja toisessa 40 mm välein suorakaiteen muotoiseksi tankoseulaksi. Seulan pituus oli 1,85 m ja leveys 1,25 m. Lajittelija asennettiin etumurskaimen verkkolajittelijan paikalle noin 40 asteen kulmassa siten, että materiaalin kulkusuunta välpällä oli poikittainen tankoihin nähden. Tämä vastaisi ruotsalaisten käyttämään tankoseulan kulkusuuntaa. Murskauskokeilu oli yksivaihemurskausta. Raportin mukaan lajittelija toimi jatkuvaa täryä käyttäen suunnitellulla tavalla. Murskattavan moreenin hienoainespitoisuus 0,074 mm:n seulalla oli ensimmäisessä murskauskokeessa 18,3 % ja toisessa 27,5 %. Korkeasta hienoainespitoisuudesta huolimatta ensimmäisessä koemurskauksessa saatiin kelvollista jakavan mursketta, jonka hienoainespitoisuus oli vain 6,2 %. Toisessakin koemurskauksessa moreenin korkeasta hienoainesmäärästä huolimatta saatiin jakavan mursketta, jonka hienoainespitoisuus oli 8,4 %. Tulosta voidaan pitää hienoaineksen erottelun onnistumisen kannalta hyvänä ja laitetta toimivana. Kapasiteetit jäivät näissä kokeissa kuitenkin alhaiseksi parhaimmillaan noin 160 tn/h. Alhaisen tehon syyksi mainitaan lähtömateriaalin korkea kosteuspitoisuus. Kokeessa se oli > 10 % ja se aiheutti materiaalin puuroutumista syöttösuppilossa. Kokemusten mukaan kosteuspitoisuuden tulisi olla < 6 %, jotta erottelu onnistuisi /Suni & Salmenkaita 1996/.

Vastaavan kaltaista lajittelijaa tiedetään Lemminkäinen Oy:n kokeilleen. Kuitenkaan lajittelija ei ole levinnyt yleiseen käyttöön. Hienoaineksen erottelu aiheuttaa siis murskausprosessissa niin merkittävää tehon laskua, että se nostaa murskeen hintaa merkittävästi /Suni & Salmenkaita 1996/.

Moreenin murskauksen onnistumiseen ja taloudellisuuteen vaikuttavat kokemusten mukaan paitsi

- **hienoaineksen määrä** myös
- **kosteuspitoisuus** ja
- **vuodenaika**, jolloin murskaus suoritetaan.

Kokemuksen mukaan moreeniesiintymän kosteuspitoisuuden ylittäessä 6 % kasvaa seulojen ja siilojen tukkeutumisvaara. Talvimurskauksessa työsaavutusta pienentää pakkasen aiheuttama materiaalin jäätyminen syöttösiilon seinämiin ja holvaantumisen ajoittain aiheutuvat häiriöt. Parhaimmaksi murskausajankohdaksi on mainitussa viitteessä todettu kesä-elokuu /Suni & Salmenkaita 1996/.

Moreenin murskaus on todettu tavanomaisesti noin 10 % kalliimmaksi kuin normaali murskaus. Ruotsalaiset ovat omissa kokeiluissaan todenneet, että moreenin murskaus on ollut taloudellisesti kannattavaa, kun kuljetusmatkaero sora- tai kalliimurskeeseen nähden on ollut > 5 km. Sidotun kantavan materiaaliksi moreenin erottelutarve on olennaisesti vähäisempi kuin sitomattomaan kerrokseen tarkoitettun murskeen /Suni & Salmenkaita 1996/.

Stabiloinnilla saadaan aikaan maa-aineksen karkeutumista ja rakeiden osittaista kiinnittymistä. Stabiloinnin avulla maa-aineksen kantavuus paranee ja routivuus vähenee. Stabilointiaineena voidaan käyttää sementtiä, bitumia, kalkkia ja masuunihiekkaa. Sementtiä ja bitumia käytetään karkeahkon, vain jonkin verran hienoainesta sisältävän maa-aineksen stabilointiin. Kalkkistabilointia soveltuu taas parhaiten hienon, silttisen maa-aineksen stabilointiin. Pienillä sideainepitoi-

suuksilla (1 - 3 %) voidaan parantaa moreenin stabiilisuutta ja pienentää routivuutta. Kantavuutta lisättäessä tulee käyttää suurempia sideainepitoisuuksia kuin edellä. Käytännössä lujittamiseen tarvittava sideainemäärä vaihtelee sementtistabiloinnissa 4 - 7 %, kalkkistabiloinnissa 4 - 12 % ja bitumistabiloinnissa 3 - 5 %.

Stabiloinnin avulla saatua materiaalia voidaan käyttää tien kaikissa rakennekerroksissa, paitsi ei pysyvänä kulutuskerroksena. Sementti- ja bitumistabiloidut moreenit soveltuvat hyvin jakavaksi ja kantavaksi kerrokseksi vähäliikenteisillä teillä. Alusrakenteeksi kalkkistabiloitu kerros soveltuu hyvin myös vilkasliikenteisillä teillä /Tielaitos 1993/.

Pelleteinnissa on kysymys kemiallisista menetelmistä liian hienoainesrikkaan moreenin karkeuttamiseksi siten, että se kelpaa tien sitomattomaan jakavaan tai kantavaan kerrokseen. Pelletointia on tutkittu erilaisin laboratoriotutkimuksin, mutta menetelmä ei ole yleistynyt korkean hinnan vuoksi. Menetelmästä löytyy lisää tietoa Tielaitoksen selvityksessä /Suni 1998/.

4.3 Päälysrakennekerrosten laatuvaatimukset

Luonnon moreenit eivät yleensä ilman lajittelua tai murskausta ole sellaisenaan sitomattomiin päälysrakennekerrokseen kelpoisia, vaan ne täytyy joko mekaanisin tai kemiallisin keinoin jalostaa rakeisuudeltaan vaatimukset täyttäväksi /Suni & Salmenkaita 1996/.

Moreenien käyttökelpoisuus sitomattomiin päälysrakenteisiin määräytyy sen routivuusominaisuuksien perusteella. Routivuus määritetään tielaitoksen ohjeiden mukaan yleensä rakeisuuteen perustuen. Mitä enemmän maaperässä on hienoainesta, sitä suurempi on sen kapillaarisuus ja sitä syvemältä sijaitsevasta pohjavedestä vettä voi imeytyä jäätyvään kerrokseen. Vettä voi päästä rakennekerrokseen myös tieluiskien ja päälysrakenteiden läpi. Routivuutta arvioidaan ohjeiden mukaan pääsääntöisesti materiaalin rakeisuuskäyrään perustuen. Rajatapauksissa maa-aineksen routivuutta arvioidaan veden kapillaarisen nousukorkeuden perusteella. Maalajia pidetään routimattomana, jos sen routivuus on alle 1 metri.

Päälysrakenteisiin kelpaavan materiaalin tulee pääsääntöisesti olla routimatonta. Tällöin pääkriteerinä on, että hienoainepitoisuus 0,074 mm seulalla on alle 8 % ja että routivuuspohjalla karkeamman maalajin alueella kulkevan käyrän alapää ei ulotu hienomman maalajin alueen puolelle /Suni & Salmenkaita 1996/. Infra-RYL:in mukaan /Rakennustieto 2006/ sitomattoman kantavan kerroksen materiaalin hienoainepitoisuus 0,063 mm:n seulan kohdalla saa olla kalliomurskeella enintään 6 % ja soramurskeella enintään 9 % tierakenteeseen tiivistettynä.

Moreenien käyttökelpoisuutta on arvioitu tielaitoksen työmailla saatujen kokemusten perusteella. Huomioita tulee kiinnittää sekä hienoaineksen että kivisyyden määrään. Murskauskelpoisen moreenin tulee olla mahdollisimman kivistä. Yli 64 mm suuruisia kiviä ja lohkaraita tulisi olla vähintään 25 % ja hienoainesta enintään 10 - 20 %, 0 - 65 mm:n seulantakäyrällä. Toisaalta murskattavat kivet eivät saa olla liian suuria murskaukseen. Ylisuuret kivet on rikotettava, räjäytettävä tai vietävä pois. Moreenien käyttökelpoisuusluokkien rakeisuusohjealueiden mukainen kivisyys ja hienoainesmäärät on esitetty taulukossa 4.3 /Tie ja vesirakennushallitus 1986/.

Tutkimuksen johtopäätöksissä on todettu, että murskattavan moreenin laatuvaatimukset ovat pääosin kohdallaan. Kivisydeltään moreenin tulisi olla yli 25 % ja hienoainekseltaan alle 13 %, jotta murskaus olisi taloudellisesti suoritettavissa. Hienoainemäärä voi olla myös suurempi, jos myös kivisyys on suurempi. Hienoainespitoisuus voi olla jopa 20 %, jos hienoainesta erotaan seulomalla pois, mutta hinta nousee erottelusta johtuen tällöin vastaavasti tuotantotehon laskun myötä. Kosteuspitoisuuden tulee olla alle 6 % /Suni & Salmenkaita 1996/.

Taulukko 4.3. Moreenien käyttökelpoisuusluokkien rakeisuuden tunnusluvut /Tie ja vesirakennushallitus 1986/.

Luokka	Kuvaus	Kivisyys	Hienoainespitoisuus
Luokka I	Murskauskelpoinen moreeni	yli 25 %	alle 13 %
Luokka II	Määrätyin edellytyksin murskauskelpoinen moreeni	yli 15 %	alle 20 %
Luokka III	Moreeni ei murskauskelpoinen moreeni	kivisyys luokkia I ja II pienempi	hienoainespitoisuus luokkia I ja II suurempi

4.4 Raivatun puuston käsittely- ja jalostusmenetelmät

Hakkuu

Jo raivausvaiheessa poistettavan ja hyötykäyttöön menevän materiaalin laatuun vaikutetaan puuston hakkuusta lähtien. Siksi on tärkeätä, että koko toimenpideketju on hallittu. Väärä ajoitus tai sopimattomat työmenetelmät heikentävät laatua ja lisäävät kokonaiskustannuksia.

Yleensä puuston kaato ja puiden raivaus ovat omia urakoitaan, mutta tehokkaimmin työ pystytään hoitamaan kun nämä urakat yhdistetään. Tällöin päästään tekemään työ ns. konetarkkuudella. Lisää tietoa laitteista löytyy Kosken Megawatin nettisivuilta: www.megawatti.net.

Hakkuu tehdään nykyään yleensä monitoimikoneilla, jotka karsivat ja katkovat puut niiden kaatamisen jälkeen. Jos pientä alikasvupuustoa ($D < 5 - 10$ cm) on paljon, on kannattavaa kaataa ne ensimmäisenä työvaiheena raivaussahalla tai kaatokahvoin (esim. Apuri) varustetulla moottorisahalla. Kaadetuista puista pyritään tekemään muutaman puun kourakasoja mahdollisuuksien mukaan. Ennakko-raivaus helpottaa ja nopeuttaa koneellista hakkuuta. Pienpuusto voidaan kerätä myös monitoimikoneen joukkokäsittelykouralla muun hakkuun yhteydessä, elleivät suurimmat puut ole kovin suuria.

Koneellisessa hakkuussa oksat ja latvat kannattaa puida kasoihin siten, että hakkuulaitetta liikutetaan mahdollisimman vähän karsinnan aikana.

Kasoista energiapuu siirretään tienvarteen tavallisimmin metsätraktorilla. Siinä tulee olla piikkikoura, jolla vähennetään epäpuhtauksien nousemista maasta puuaineksen sekaan. Koska tässä tapauksessa paikalle ei kasvateta uutta puuta, tavara tulee viedä pois mahdollisimman nopeasti hakkuun jälkeen, jolloin varisemistapioit jäävät vähäisiksi.

Pienpuuston sekä oksa- ja latvusmassan poisviennin jälkeen nostetaan kannot erityisellä kantoharalla tai -harvesterilla. Nämä ovat kaivinkoneeseen kiinnitettäviä pihtimäisiä lisälaitteita, joita käytetään myös metsätalouden avohakkuualueiden kannonnostossa. Kannonnostolaitteilla kannot pilkotaan 2 - 4 osaan, jolloin epäpuhtauksia varisee pois ja kuivuminen nopeutuu. Pienimpien kantojen noston tuottavuus on sen verran huono, että ne yleensä kannattaa jättää maahan. Kantoja kasataan hakkuualueilla muutama samaan kasaan, jolloin metsäkuljetus nopeutuu. Kantojen olisi hyvä antaa kuivua vähintään kuukauden kesäolosuhteissa. Tällöin epäpuhtauksia varisee edelleen pois. Jos kannot pitää viedä heti pois, niille voi olla tarpeen esimurskaus ja seulonta.

Nykyään esimerkiksi uusilla pientaloalueilla kannot jäävät usein rakentajien vastuulle. Tällöin ne yleensä nostetaan tavallisella kaivinkoneen kauhalla ja laatu on sen mukaista: kiviä ja maata nousee liikaa mukaan eikä kantoja useinkaan pilkota jatkokäsittelyn helpottamiseksi. Tämä lisää kokonaiskustannuksia merkittävästi.

Haketus tai murskaus, seulonta ja kuivaus

Pienpuusto ja oksa- ja latvusmassa sekä kannot voidaan käsitellä joko hakkurilla tai murskaimella. Hake tai murske toimitetaan voimalaitosten polttoaineeksi. Hakkurissa on terävänä pidettävät terät ja murskaimessa lähtökohtaisesti tylpemmänmuotoiset vasarat. Hakkuria kannattaa käyttää vain, jos hakettava aines on suhteellisen puhdasta. Kannot on hienonnettava murskaimella, koska mukana on aina jonkin verran maa-ainesta ja kiviä, jotka tylsytävät nopeasti hakkurin terät. /Vertainen 2008/.

Haketus tai murskaus voidaan tehdä joko tienvarsivarastolla hakkuualueen lähellä, käsittelyalueella tai voimalaitoksen pihassa. Paikkaan vaikuttavat mm. etäisyys voimalaitokselta ja saatavissa oleva kalusto.

Kuusenkannot saadaan melko puhtaiksi jo oikealla nostotekniikalla, mutta moreenimailla männyn- ja koivunkantoihin saattaa jäädä paljonkin maa-ainesta. Myös esimerkiksi savimaiden kuusenkannotkin saattavat olla varsin maa-ainespitaisia. Tällöin voidaan käyttää esimurskainta, joka tekee kannoista noin 30 cm:n paloja. Esimurskatusta tavarasta voidaan seuloa hienoaines (esim. alle 10 mm) pois, jolloin jäljellejäävän puuaineksen tuhkapitoisuus pienenee huomattavasti. Seulon ylitteessä saattaa tuhkapitoisuus pudota esimerkiksi 15 %:sta 3 %:iin ja vastaavasti alitteessa saattaa olla palamatonta ainesta reilusti yli 50 %. Esimurskattu ja seulottu kantopala johdetaan jälkimurskaimeen, jotta saavutetaan lopullinen noin 50 mm:n palakoko. Nämä toiminnot voidaan parhaiten toteuttaa erillisellä käsittelyalueella - välivarastolla tila käy ahtaaksi.

Erotettu hienoaines voidaan käyttää esimerkiksi kunnalliseen viherrakentamiseen. Sillä ei voida korvata hyvälaatuista multaa, mutta esimerkiksi viheralueiden alla oleviin täyttöihin, meluvalleihin tms. se sopii hyvin.

Koska pienpuut sekä oksa- ja latvusmassa korjataan rakennusaloilta tuoreena, voidaan niiden kuivauksella saada noin 10 % lisäenergiaa. Edullisimmillaan kuivaus on silloin, kun siihen käytetään jätelämpöä. Puupolttoterminaleille voitaisiinkin rakentaa pienvoimalaitoksia, jotka tuottaisivat sähköä sekä terminaalien omaan käyttöön (mm. murskauksen käyttövoimaksi) että verkkoon. Sähköntuotannon jätelämpö puhallettaisiin alapäin energiapuukasoisiin.

Tässä kuvatulla menettelyllä voidaan maankaatopaikalle menevän materiaalin osuus minimoida ja käyttää hyödyksi mahdollisimman suuri osa alueelta poistettavasta materiaalista.

5 Koerakenteiden pitkäaikaiskäyttäytyminen

5.1 Koerakenteet

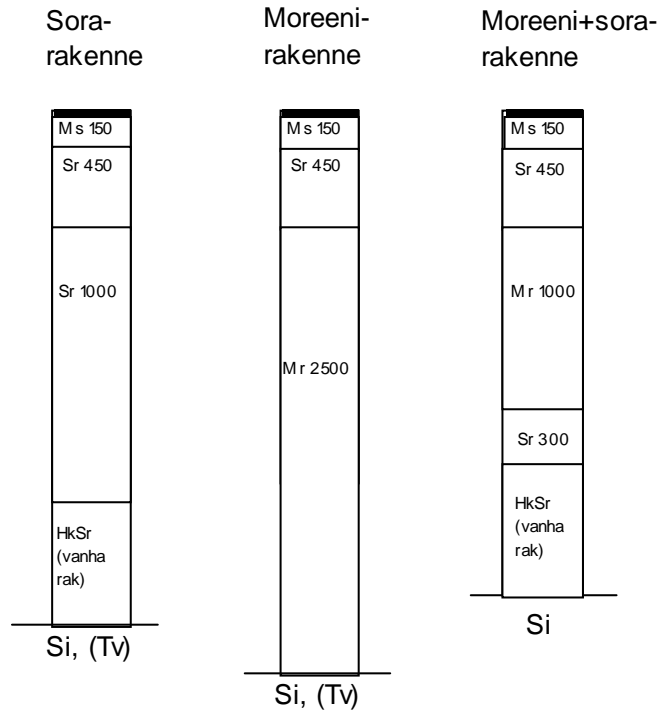
Hankkeessa selvitettiin vanhojen moreenikoekohteiden (4 kpl) ja yhden savikoekohteen pitkäaikaiskäyttäytymistä vaurioinventoinneilla (kaikki kohteet), tasaisuusmittauksilla (moreenikohteet), routanousuvaaituksilla (stabiloidut moreenikohteet) ja pudotuspainomittauksilla (savikohde). Koekohteiden ikä vaihteli välillä 10 - 21 vuotta. Moreenikohteista Peera oli rakennettu Arktinen tie - projektissa 1986 ja kolme TPPT -tutkimusohjelmassa (Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma) vuosina 1996 - 1997. Savikohde oli rakennettu ”Massastabiloitujen savien hyötykäyttö katurakenteissa” -projektin yhteydessä vuonna 1997.

5.2 Vt 21 Peera

Peeran kohteessa rakennettiin kesällä 1986 kaksi moreenikoerakenteita (kuva 5.1) sekä vertailurakenne:

- paikallisesta, lievästi routivasta moreenista rakennettu pengeri, joka rakennettiin suoraan pohjamaan varaan,
- moreenipenger, joka eristettiin kapillaarisen nousun suhteen pohjamaasta rakentamalla moreenin ja routivan pohjamaan väliin eristyskerros sorasta (300 mm) ja
- vertailurakenne routimattomasta sorasta rakennettu pengeri.

Kuvissa 5.2 ja 5.3 on esitetty Peeran moreeni- ja moreeni-sorakoerakenteet keväällä 2007. Moreenin hienoainespitoisuus oli noin 30 %. Kahden talven (1986 - 87 ja 1987 - 88) havaintojen perusteella moreenirakenteiden routanousut vaihtelivat välillä 40 - 80 mm, kun vanhan rakenteen suurimmat routanousut olivat rakentamista edeltävänä talvena 260 mm. Kantavuudet mitattiin viimeksi vuonna 2001 ja ne vaihtelivat koeosuuksilla välillä 270 - 350 MPa. Koerakenne päällystettiin viimeksi syksyllä 1998.



Kuva 5.1. Peeran koerakenteiden rakennekerrokset /Saarelainen 1990/.



Kuva 5.2. Vt 21 Peera. Moreenikoerakenne plv. 30820 - 30920 keväällä 2007.

Keväällä 2007 havaittiin koerakenteissa seuraavat vauriot:

- moreenirakenteen yhteydessä havaittiin kaksi poikkihalkeamaa paaluilla pl. 30825 ja pl 30863
- moreeni-sora-rakenteen yhteydessä havaittiin 4 kpl poikkihalkeamia paaluilla Pl. 30921,5, Pl. 30978, Pl. 31025 ja Pl. 31075.
- vertailurakenteena toimivan sorarakenteen yhteydessä havaittiin kaksi poikkihalkeamaa paaluilla Pl. 30733 ja Pl. 30774.



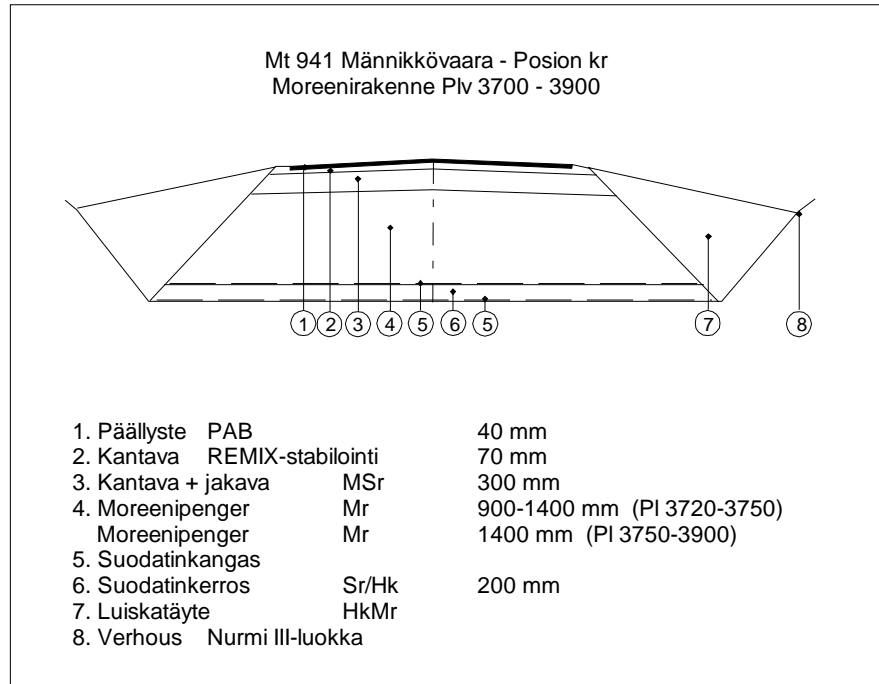
Kuva 5.3. Vt 21 Peera. Moreeni-sora-koerakenne plv. 30920 - 31100 keväällä 2007.

Koekohteiden tasaisuus mitattiin kesällä 2007. IRI-arvojen (5 m) keskiarvo oli moreeniosuudella 2,3 mm/m, moreeni-soraosuudella 2,1 mm/m ja vertailurakenteella 2,0 mm/m eli tasaisuuden suhteen tien kunto oli hyvä. Koerakenteiden kohdalla tie on korkealla penkereellä. Moreeni-sorarakenteessa käytetyn kuivatuskerroksen (300 mm Sr) vaikutusta moreenirakenteen routimiseen ei voitu osoittaa, sillä routanousut olivat pieniä myös ilman kuivatuskerrosta tehdyssä moreenirakenteessa.

Peeran moreeni- ja moreeni-sorarakenteet ovat toimineet hyvin jo 20 vuoden ajan. Koerakenteet on kertaalleen uudelleen päällystetty vuonna 1998. Vauriot ovat olleet vähäisiä. Viimeisen 9 vuoden aikana päällysteeseen on tullut vain muutama poikkihalkeama.

5.3 Mt 941 Männikkövaara

Männikkövaaran moreenikoerakenteen tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakesävyys tehostamalla kuivatusta salaojittavalla ja kapillaarisen nousun katkaisevalla sorakerroksella moreenirakenteen alla. Kuvassa 5.4 on esitetty seosmoreenirakenteen poikkileikkauskuva.



Kuva 5.4. Seosmoreenirakenteen poikkileikkauskuva /Ahonen et al. 2003/.

Moreenirakenteessa (rakennusvuosi 1996) vanha tien päällysrakenne ja pohjamaa sekoitettiin keskenään noin 2 m:n syvyydelle tien tasausviivasta. Sekoitettu massa eli ns. seosmoreeni oli rakeisuudeltaan hiekkamoreenia ja sen hienoainespitoisuus oli noin 30 %. Seosmoreenista tehty pengerrakenne kuivatettiin salaojituksella ja kapillaarisen nousun katkaisevalla sorakerroksella (200 mm).

Seosmoreenirakenteen osuudelle rakennettiin kiertotie. Tien uudet päällysrakenteet oli tarkoitus rakentaa kerralla koko tien leveydeltä, mutta sähkölinjojen läheisyyden takia kaikkia leikkausmassoja ei saatu mahtumaan tien sivuun. Työ toteutettiin siten, että tien poikkileikkauksesta kaivettiin 2/3-osaa ja kaivettu vanha päällysrakenne ja pohjamaa nostettiin jäljellä olevan kaistan päälle ja tien reunaan. Näin jatkettiin koko seosmoreeniosuus. Kaivun jälkeen pohjamaan päälle levitettiin suodatinkangas ja 200 mm suodatinkerros. Suodatinkerros peitettiin suodatinkankaalla. Vanha päällysrakenne ja pohjamaa nostettiin suodatinkankaan päälle eli homogenisointi tehtiin kahdessa vaiheessa (leikkauksen ja rakentamisen yhteydessä). Seosmoreenipenkereen (2/3-osaa poikkileikkauksesta) rakentamisen jälkeen tehtiin vastaava homogenisointi jäljellä olevalle (1/3-osa) poikkileikkaukselle. Ylemmät päällysrakenteet rakennettiin normaalisti /Mikkola 1996/. Kuvassa 5.5 on esitetty Männikkövaaran moreenirakenne keväällä 2007.

Seurantatalvien (1997 - 2003) routanousut olivat moreenirakenteessa selvästi suurempia kuin perinteisessä 2,0 metrin massanvaihtorakenteessa. Keskimääräiset maksimiroutanousut eri talvina vaihtelivat välillä 90 - 125 mm. Seosmoreenirakenteen yhteydessä havaituista routanousuista oli talvesta riippuen muodostunut 50 - 90 % itse seosmoreenin routimisesta. Seurantamittausten aikana havaittiin vähän päällystevaurioita. Ne olivat pääasiassa pituushalkeamia päällysteen reunassa. Vähäisiin päällystevaurioihin oli vaikuttanut tien tasainen routiminen poikkileikkauksessa. Vaikka routanousut olivat suuria, routanousuerot tien keskilinjan ja reunojen välillä olivat hyvin pieniä. Tien tasaisuus oli keväällä 2001 keskimäärin tyydyttävä ja kesällä keskimäärin hyvä. Eri vuosina mitattujen kantavuuksien keskiarvot ovat vaihdelleet välillä 205 - 230 MPa.

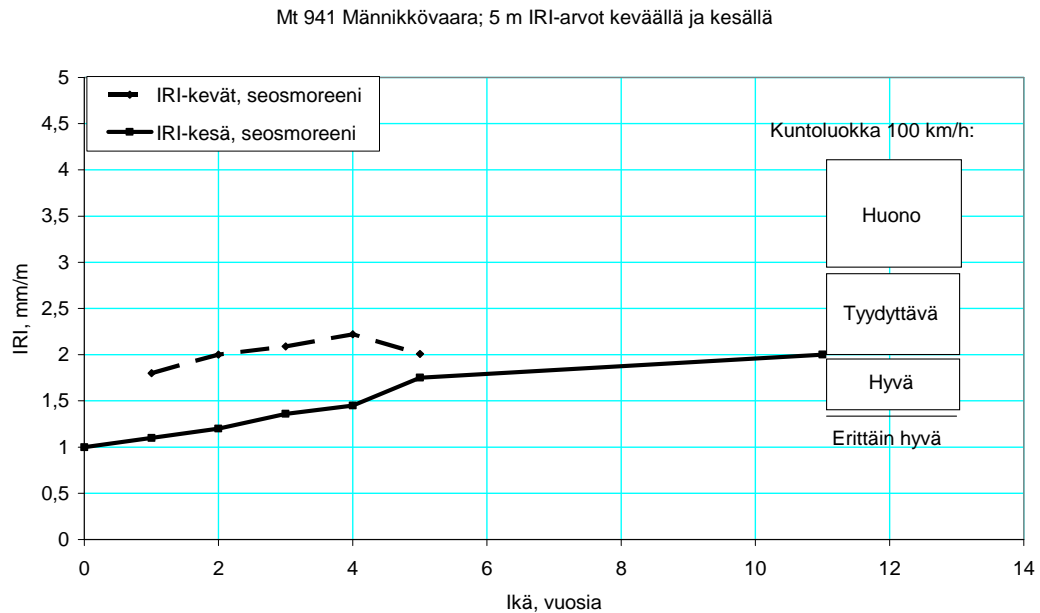
Keväällä 2007 (kuva 5.5) havaittiin vain kolme poikkihalkeamaa paaluilla Pl. 3701,5, Pl. 3712 ja Pl. 3890. Tien pituushalkeilu oli vähäistä, eikä tien keskellä tai kaistoilla havaittu halkeamia. Pituushalkeilua esiintyi vain tien reuna-alueella plv. 3711 - 3718 vas., plv. 3810 - 3824 vas., plv. 3848 - 3857 vas. plv. 3876 - 3884 oik. sekä plv. 3889 - 3900 vas. Vauriosumma oli edelleen alle 10 m²/100 m.



Kuva 5.5. Mt 941 Männikkövaara. Seosmoreenirakenne plv. 3700 - 3900 kevät 2007.

Koerakenteiden tasaisuus mitattiin kesällä 2007. IRI-arvojen (5 m) keskiarvo oli seosmoreeniosuudella 2,0 mm/m ja vertailurakenteena toimivalla massanvaihtosuudella 1,8 mm/m eli tasaisuuden suhteen tien kunto oli seosmoreeniosuudella hyvän ja tyydyttävän rajalla. Kuvassa 5.6 on esitetty seosmoreenirakenteen tasaisuus ajan suhteen rakentamisen alusta.

Männikkövaaran seosmoreenirakenne on toiminut hyvin 11 vuotta. Routanousut ovat olleet suurehkoja, mutta routiminen suhteellisen tasaista koko poikkileikkauksessa. Tien vaurioituminen on ollut vähäistä. Tien keskellä ja kaistoilla ei ole havaittu halkeamia. Pituushalkeilua esiintyi vain tien reuna-alueella.



Kuva 5.6. Seosmoreenirakenteen tasaisuus ajan suhteen 11 vuoden aikana.

5.4 Mt 595 Kiuruvesi

Kiuruveden koerakennuskohteen tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakestävyys estämällä päällysteen halkeilu ja sulamisvaiheen liallinen kantavuuden aleneminen sekä epätasaisten tai haitallisten routanousujen syntyminen. Menetelmänä käytettiin alusrakenteen (moreenin) homogenisointia mekaanisella menetelmällä ja lisänä homogenisoidun moreenin hienoaineksen käsittelyä sementillä stabiloiden. Vertailurakenteena toimi pelkästään homogenisoitu rakenne.

Tien päällysrakenteet uusittiin (suodatin 400 mm, jakava 300 mm, kantava 200 mm ja päällyste PAB 50 mm eli rakennepaksuus oli 950 mm) ja moreenialusrakenteen pintakerros stabiloitiin joko 0,5 m tai 1,0 m kerrospaksuudelta eri sementtimäärillä. Sementtimäärä vaihteli stabiloitavassa moreenipohjassa välillä 20 - 60 kg/m² (20 - 120 kg/m³).

Alusrakenteen homogenisointi suoritettiin 2 m syvyydelle uuden rakenteen tasausviivasta eli noin 1 metrin syvyydelle pohjamaan pinnasta. Homogenisointiin käytettiin Caterpillar 229 kaivinkonetta. Kauhana koneessa oli normaali tasakärkinen kuokkakauha. Homogenisoinnissa kaivinkoneen kauhaan otettiin pohjamaata noin metrin syvyydeltä ja kauha tyhjennettiin eri kohtaan kuin mistä maa oli otettu. Näin menetellen pohjamaa sekoittui ja pohjamaassa olleet kivet ja kantot tulivat esiin ja poistettiin.

Sementin levitykseen käytettiin traktorin (Ford TW-30) vetämää erikoisvalmisteista levitintä. Levittimen siiloon mahtui kerralla 12 tonnia sementtiä. Sementti purkautui siilosta levittimen etupuolelle siilon pohjalla olevan leveän kuljetinhihnan välityksellä. Kuljetinhihnan nopeus oli suoraan riippuvainen levittimen nopeudesta, joten sementin määrä neliometriä kohden pysyi vakiona. Sementin määrää säädeltiin levittimen etuosassa olevan aukon kokoa säätelemällä. Sementin sekoittamiseen alusrakenteeseen käytettiin kaivinkoneen viisi piikkistä harakauhaa, johon oli sekoittamisen tehostamiseksi hitsattu kaksi poikkisuuntaista terästankoa (kuva 5.7).

Sementin sekoittamisen jälkeen stabiloitu alusrakenne tiivistettiin ja muotoiltiin. Tiivistämiseen käytettiin kaivinkoneeseen (Åkerman H 10) liitettyä hydraulista tärylevyä. Yhdellä koeosuudella pohjamaa tiivistettiin kaivinkoneen teloilla. Ylemmät päällysrakennekerrokset tehtiin normaalisti /Kvick 1997/.

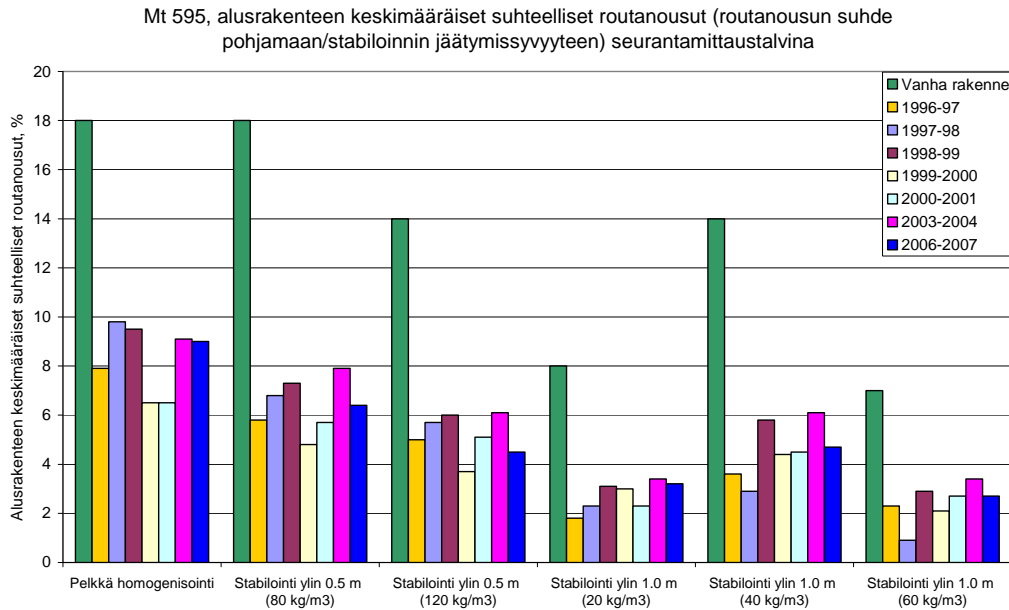


Kuva 5.7. Alusrakenteelle levitetyn sementin sekoittamista /Kvick 1997/.

Seurantamittauksia tehtiin talvien 1997 - 2001 ja 2004 aikana. Seurantamittausten aikaiset pakkasmäärät vaihtelivat tilastollisesti keskimäärin kerran 10 vuodessa toistuvasta leudosta talvesta hieman keskimääräistä kylmempään talveen. Koerakenteiden keskimääräiset routanousut vaihtelivat välillä 10 - 94 mm ja suurimmat routanousut olivat 130 mm (vain homogenisoidun rakenteen kohdalla). Talvella 2006 - 2007 mitatut routanousut olivat stabiloiduilla osuuksilla suurimmillaan noin 60 mm ja homogenisoidulla osuudella noin 100 mm.

Uusien päällysrakenteiden rakentaminen ja pelkkä alusrakenteen homogenisointi pienensi suhteellisen routanousun noin puoleen verrattuna vanhaan rakenteeseen. Stabiloitujen koerakenteiden suhteellisten routanousujen keskiarvo oli seurannan aikana välillä 33 - 38 % vanhan rakenteen suhteellisesta routanoususta. Ensimmäisen talven aikana stabiloiduilla osuuksilla routanousua alkoi muodostua vasta routarajan tunkeuduttua stabiloidun kerroksen läpi. Myöhempinä talvina havaittiin myös stabiloidun kerroksen lievää routimista.

Vanhan rakenteen routanousuihin nähden parhaiten toimi koerakenne, jossa alusrakennetta stabiloitiin 1 metrin syvyydeltä sideainemäärällä 40 kg/m^2 (40 kg/m^3) sementtiä. Muillakin koerakenteilla havaittiin, että stabilointisyvyys (1,0 m) oli routanousujen kannalta tärkeämpi kuin sideaineen määrä. Kuvassa 5.8 on esitetty alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut (routanousun suhde pohjamaan/stabiloinnin jäätymissyvyyteen seurantamittaustalvina).



Kuva 5.8. Alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut (routanousun suhde pohjamaan/stabiloinnin jäätymissyvyyteen seurantamittaustalvina) /Ahonen et al. 2004/.

Seurannan ensimmäisen 3 vuoden jälkeen näytti siltä, että stabiloidun alusrakenteen routivuus hieman lisääntyy ajan suhteen. Myöhemmin tilanne on kuitenkin tasoittunut. Stabiloidun kerrospaksuuden ollessa 0,5 m suhteellinen routanousu näyttäisi asettuneen tasolle 4 - 8 % (pelkästään homogenisoidulla rakenteella suhteellinen routanousu oli 7 - 10 %). Stabiloidun kerrospaksuuden ollessa 1,0 m näyttäisi suhteellinen routanousu olevan edelleen lievässä kasvussa, mutta vaihdellen 0,5 m stabilointisyvyyttä alhaisemmalla tasolla (välillä 2 - 6 %).



Kuva 5.9. Kiuruveden moreenikoerakenne keväällä 2007.

Koekohteiden tasaisuus mitattiin kesällä 2007. IRI-arvojen (5 m) keskiarvo oli stabiloiduilla osuuksilla 3,3 mm/m ja vertailurakenteena toimivalla homogenisoidulla osuudella 3,1 mm/m eli tasaisuuden suhteen tien kunto oli stabiloiduilla osuuksilla tyydyttävä. Samassa yhteydessä tehdyssä vauriokartoituksessa ei havaittu vaurioita stabiloiduilla osuuksilla, koska kohde oli paikkauspäällystetty syksyllä 2006. Syynä korjaukseen oli päällysteen runsas verkkohalkeilu ajourissa. Kuvassa 5.9 on esitetty Kiuruveden moreenikoerakenne keväällä 2007.

Kiuruveden moreenistabilointikohteissa stabilointisyvyys oli routanousujen kannalta tärkeämpi kuin sideaineen määrä. Suunnilleen sama routanousutaso saavutettiin vastaavilla pohjasuhteilla stabiloimalla pohjamaata 0,5 m sideainemäärällä 120 kg/m³ sementtiä tai stabiloimalla 1,0 m sideainemäärällä 40 kg/m³. Ensimmäisen talven aikana stabiloiduilla osuuksilla routanousua alkoi muodostua vasta routarajan tunkeuduttua stabiloidun kerroksen läpi. Myöhemmin talvina havaittiin myös stabiloidun kerroksen lievää routimista. Stabiloidun pohjamaan routiminen oli kuitenkin selvästi alhaisemmalla tasolla kuin osuudella, jossa pohjamaa vain homogenisoitiin.

5.5 Mt 5950 Salahmi

Salahmin koerakennuskohteen tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakestävyys estämällä päällysteen halkeilu ja sulamisvaiheen liiallinen kantavuuden aleneminen sekä epätasaisten tai haitallisten routanousujen syntyminen. Menetelmänä käytettiin alusrakenteen (moreeni) homogenisointia mekaanisella menetelmällä ja lisäksi homogenisoidun moreenin hienoaineksen käsittelyä Finnstabi-kalkkiseoksella stabiloiden.

Koerakenteiden rakenneosat olivat pinnasta lukien PAB 50 mm, kantavan murske 200 mm, jakavan kerroksen sora 300 mm, suodatinkerros 400 mm sekä päällysrakenteen alla homogenisoitu ja stabiloitu alusrakenne. Alusrakenteen osalta plv. 19900 - 19930 suoritettiin vain homogenisointi, plv. 19930 - 20020 alusrakenne homogenisoitiin ja stabiloitiin Finnstabi-kalkkiseoksella 90 % tiiviysasteella siten, että stabiloitavan alusrakenteen paksuus muuttui 0,5 metristä 0,7 metriin ja plv. 20020 - 20100 alusrakenne homogenisoitiin ja stabiloitiin Finnstabi-kalkkiseoksella 95 % tiiviysasteella siten, että stabiloitavan alusrakenteen paksuus muuttui 0,7 metristä 0,5 metriin. Sideaineen määrä oli kaikilla koeosuuksilla 80 kg/m³.

Pohjamaan homogenisointi tehtiin kaivinkoneella, jossa kauhana oli normaali tasakärkinen kuokkakauha. Homogenisointisyvyys oli 2,0 m uuden tien tasausviivasta. Homogenisointi pyrittiin tekemään siten, että alusrakenne sekoittui mahdollisimman hyvin ja että kaikki epätasaista routimista aiheuttavat epäjatkuuskohtat saataisiin poistettua. Käytännössä kaivinkoneen kauhaan otettiin pohjamaata tarvittavalta syvyydeltä, jonka jälkeen kauha tyhjennettiin eri kohtaan, kuin mistä maata oli otettu. Kivet ja mahdolliset kannot siirrettiin syrjään ja kaivinkone eteni käsittelemättömän maan päällä. Koekohteen kohdalle oli rakennettu kiertotie, joten homogenisointi voitiin tehdä kerralla koko tien leveydeltä. Homogenisoinnin jälkeen alusrakenne tasattiin suunnitelmien edellyttämään oikeaan tasoon ja muotoon.

Finnstabi-kalkki-sideaine levitettiin alusrakenteen päälle pyöräkuormaajalla, jossa oli vaaka. Sideaineen sekoitusvyvyys vaihteli koeosuuksilla välillä 0,5 - 0,7 m. Sideaineen sekoittaminen alusrakenteeseen tehtiin Ideachip Oy:n "Maamyyrä"

rumpusekoittajalla. Kuvassa 5.10 on esitetty sekoitin ja kuvassa 5.11 on esitetty sideaineen sekoittamista alusrakenteeseen. Sideaineen sekoittamisen jälkeen stabiloitu alusrakenne tiivistettiin ja muotoiltiin lopulliseen muotoonsa. Tämän jälkeen rakennettiin päällysrakenteen ylemmät kerrokset: suodatin, jakava ja kantava sekä päällyste.

Seurantamittausten aikaiset pakkasmäärät vaihtelivat tilastollisesti keskimäärin kerran 10 vuodessa toistuvasta leudosta talvesta hieman keskimääräistä kylmempään talveen.

Tien kantavuus (mitattu viimeksi kesällä 2000) ja tasaisuus olivat seurannan aikana hyviä. Tien keskilinjalle ja sen lähiympäristöön muodostui routanousuerosta aiheutunutta pituushalkeilua alueille, joissa keskilinjalla routanousut ylittivät 100 mm. Verkkohalkeilun alkua oli havaittavissa etenkin tien vasemmassa ulkourassa.

Seurantatalvien (1998 - 2001 ja 2004) aikaiset koerakenteiden keskimääräiset routanousut vaihtelivat välillä 47 - 93 mm. Suurimmat routanousut olivat 130 mm. Talvella 2006 - 2007 routanousut olivat keskimäärin noin 60 mm suurimman routanousun ollessa 108 mm.

Rakentamisen jälkeisinä kahtena talvena suhteelliset routanousut eli routanousujen suhde pohjamaan/stabilointiin jäätymissyvyyteen olivat selvästi alhaisempia kuin myöhempinä talvina, vaikka pakkasmäärät olivat seurannan aikaisista talvista suurimmat. Kahden ensimmäisen talven suhteellisten routanousujen keskiarvot vaihtelivat eri koerakenteilla välillä 5 - 9 %. Tämän jälkeen suhteelliset routanousut kasvoivat selvästi ja kolmen viimeisen seurantalven suhteellisten routanousujen keskiarvo eri koerakenteilla vaihteli välillä 9 - 14 %.



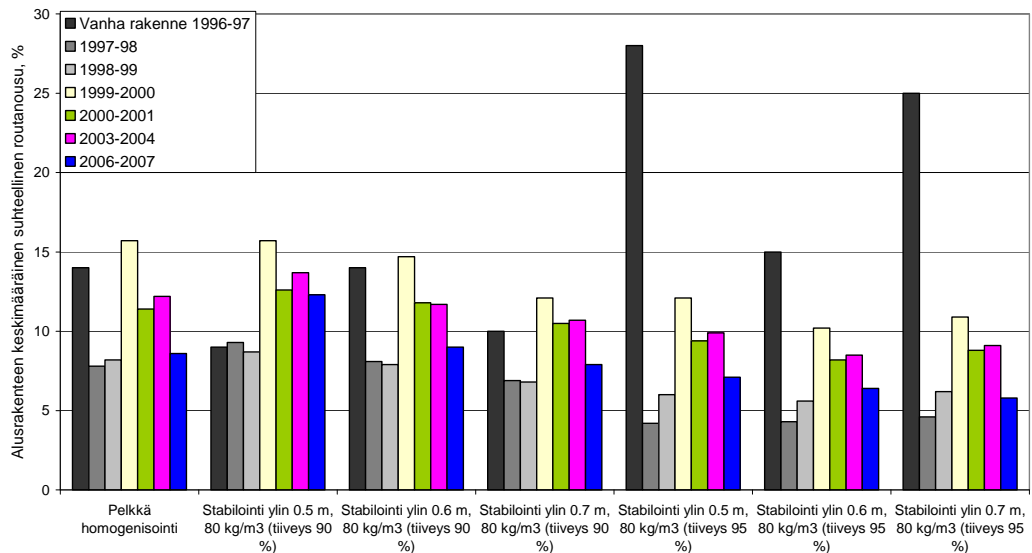
Kuva 5.10. Stabiloinnissa käytetty ”maamyrrä”-sekoitin.

Vertailtaessa koeosuuksia, joissa alusrakenne vain homogenisoitiin tai alusrakennetta stabiloitiin Finnstabi-kalkkiseoksella 0,5 - 0,7 m tiiviysastetavoitteella 90 %, ei routanousuissa ollut merkittävää eroa. Homogenisoidulla osuudella keskimää-

räiset suhteelliset routanousut vaihtelivat välillä 7,8 - 15,7 %, kun ne stabiloidulla osuudella vaihtelivat välillä 6,8 - 15,7 %.



Kuva 5.11. Sideaineen sekoitusta alusrakenteeseen.



Kuva 5.12. Alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut (routanousun suhde pohjamaan/stabiloinnin jäätymissyvyyteen seurantamittauksina) /Kivikoski 2004/.

Koeosuuksilla, joissa alusrakennetta stabiloitiin Finnstabi-kalkkiseoksella 0,5 - 0,7 m tiiveysastetavoitteella 95 %, routanousut olivat ensimmäisen seurantalven aikana selvästi pienempiä kuin muilla koeosuuksilla. Samoin routanousutaso oli pienentynyt vanhaan rakenteeseen verrattuna selvästi eniten. Keskimääräiset suhteelliset routanousut vaihtelivat tällöin välillä 4,2 - 4,6 %. Myöhempien seurantalven aikana suhteelliset routanousut kasvoivat kuitenkin näissä koerakenteissa

eniten. Alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut on esitetty kuvassa 5.12 (routanousun suhde pohjamaan/stabiloinnin jäätymissyvyyteen seurantamittaustalvina). Kuvassa 5.13 on esitetty Salahmin moreenikoerakenne keväällä 2007.

Kuvan 5.12 perusteella voidaan havaita, että alusrakenteen Finnstabi-kalkkiseosstabiloinnilla (stabiloinnin tiiviystavoitteella 90 %) ei saavutettu merkittävää etua routakestävyudessa suhteessa osuuteen, jossa alusrakenne vain homogenisoitiin. Suhteelliset routanousut olivat käytännössä yhtä suuria kuin homogenisoidulla osuudella. Koeosuuksilla, joissa alusrakennetta stabiloitiin 0,5 - 0,7 m tiiviysastetavoitteella 95 % suhteelliset routanousut olivat noin 75 % homogenisoidun osuuden suhteellisista routanousuista.

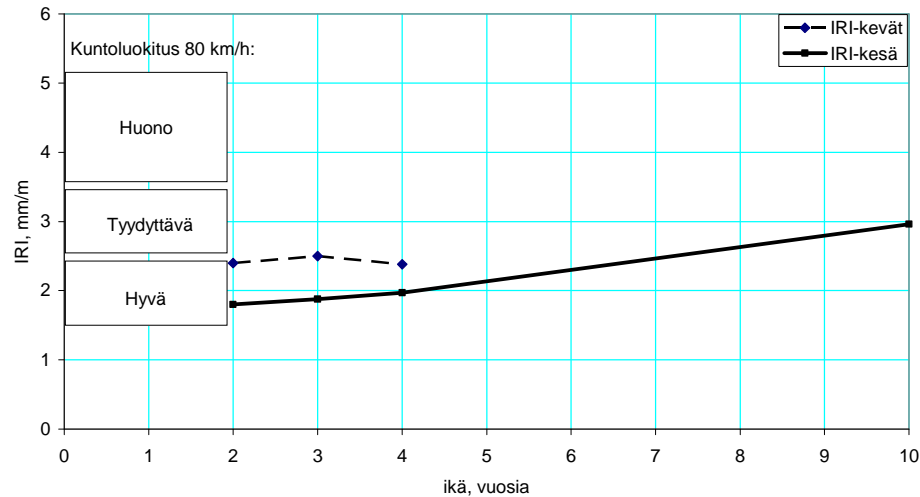
Keväällä 2007 havaittiin seuraavat päällystevauriot:

- keskilinjan pituushalkeilua stabiloiduilla osuuksilla plv. 19930 - 19975 (pituushalkeaman leveys vaihteli välillä 5 - 20 mm)
- kaksi poikkihalkeamaa paaluilla Pl. 19904 ja Pl. 20023
- verkkohalkeilua molemmissa ajourissa tien vasemmalla kaistalla plv. 19960 - 19980, 19995 - 20005 sekä vain ulkourassa plv. 19980 - 19995, 20005 - 20085 ja tien oikeassa ulkourassa plv. 19960 - 19975, 20083 - 20095 (vaurioiden määrä oli lisääntynyt merkittävästi keväällä 2001 suoritetusta vaurioinventoinnista, kuva 5.15).

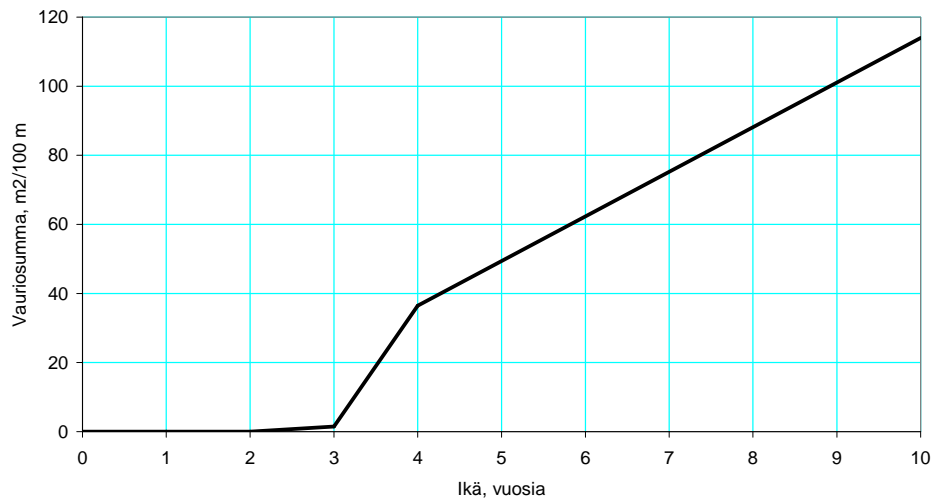


Kuva 5.13. Salahmin moreenikoerakenne keväällä 2007.

Koekohteiden tasaisuus mitattiin kesällä 2007. IRI-arvojen (5 m) keskiarvo oli stabiloiduilla osuuksilla 3,0 mm/m ja vertailurakenteena toimivalla homogenisoidulla osuudella 2,9 mm/m eli tasaisuuden suhteen tien kunto oli stabiloiduilla osuuksilla tyydyttävä. Kuvassa 5.14 on esitetty stabiloitujen osuuksien tasaisuus ajan suhteen rakentamisen alusta.



Kuva 5.14. Stabiloitujen osuukien tasaisuus (IRI5) ajan suhteen rakentamisen alusta (10 vuotta).



Kuva 5.15. Salahmin kohteen vauriosumman kehitys ajan suhteen.

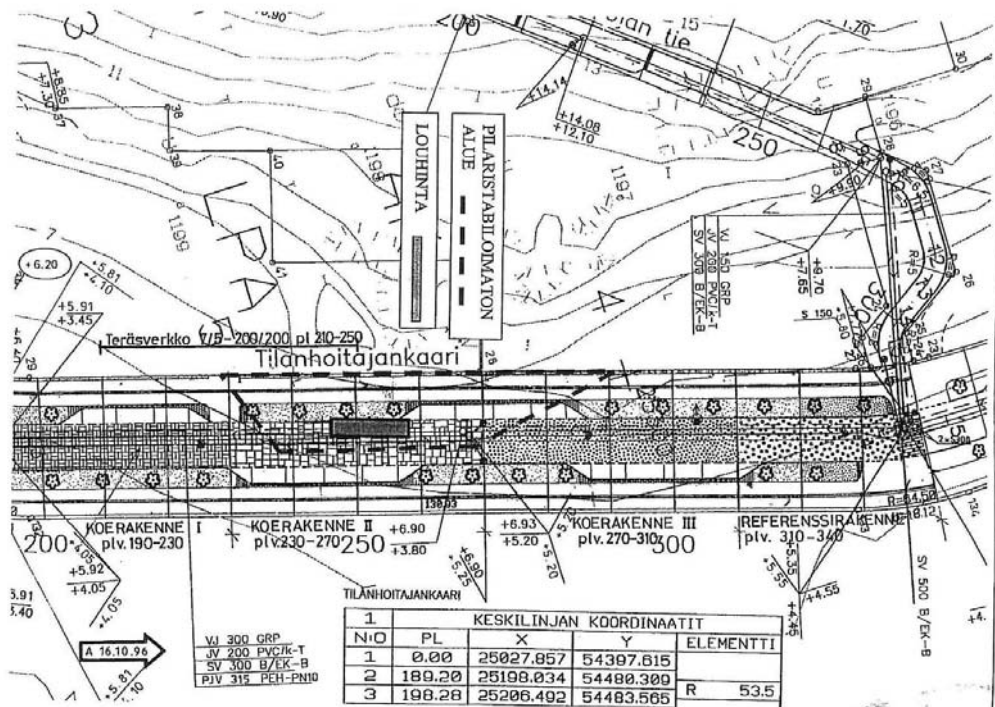
Salahmin kohteessa alusrakenteen stabilointiin (stabiloinnin tiiviystavoitteella 90 %) käytetyllä Finnstabi-kalkkiseoksella ei saavutettu merkittävää etua routakestävyydessä suhteessa osuuteen, jossa alusrakenne vain homogenisoitiin. Suhteelliset routanousut olivat käytännössä yhtä suuria kuin homogenisoidulla osuudella. Alusrakenteen stabiloinnin jälkeisellä tiiviysasteen nostamisella oli vaikutusta routanousujen suuruuteen. Tiiviysastevaatimuksen nostaminen 90 %:sta 95 %:iin pienensi pohjasuhteiltaan vastaavilla paikoilla routanousutasoa 20 - 30 %.

5.6 Viikin savikatu

”Massastabiloitujen savien hyötykäyttö katurakenteissa” -projektin koerakennuskohteena vuonna 1997 oli Viikin Tilanhoitajankaaren katurakenne /Mäkelä et al. 2000/. Koerakenteen rakennekerrokset olivat seuraavat:

- | | | |
|----------------------|----------------------|---------------------------|
| - päällysteen yläosa | AB 20/100 | 40 mm (tehty vuonna 2004) |
| - päällysteen alaosa | BS 2*30/150 | 120 mm |
| - kantava kerros | murske | 200 mm |
| - tukikerros | massastabiloitu savi | 550 mm |
| - eristyskerros | hiekkä | 200 mm |

Koerakenne suunniteltiin siten, että päällyste toteutetaan vaiheittain. Viimeinen pinta ajettiin vuonna 2004. Tukikerroksen massastabiloitu savi tehtiin kolmella sideaineella siten, että koerakenne I (plv. 190 - 230) tehtiin Lohjan E1:llä, koerakenne II (plv. 230 - 270) sementti-kalkki seoksella (95,5 %) ja koerakenne III (plv. 270 - 310) jauhetun masuunikuonan ja sementin seoksella (70:30 %). Teräsverkko (7/5 - 200/200) asennettiin kantavaan kerrokseen paaluvälillä plv. 210 - 250. Vertailurakenteena toimii katuosuus plv. 310 - 340. Kuvassa 4.16 on esitetty koerakenteiden sijainnit Tilanhoitajankaarella. Koerakenteiden pohjamaa oli pääosin pilaristabiloitu. Koerakenteen II alueella oli pienehkö louhittu alue sekä pohjamaa olivat pääosin pilaristabiloimaton. Kuvassa 5.17 on esitetty pituusleikkaus ja kuvassa 5.18 tyyppi-poikkileikkaus koerakennuskohteesta.



Kuva 5.16. Koerakenteiden sijainti Tilanhoitajankaarella /Mäkelä et al. 2000/.



Kuva 5.19. Koerakenteiden pinta kesällä 2007.

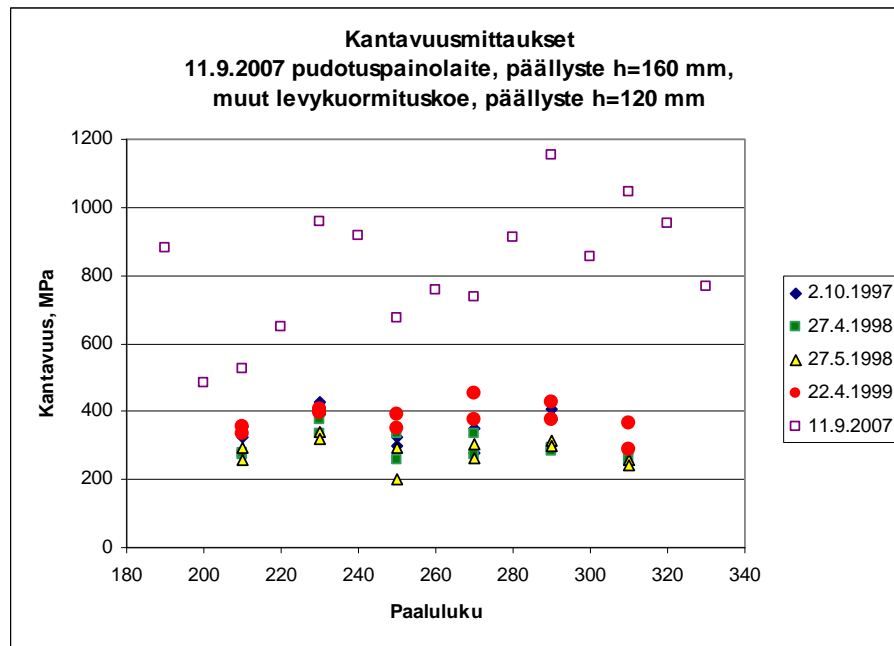


Kuva 5.20. Verkkohalkeilun alkua plv. 200 - 219.

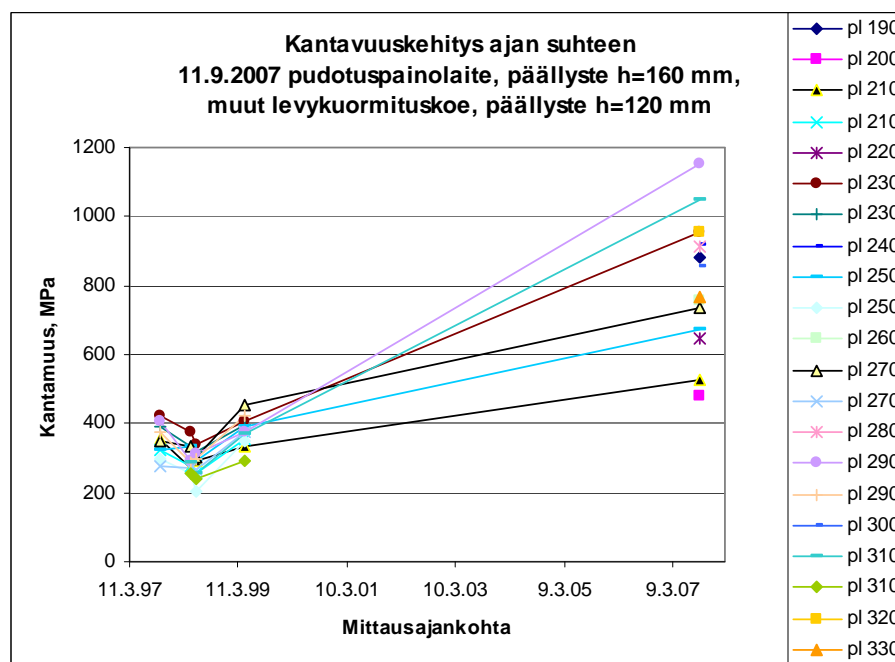
Kohteessa tehtiin vaurioinventaario kesällä 2007. Sen mukaan kadun keskilinjalla esiintyi pituushalkeilua plv. 204 - 257, plv. 260 - 265, plv. 275 - 293 ja plv. 300 - 335. Keskihalkeaman leveys oli noin 3 mm. Kadun läpi kulkeva poikkihalkeama oli paalulla Pl. 313. Sen leveys oli noin 5 mm. Plv. 200 - 219 esiintyi kadun oikeassa reunassa 30 - 40 cm leveydeltä verkkohalkeilun alkua. Kadun yhteenlaskettu vauriosumma oli noin 5 m²/100 m (8 m² verkkoa 150 m matkalla) eli katu oli hyvässä kunnossa.

Kohteessa suoritettiin kantavuusmittaukset pudotuspainolaiteella 11.9.2007. Kantavuusmittauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.21. Samassa kuvassa on esi-

tetty myös rakentamisen aikaan ja pian sen jälkeen noin kahden vuoden aikana suoritettujen kantavuusmittausten tulokset. Rakenteen tavoitekantavuus saven päältä mitattuna on ollut 136 MPa ja kadun tavoitekantavuus 188 MPa /Mäkelä et al. 2000/. Ennen syksyä 2007 suoritettujen kantavuusmittaukset on tehty levykuormituskokeina. Lisäksi on huomioitava, että aikaisempien kantavuusmittausten ja viimeisimmän kantavuusmittauksen välillä sidottujen kerrosten paksuus on kasvanut 40 mm päällystämisestä johtuen. Molemmissa kuvissa (5.21 ja 5.22) näkyy selvästi, kuinka kantavuudet ovat kohteessa kasvaneet huomattavasti ajan suhteen.



Kuva 5.21. Kohteessa suoritettujen kantavuusmittausten tulokset.



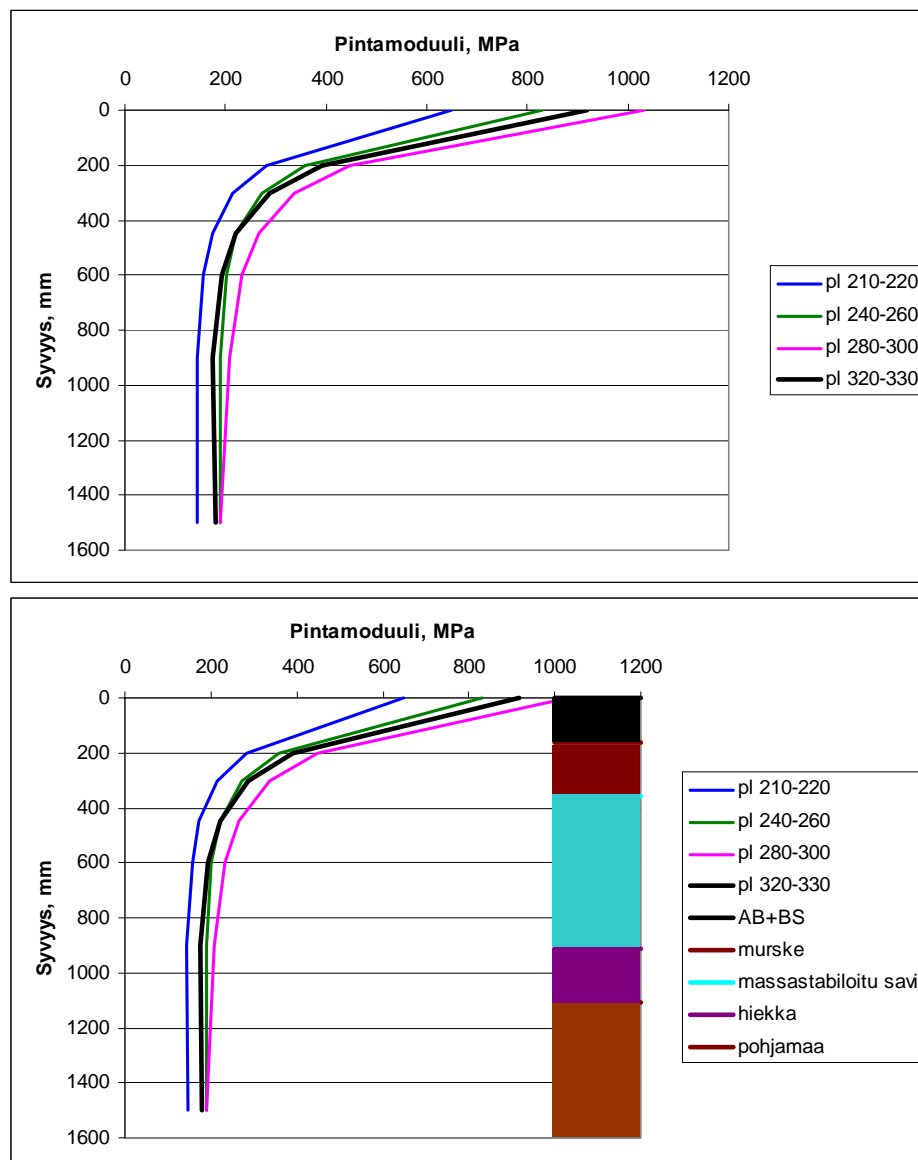
Kuva 5.22. Kantavuusmittausten tulokset ajan suhteen.

Pudotuspainolaitteella mitattujen taipumasuppliloiden kuvaajat eri koalueilla on esitetty liitteessä 1. Kuvassa 5.23 on esitetty takaisinlasketut pintamoduulin

kuvaajat eri koalueilla. Kuvasta voidaan havaita moduulien olevan sorakerroksen alla melko vakioita. Stabiloidun saven moduulit kasvavat koalueen alusta noin 150 MPa koalueen loppuun noin 220 MPa:iin. Vertailualue edustaa varsinaisten koalueiden keskiarvoa.

Taulukossa 5.1 on esitetty kaikkien kohteessa eri aikoina suoritettujen kanta-
vuusmittausten tulokset ja pintamoduulikuvaajasta määritetyt stabiloidun saven ja
murskeen moduulit. Taulukossa on esitetty myös materiaalien dynaamisen
moduulin arvo (M_r) pääjännityssumman ollessa 50 kPa, mikä vastaa melko hyvin
jännitystilaa kohteen rakenteissa.

Kohteen taipumat kuorman alla laskettiin Kenlayer -ohjelmalla käyttäen stabi-
loidulla savikerroksella sekä sora- ja hiekkakerroksella jännitystilasta riippuvia
moduuleja. Käyttämällä tarkastelussa kantavalle kerrokselle tyypillisen lajittuneen
kalliomurskeen arvoja ($K_1 = 22\,764$ ja $K_2 = 0.496$) ja hiekalla karkean hiekan
arvoja ($K_1 = 16\,975$ ja $K_2 = 0.484$) sekä savikerroksille Viikin savikadun rapor-
tissa /Mäkelä et al. 2000/ esitettyjä koemateriaalikohtaisia parametreja, saatiin eri
rakenteilla taulukossa 5.2 esitetyt taipumat ja moduulit.



Kuva 5.23. Koalueiden ja vertailualueen takaisinlasketut pintamoduulikuvaajat.

Sidotuilla kerroksilla käytetty moduuli oli tarkastelussa 4000 MPa ja pohjamaalla käytetty moduuli 100 MPa. Taulukosta 5.2 voidaan havaita laskettujen taipumien olevan lähes kaksinkertaiset mitattuihin taipumiin nähden. Lasketut taipumat jäävät pienemmiksi, mikäli asfaltilla ja pohjamaalla käytetään suurempia moduuleja. Yhdessä pintamoduulikuvaajien kanssa tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että stabiloiduissa kerroksissa on todennäköisesti tapahtunut lujittumista vielä rakentamisen jälkeenkin melko paljon.

Kymmenen vuoden kuluttua rakentamisesta katu oli hyvässä kunnossa. Pudotuspainomittauksilla määritetyt kantavuudet ylittivät tavoitekantavuudet selvästi.

Taulukko 5.1. Viikin savikatu. Kantavuusmittausten tulokset.

Kantavuudet savikerroksen päältä 22.7.1997								Syksy 2007			
Pl	sideaine	E2, savik., oik., 22.7.1997	suunta	E2, savik., vas., 22.7.1997	suunta	huom	Mr (θ = 50 kPa)	E ₀ , MPa 11.9.07	E, MPa lt-korjattu 11.9.07	E, MPa, stab. savi	E, MPa, murske
210	E1	154	oik	145	vas		48	684	695	151	173
230	E1/Se+CaO	210	oik	199	vas	siirtymäkohta					
250	Se+CaO	172	oik	155	vas		146	843	858	196	220
270	Se+CaO+JMk+Se	137	oik	153	vas	siirtymäkohta					
290	JMk+Se	242	oik	177	vas		300	1050	1067	221	265
310	sora	195	oik	184	vas	siirtymäkohta					
	vertailurakenne							929	944	183	221
Kantavuudet päällysteen päältä 22.4.1999								Syksy 2007			
Pl	sideaine	E2, pääll.a. osa., oik., 22.4.99	suunta	E2, pääll.a. osa., vas., 22.4.99	suunta	huom	Mr (θ = 50 kPa)	E ₀ , MPa 11.9.07	E, MPa lt-korjattu 11.9.07	E, MPa, stabi-loitu savi	E, MPa, murske
210	E1	335	oik	354	vas		48	684	695	151	173
230	E1/Se+CaO	407	oik	398	vas	siirtymäkohta					
250	Se+CaO	390	oik	348	vas		146	843	858	196	220
270	Se+CaO+JMk+Se	455	oik	375	vas	siirtymäkohta					
290	JMk+Se	375	oik	425	vas		300	1050	1067	221	265
310	JMk+Se	368	oik	290	vas						
	vertailurakenne							929	944	183	221

Taulukko 5.2. Viikin savikatu. Lasketut taipumat ja moduulit sekä havaitut taipumat.

Rakenne/materiaali	Laskettu taipuma d ₀ , μm	Materiaalin moduuli, MPa	Mitattu taipuma d ₀ , μm
E1	548	51	287
Se + Cao	404	146	224
JMk + Se	336	285	180

5.7 Johtopäätökset koerakenteista

Koerakenteet ovat kaikki toimineet paremmin tai vähintään yhtä hyvin kuin vastaavat vertailurakenteet, joissa toimenpiteitä ei ole tehty.

Pohjamaan homogenisointi (tai tasalaatuistaminen) on menetelmä, jossa pohjamaan kivet poistetaan routimattomaan syvyyteen. Pinta on syytä tiivistää ennen rakennekerrosten rakentamista. Varsinaista laitteistoa homogenisointiin ei ole kehitetty vaan se on tehty yleensä kaivukoneella. Menetelmää on käytetty alueellisesti. Menetelmä paikalla tehtävänä on edullinen, massataloudellinen ja helppo tapa parantaa rakenteen toimivuutta merkittävästi. Laajempi käyttö helpottuisi, jos menetelmää ja siihen soveltuvia laitteistoja olisi erikseen kehitetty. Myös menetelmän yksityiskohtaisempi kuvaus ja ohjeistus edesauttaisivat menetelmän käyttöä.

Myös pohjamaan ja heikkolaatuisten rakennekerros materiaalien stabilointi parantaa yleensä rakenteiden pitkäaikaista käyttäytymistä. Pohjamaan routivuuden parantamisessa stabilointisyvyys on tärkeämpi kuin sideaineen määrä. Stabilointiin soveltuvia koneita on kehitetty viime aikoina merkittävästi. Menetelmä lisää ympäristövaikutuksia, erityisesti sideaineiden valmistuksesta ja kuljettamisesta johtuen. Myös sideaineiden hinnat ovat viime aikoina nousseet, joten menetelmän taloudellisuus on heikentynyt. Rakennekerrosten stabilointi voi jonkin verran vaikeuttaa katurakenteiden purkamista ja kerrosten alla olevien mahdollisten putkien korjausta.

Raudoitteiden ja lujitteiden käyttö lisää selvästi rakenteiden käyttöikää ja pienentää niiden vaurioitumista erityisesti heikkolaatuisten materiaalien käytön yhteydessä /Korkiala-Tanttu et al. 2003/. Erityisen käyttökelpoisia lujitteet ja raudoitteet ovat silloin, kun halutaan vähentää rakenteiden vaurioitumista halkeilun johdosta. Lujitteiden ja raudoitteiden käyttö rakenteissa haittaa kuitenkin putkistojen korjaustöitä, joten niitä ei suositella katurakenteisiin. Jos lujitteita käytetään lähellä rakenteen pintaa, myös uudelleen päällystäminen voi olla ongelmallista.

6 Moreenin laskennallinen käyttäytyminen tierakenteissa

6.1 Tarkastelujen taustaa

Uudet InfraRYL ohjeet mahdollistavat ns. märkien materiaalien käytön yhdessä kuivatuskerrosten kanssa tierakenteessa /Rakennustieto 2006/. Laskennallisilla tarkasteluilla oli tavoitteena selvittää kuivatuskerrosten sijoittamisen vaikutus näissä ns. sandwich-rakenteissa, jossa jakavan kerroksen materiaalina on käytetty moreenia. Toisena tavoitteena oli selvittää, miksi Männikkövaaran koerakenne (kuvaus luvussa 5.2) on käyttäytynyt niin hyvin kuin se on käyttäytynyt melko suuresta tasaisesta routanoususta huolimatta. Männikkövaaran moreenia voidaan pitää eräällä tavalla ”jalostettuna” materiaalina, koska se on seosmoreenia.

Tarkastelut tehtiin seosmoreenille (kantavan kerroksen materiaali oli yhdistetty jakavan kerroksen moreeniin) sekä pohjamaana olleelle moreenille. Liitteessä 2 on esitetty laskelmissa käytettyjen vedenimu- ja vedenläpäisevyysarvojen määrittäminen laskennassa käytetyille moreeneille. Laskennalliset tarkastelut ovat yksityiskohtaisesti esitetty liitteessä 3.

6.2 Tulosten arviointi

Materiaalin kosteuskäyttäytyminen ja vaikutus routanousuun

Tarkastelujen perusteella seosmoreenin alle tehtävä kuivatuskerros on hyödyllinen ja se alentaa kauttaaltaan perusmaan pinnan vesipitoisuutta noin 0.5 metrin paksuisessa kerroksessa. Vaikutussyvyys riippuu luonnollisesti pohjavedenpinnan sijainnista ja vaihtelusta. Tien keskilinjalla vesipitoisuuden alentuminen on noin 7 til-% yksikköä. In-situ jäätymislaajenemiseen tämän vaikutus on kuitenkin vain $h_r = h \cdot w\text{-til} \cdot 0,09 = 0,5 \cdot 0,07 \cdot 0,09 = 0,003$ m.

Keskiosan kuivatuskerros on puolestaan hyödyllinen, koska se pienentää sekä sen yläpuolisen että alapuolisen kerroksen vesipitoisuutta. Tien keskilinjalla vesipitoisuuden alentuminen yläpuolisen kerroksen alaosassa on noin 8 til-% yksikköä ja alapuolisessa kerroksessa noin 4 til-%-yksikköä. In-situ jäätymislaajenemiseen näiden vaikutus on kuitenkin vain $h_r = h \cdot w\text{-til} \cdot 0,09 = 0,7/2 \cdot 0,08 \cdot 0,09 + 0,7 \cdot 0,04 \cdot 0,09 = 0,005$ m.

Vaakasuuntaisista kuivatuskerroksista on hyötyä myös muiden laadullisten seikkojen suhteen. Ne pienentävät rakennusvaiheessa materiaalien olosuhdeherkkyyttä jonkin verran ja mahdollistavat kerrosrakenteen nopeamman kuivumisen sekä rakentamisen että käytön aikana. Moreenikerroksen alla oleva kuivatuskerros, edellyttäen että siinä oleva vesi pääsee purkautumaan, joko luonnollisesti tai salaojitettuna, asettaa myös ylärajan pohjaveden pinnan vaikutukselle. Esimerkiksi Männikkövaarassa seosmoreenin vesipitoisuudet olisivat todennäköisesti olleet korkeampia, ellei kuivatuskerros leikkaisi tierakenteen alla vaikuttavan vedenpinnan tasoa.

Perustapauksissa tarkastelluilla vaakasuuntaisilla kuivatuskerroksilla ei juuri pystytä vaikuttamaan tien poikkisuuntaiseen vesipitoisuuteen. Tien poikkisuuntaisessa tarkastelussa perustapauksen rakenteet käyttäytyvät samalla lailla, eli kantavan kerroksen vesipitoisuus kasvaa luiskaa lähestyttäessä. Jonkin asteinen paranus tähän on saatavissa, kun kerrosrakenteen luiskan ja luiskatäytteen väliin tehdään kuivatuskerros. Tällaisella kuivatuskerroksella vesipitoisuus saadaan tasaantumaan luiskaa lähestyttäessä, mutta kosteutta jää yhä jonkin verran rakenteeseen. Selvästi kuivempi rakenne saadaan, kun kantavan/jakavan kerroksen allekin tehdään suodatinkerros. Rakenteessa käytetyillä materiaaleilla kantavan/jakavan kerroksen keskellä maksimivesipitoisuus vaihtelee keskilinjalla 16 til-%:sta (min 12,5 til-%) reuna-alueen 19 til-%:iin (min 14 %). Kantavan alle ja luiskaan tehtävän kuivatuskerroksen vaikutuksesta vesipitoisuudet ovat tasaisia, pienimmillään 12 til-% ja suurimmillaan 15,5 %. Vesipitoisuus laskee siis 0,5 - 3,5 til-% yksikköä eli käytännössä keskilinjalla ero on 0 p-% ja luiskan lähellä n. 2 p-%. Tämän pienemmäksi kantavan kerroksen materiaalin vesipitoisuus ei kuitenkaan laske vaikka seosmoreenia ei ole rakenteessa lainkaan.

Rakenteen käyttäytymisen arviointi

Esimerkkiin valittu kantavan kerroksen sora murske ei ole kovin herkkä kosteuspitoisuuden vaihteluille moduulin suhteen. Sen sijaan lajittuneemmalla sora murskeella moduulien ero voi olla käytännössä alhaisimman (w 1,8 %, $M_r = 320$ MPa) ja korkeimman vesipitoisuuden (w 13 %, $M_r = 260$ MPa) välillä luokkaa 80 MPa. Kantavassa kerroksessa tämä heijastuisi n. 7 % suuruisena erona kantavuudessa. Kantavan kerroksen sora murskeen moduulin ollessa 320 MPa kantavuus on

228 MPa ja moduulilla 240 MPa 212 MPa. Rakentamisvaiheen laskennassa kantavuudeksi on saatu 199 MPa, kun moduuli on ollut 200 MPa. Tämä tarkastelu esittää siis jonkinlaista ääriarvoa, minkä kantavan kerroksen vesipitoisuusvaihtelu voi aiheuttaa. Kohteessa laskettu vesipitoisuus ei vaihtele näin suurissa rajoissa, eikä materiaali ole siis yhtä herkkä vesipitoisuusvaihteluille. Laskelmissa seosmoreenikerroksen vesipitoisuuden vaihtelua ei olekaan huomioitu. Parhaiten kuivattetussa rakenteessa (VE8) seosmoreenin laskennallinen vesipitoisuus on kauttaaltaan luokkaa 26 til-%, kun se nykyisessä rakenteessa (VE1) on luokkaa 30 til-%.

Tarkasteltu koekohde on käyttäytynyt havaintojen perusteella verraten hyvin. Routanousut ovat olleet tasaisia ja tiekin verraten tasainen. Tasaista routanousua ei kuitenkaan voida lukea sen paremmin seosmoreenin ansioksi kuin syyksikään. Laskennallisten tarkastelujen perusteella erilaisilla kuivatusratkaisuilla voidaan jonkin verran vaikuttaa rakenteen sisältämään vesimäärään, mutta vaikutukset sinällään esimerkiksi routanousun suuruuteen ovat vähäiset, koska moreeni materiaalina on niin dominoiva rakenteen kosteuskäyttäytymisen suhteen. Hyvin todennäköinen syy rakenteen tasaiseen routanousuun on se, että kohteessa talven pakkasmäärä on yleensä niin suuri, että routa tunkeutuu myös tien luiskissa pohjamaahan asti, ja routanoususta muodostuu näin melko tasainen.

Kuivatusratkaisuilla sen sijaan saadaan tien poikkisuuntaista kantavuutta tasoitettua merkittävästi kantavan kerroksen kosteustilan kautta. Kantavan kerroksen alle tehtävä suodatinkerros yhdessä luiskaan tehtävällä vinokuivatuskerroksella pienentää ja tasoittaa paitsi kantavan kerroksen vesipitoisuuden myös seosmoreenikerroksen vesipitoisuutta. Nämä parantavat rakenteen homogeenisuutta ja vähentävät herkkyyttä ilmastorasitusta vastaan.

7 Vuoreksen pilot-kohde

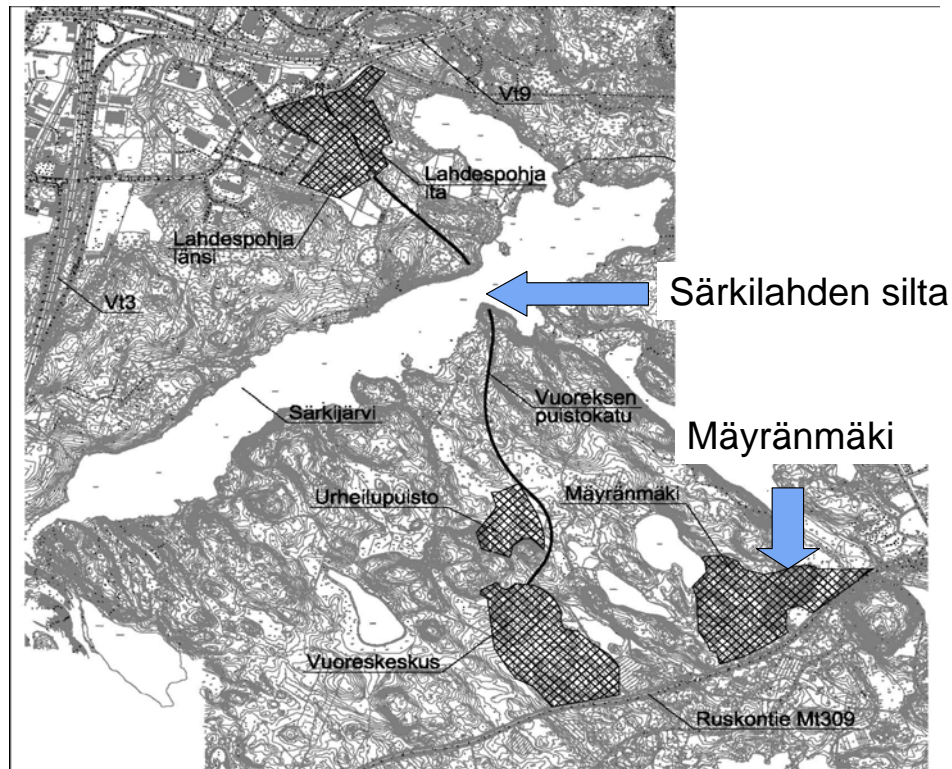
7.1 Kohteen esittely ja tutkimuksen tavoitteet

Vuores sijaitsee Tampereen ja Lempäälään rajalla ja on niiden yhteinen aluerakentamiskohde. Vuores on suurimpia kaupunkirakentamishankkeita Suomessa 2000-luvulla. Alue on suunniteltu toteutettavaksi huipputeknologian ja luonnonläheisyyden yhdistävällä tavalla. Alueelle rakennetaan suunnitelmien mukaan vuoteen 2015 mennessä asunnot yli 13 000 asukkaalle ja toimitilat 3 000 - 5 000 työpaikalle. Vuorekseen rakennetaan nykyaikaisella huipputekniikalla varustettuja asuntoja: pienkerrostaloja, rivi-, pari- ja omakotitaloja. Tampereen kaupunki on perustanut erillisen Vuores-projektin, joka on vastuussa alueen suunnittelusta ja rakentamisesta /www.tampere.fi/vuores/.

Vuoreksen alue sisältää useita eri vaiheessa rakennettavia kohteita esim. Vuoreskeskus, Lahdespohja, Mäyränmäki. Ensimmäisenä rakennustyö alkaa Mäyränmäen alueelta. Kunnallistekniikan rakennustyöt alkanevat loppuvuodesta 2008.

Vuoreksen alueella tullaan käsittelemään yhteensä yli 1,5 milj. m³ maa-aineksia ja varovaisestikin arvioituna ylijäämämassojen määrä tulee kohoamaan lähelle miljoonaa m³. Vastaavasti alueelle joudutaan tuomaan rakennekerrosmateriaaleja noin miljoonan m³ verran. Alueelle suunniteltiin maapankkitoimintaa, jotta koko alueen massataloutta voidaan parantaa siten, että kuljettavien massojen määrä vähenisi merkittävästi.

Aloitusalue Mäyränmäki tulee olemaan suunnitelmien mukaan massaylijäämäinen. Sitä vastoin myöhemmin rakennettavilla alueilla on myös massa-alijäämää. Tämä aiheuttaa siis aikataulu- ja varastointiongelmia massataloudelle. Lisäksi Vuores sijoittuu Särkijärven molemmille puolille siten, että massa-alijäämäinen Lahdespohja sijoittuu järven pohjoispuolelle ja muut eteläpuolelle (kuva 7.1). Särkijärven ylittävän sillan rakentamisaikataulu muodostaa ongelman massojen varastoinnille. Sillan rakentamisesta kun on tehty valituksia, eikä rakentamisaikataulua pystytä tämän vuoksi varmistamaan.



Kuva 7.1 Vuoreksen aluerakentamiskohteiden kartta.

HUUMA-projektin tavoitteena oli kehittää menetelmiä heikkolaatuisten maamateriaalien hyötykäytön tehostamiseksi alueella yhdessä Vuores-projektin ja alueen konsultin (Ramboll Finland Oy - myöhemmin Ramboll) kanssa. Tehtävänä oli yhdessä alueen konsultin kanssa arvioida alueen massatasapainoa ja mahdollisuuksia hyödyntää ja jalostaa ylijäämämaterialleja sekä aikataulullisesti ja tilankäytöllisesti. Tehtävänä oli myös arvioida jalostusmenetelmien käytöstä aiheutuvat hyödyt sekä ympäristön, toiminnallisuuden että kustannusten osalta.

7.2 Vuoreksen alueen massojen hallinta

Vuores-projekti aloitti vuonna 2006 massojen hallinnan suunnittelun yhdessä Tampereen kaupungin ja Lempäälään kunnan sekä Rambollin kanssa. VTT tuli mukaan suunnitteluun vuoden 2007 puolella välissä. Ramboll on tehnyt Vuoreksen alueelle massatalouden yleissuunnitelma vuoden 2007 alussa. Tämän perusteella alueelle laadittiin toimintamalliehdotus maapankkijärjestelmästä, johon kaikki alueen toimijat mukaan lukien rakennusliikkeet voisivat osallistua. Rambollilla on olemassa MapInfo-pohjainen maapankkijärjestelmäsovellus, jota pystytään hyödyntämään myös ennen kohteen toteuttamista. Järjestelmää voidaan

käyttää jo alustavassa kaavasuunnitteluvaiheessa ja sen tietoja täsmentää suunnittelun edetessä aina rakentamissuunnitteluun asti.

Tällä hetkellä on olemassa massojen hallinnointiin suunniteltuja ja toimivia nettipohjaisia työkaluja esim. SITO Oy:n MapInfo-sovellus. Ongelmana kuitenkin on, että käytössä olevat työkalut soveltuvat rakentamisen toteutusvaiheeseen ja lyhyen aikajänteen massojen myyntiin työmaalta toiselle, eivätkä niinkään kaavoitus- ja suunnitteluvaiheisiin eivätkä käsittelyalueen tarpeisiin.

Työn yhteydessä Ramboll kehitti kaavavaiheen massojen hallintaa avustavan Excel-työkalun.

Maapankkijärjestelmä oli suunniteltu siten, että Tampereen kaupungin Katu- ja viherrakentamisosasto (KAVI) isännöi sitä. Järjestelmän suunniteltiin palvelevan laajemminkin Tamperetta ja Lempäälää ja niiden lähiympäristöä. Järjestelmän oleellinen osa oli maanvastaanottoalueen perustaminen. Vastaanottoalueella suunniteltiin myös jalostettavan ja käsiteltävän maa-aineksia sekä mahdollisesti raivausmassoja, kantoja ja pienpuustoa. Suunnitteluvaiheessa käytiin läpi vaihtoehtoisia maanvastaanottoalueita, maapankkijärjestelmän ja -organisaation perustamista, kulunvalvonnan sekä vastaanotto- ja käsittelymaksuja. Ensisijaisena vastaanottoalueena tutkittiin Lehtivuoren aluetta Lempäälään puolella. Myös esimerkiksi alueen puistoja (esim. Liikuntapuisto) suunniteltiin käytettävän ylijäämämuiden varastointiin rakennustöiden aikana. Periaatteena vastaanotto- ja käsittelymaksujen osalta oli, että tavoitellaan vain toiminnan kustannukset kattavaa 0-hintatasoa. Massatietoja suunniteltiin hallintavaksi oman massojen hallinnointityökalun avulla. Jokainen osapuoli - myös alueen rakennusliikkeet - voisivat toimittaa tietoja järjestelmään. Massatiedot olisivat suunnitelman mukaan ilmaisia. Myös alueen pintamaiden, kantojen, pienpuuston sekä mahdollisten asfalttien käsittely- ja varastointi oli suunniteltu hallinnoitavaksi organisaation kautta.

Maapankkitoiminta varten olisi tarvittu sekä ympäristölupia että toimenpidelupia koskien maisemanhoidollisia täyttöjä tai raivausta (puusto, pienpuusto ja kannot). Tavoitteena oli saada toiminta pyörimään vuoden 2008 alkupuolella ja vastaanottoalueiden rakentaminen piti aloittaa huhtikuussa 2008. Suunnitteluvaiheessa sovittiin, että Tampere ja Lempäälä vastaisivat tarvittavien lupien hankkimisesta omilla alueillaan.

Maapankkijärjestelmä suunnitellussa muodossaan kariutui vuoden 2008 alussa, kun Tampereen kaupunki päätti kilpailuttaa koko Vuoreksen alueen katurakennustyöt. Tällöin KAVI katsoi, ettei sillä ole riittäviä toiminnan edellytyksiä massapankkiorganisaatiossa. Kilpailuttamistilanteessa KAVIn työosuudet katurakennustöissä olivat siis epävarmoja. Jatkossa selvitettäviä seikkoja on se, tarjotaanko tätä toimintaa jollekin kolmannelle osapuolelle tai yksityiselle toimijalle. Tällöin ongelmaksi saattaa muodostua se, että alueella toimiva yksityinen toimija saa selvän etulyöntiaseman alueen urakkakilpailuissa. Vaihtoehtona voi olla toteuttaa osa-alueiden maapankkijärjestelmiä esimerkiksi alueeltaan suuremmissa Vuoreskeskuksessa. Kaupunki voisi myös edellyttää tonttien luovutusehdoissa alueen urakoitsijoita järjestämään asian. Esimerkkinä tästä on Helsingin Jätkäsaaren alueella toteutettu logistiikkaehto luovutusehdoissa. Suunniteltavaksi jäi lisäksi, otaanko Rambollin tekemä massojen hallinnantyyökalu käyttöön jossain muodossa.

7.3 Moreenin hyötykäyttömahdollisuuksia Vuoreksessa

Mäyränmäen alueella on tehty pohjatutkimuksia katujen alueella sekä yksittäisiä tutkimuksia tonttien alueelta. Tutkimukset ovat pääasiassa paino- ja porakonekairauksia. Myös 11 häiriintynyttä näytteenottoja on tehty, joista on määritetty rakeisuudet ja GEO-luokituksen mukaiset maalajit. Tutkimusten mukaan leikkausmassoista pääosa on savista silttiä ja laihaa savea. Myös liejuisia silttejä havaittiin. Palkkionmaankadun alueella oli myös jonkin verran moreenia, joka on pääosin soraista hiekkamoreenia. Moreenin kivisyyttä on vaikea arvioida, koska kairauksissa on vain muutamia mainintoja kivistä. Tunnetusti Tampereen seudun moreenit ovat kivisiä, jonka myös maastokäynti Mäyränmäkeen (kuva 7.2) osoitti. On siis todennäköistä, että maakerroksissa on yksittäisiä kiviä ja jopa lohkaraita. Pintamaan erottaminen erikseen käytettäväksi voi olla erittäin hankalaa. Pintamaa, joka sisältää vaihtelevasti humusta, silttiä ja moreenia, saattaa paikoitellen olla paksumpi kuin yleensä oletettu 0,2 m. Mäyränmäen alue on suunnitelmien mukaan massaylijäämäinen, ja leikkausmassoja on massatalouden yleissuunnitelmassa arvioitu syntyvän noin 74 000 (m³ltr).



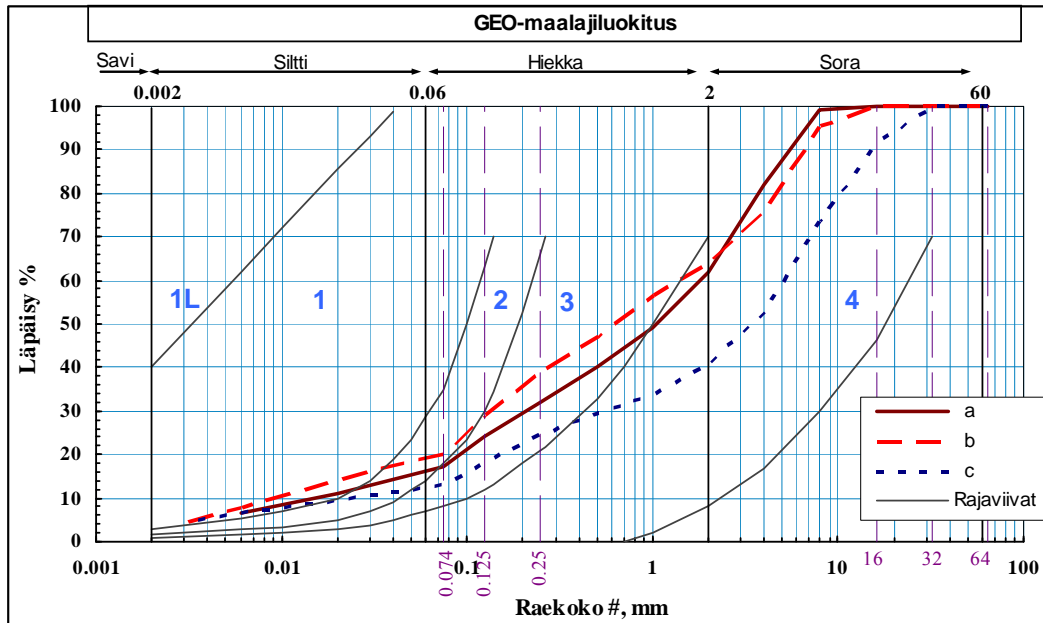
Kuva 7.2. Mäyränmäen alueen pinnanmuotoja ja irtokiviä.

Metsän hakkuun kilpailuttaa Tampereen kaupungin kiinteistötoimi. Mäyränmäen alueen katusuunnitelmien perusteella alueen moreenia voisi hyöty käyttää jalostamattomana alueen sekalaisissa täytöissä, meluvalleissa sekä luiskatäytöissä. Erityisesti, jos moreenista poistetaan ylisuuret kivet, on se varsin käyttökelpoista. Osa alueen kivistä ja lohkaraita on suhteellisen suurikokoista, joten saattaa olla tarpeen rikottaa tai jopa räjäyttää ne ennen täyttötöitä. Tämä saattaa tarvita myös lupaa.

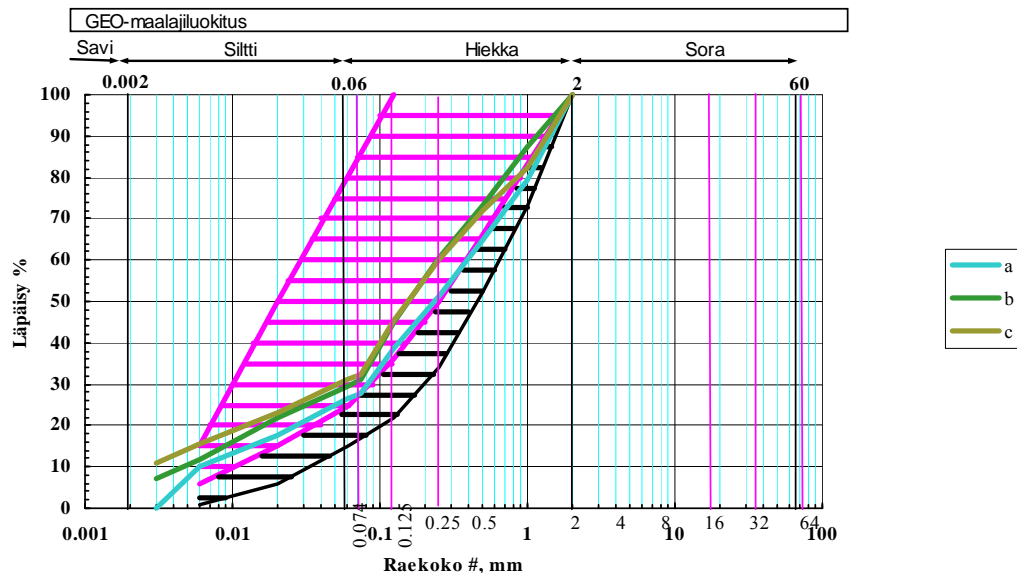
Alueen moreenia voitaisiin käyttää jalostettuna esimerkiksi alueiden kevyenliikenteen väylien täytöissä sekä niiden kerrosrakenteissa (kts. tyyppirakenteet luvussa 10) muun muassa Hupakonkorvenpuisto ja Mäyränmäenpuiston väylissä.

Lisäksi moreenia voitaisiin sijoittaa tonttien piharakenteisiin (kts. tyypirakenteet luku 10). Moreenien osalta tutkittiin kolmea eri jalostusmenetelmää: murskaus, hienoaineksen poistoa sekä sekoitusta toisiin materiaaleihin.

Alueen moreeni on rakeisuuskäyrien (käyrät a, b ja c) routivuusluokituksen mukaan arvioituna routivaa (kuva 7.3). Myös Beskowin routivuuskriteerin mukaan (kuva 7.4) moreeninäytteet (3 kpl) ovat routivia.



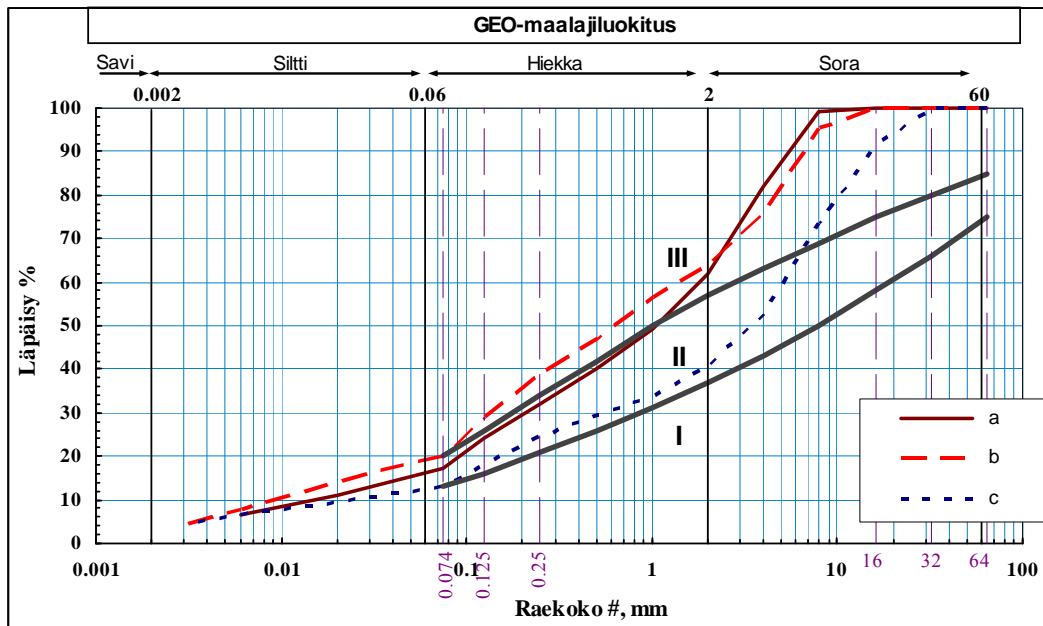
Kuva 7.3. Moreenien routivuus tavanomaisen routivuusluokituksen mukaan.



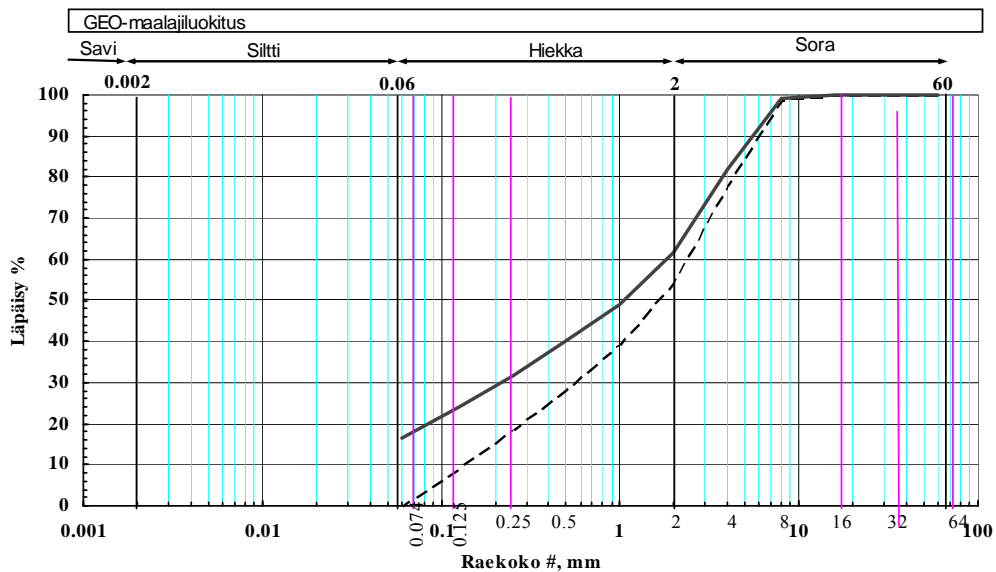
Kuva 7.4. Moreenien routivuus Beskowin moreenien routivuuskriteerin mukaan.

Vuoreksen moreenit kuuluvat hienoaineksen perusteella Tie ja vesirakennushallituksen luokituksen /1986/ mukaan (kuva 7.5) murskauskelpoisuusluokkaan II ”Määrätyin edellytyksin murskauskelpoinen moreeni”. Mutta koska moreenit eivät täytä kivisyysvaatimusta (kivisyys yli 15 %) kuuluvat ne luokkaan III ”Moreeni ei ole murskauskelpoinen”. Tiedossa ei ole, onko rakeisuusmäärittystä

tehtäessä poistettu # 32 mm suurempi aines. Jos näytteissä on ollut yli # 32 mm rakeita, se saattaa olla murskauskelpoista.



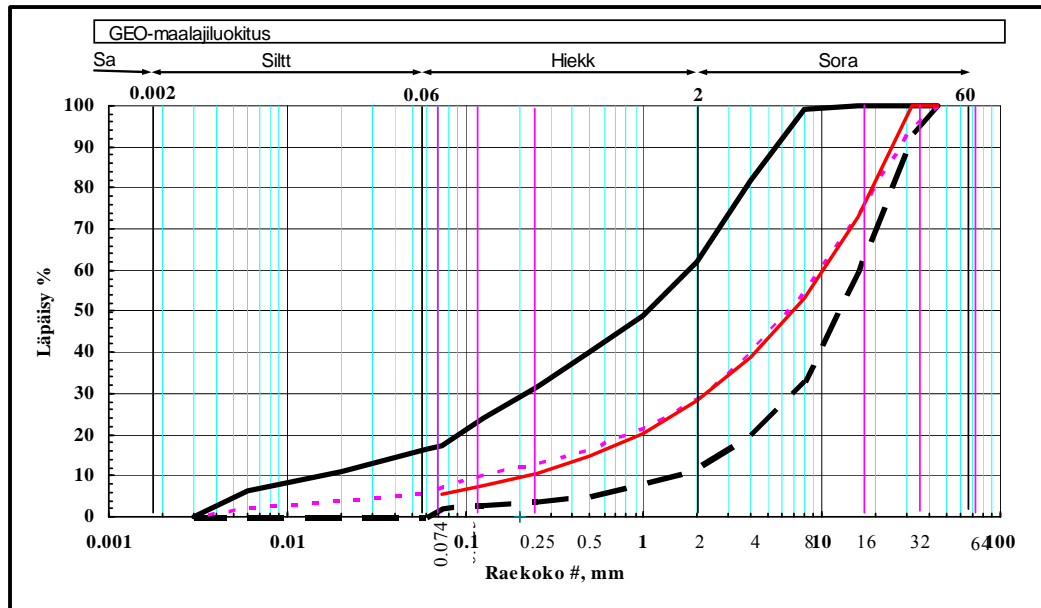
Kuva 7.5. Moreenien murskauskelpoisuusluokitus TVH:n mukaan /Tie ja vesirakennushallitus 1986/.



Kuva 7.6. Moreenien rakeisuus (rakeisuuskäyrä a musta viiva) hienoaineksen poiston jälkeen (katkoviiva).

Toisena jalostusvaihtoehtona tutkittiin moreenin hienoaineksen poistoa (kuva 7.6). Hienoaineksen poisto ei juuri karkeuta materiaalia (esimerkkinä rakeisuusnäyte a), joten sitä ei kannata ainakaan yksinään käyttää.

Kolmantena vaihtoehtona selvitettiin moreenin sekoitusta toisen materiaalin kanssa. Kun moreenia (esimerkkinä rakeisuus a) sekoitetaan karkeampaan murskeeseen suhteessa 1:2 eli (kolmasosa on moreenia), saadaan routimaton ja kantava materiaali (kuva 7.7), jota voidaan käyttää jopa kantavassa kerroksessa.



Kuva 7.7. Moreeni a (musta viiva) sekoitetaan karkean murskeen kanssa (musta katkoviiva)saadaan punainen katkoviiva.

7.4 Luonnonmateriaaleja vai murskattuja materiaaleja - vertailu Vuoreksen olosuhteissa

Tutkimuksessa vertailtiin Vuoreksen alueella olevan piharakenteen toteuttamista vaihtoehtoisesti luonnonmateriaaleilla (sora) sekä murskatuilla materiaaleilla. Näiden materiaaleilla tehtyjen rakenteiden oletettiin olevan tyypillisiä ko. koh-teessa. Vertailu tehtiin kustannusten ja ympäristövaikutusten osalta. Vertailua ei tehty toimivuuden eikä toteuttavuuden kannalta, vaan niiden oletettiin olevan yhtäläiset kummallakin materiaalivaihtoehdolla. Vertailussa käytettiin Vuoreksen alueen tyypillisiä kuljetusmatkoja sekä alueen kustannustietoa. Tiedot saatiin Ramboll Tampereelta. Piharakenne mitoitettiin Vuoreksen olosuhteisiin siten, että sallittuna routanousuna käytettiin 70 mm ja pohjamaan kertoimena $t = 12\%$. Rakennevaihtoehtojen materiaalit, kerrospaksuudet, kuljetusmatkat ja hinnat rakenteessa on esitetty taulukossa 7.1. Kustannusarviossa on oletettu, että hinnat ovat urakkahintoja suljetulla alueella, eikä ajosta aiheudu haittaa ympäristölle. Sorarakennevaihtoehdossa tutkittiin kahta eri kuljetusmatkaa suodatinkerrokselle (19,8 km ja 27,1 km). Vertailussa käytettiin alueen mittoina: 100 m x 10 m, eli 1000 m². Vaihtoehtojen keskinäisessä vertailussa alueen koolla ei ole merkitystä.

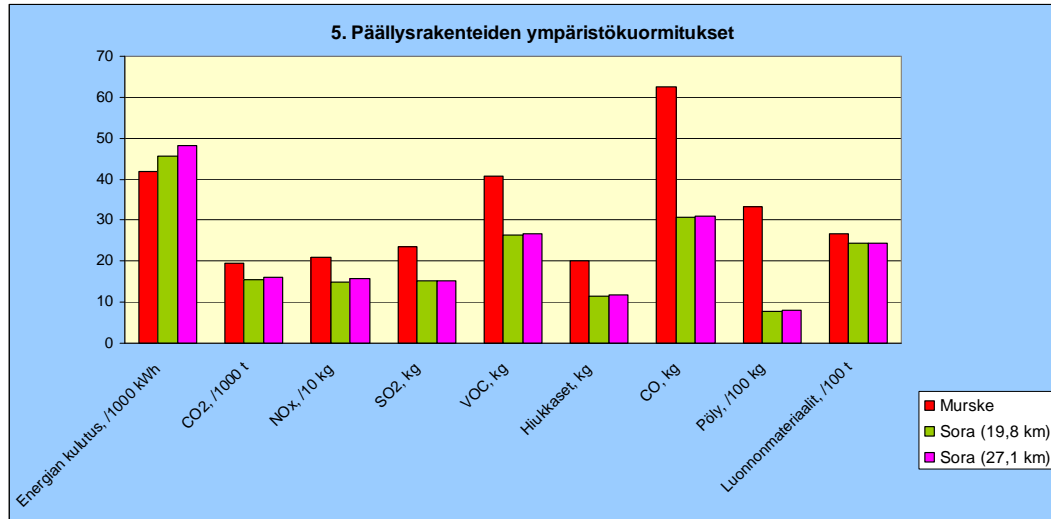
Taulukko 7.1. Tampere piharakennevaihtoehdot. Alue 100 x 10m².

Murskerakenne	Paksuus, mm	Kuljetusmatka	Yksikköhinta rakenteessa €	Yksikkö	Kustannus yhteensä €
AB 16/120	50		8,35	m ²	8 350
Kantava KaM #0/31	200	8,6	26,7	m ³ rtr	5 340
Jakava KaM #0/65 tai 0/90	900	8,6	23,75	m ³ rtr	21 375
Yhteensä	1150				35 065
Sorarakenne					
AB 16/120	50		8,35	m ²	8 350
Kantava KaM #0/31	200	8,6	26,7	m ³ rtr	5 340
Jakava Sr #0...100	300	19,8	17,0	m ³ rtr	5 100
Suodatin, Hk	500	19,8	17,3	m ³ rtr	8 650
Suodatin, Hk	500	27,1	14,6	m ³ rtr	7 300
Kalliomassojen poiskuljetus	-	10	4,1	€/10 km	4 100
Yhteensä	1050				
Kustannukset yhteensä		19,8			31 540
Kustannukset yhteensä		27,1			30 190

Kustannustarkastelun perusteella murskerakenne on noin 10 - 14 % kalliimpi kuin luonnonsorarakenne. Myös sorarakennevaihtoehto, jossa suodatinkerroksen materiaali tuodaan kauempaa, on noin 4 % edullisempi, koska sen yksikkökustannus on pidemmästä kuljetusmatkasta huolimatta edullisempi. Kustannustarkastelussa ja ympäristökuormituksessa on mukana se lisäkustannus, joka aiheutuu tarpeesta kuljettaa ylimääräinen kallioaines pois alueelta noin 10 km päähän. Taulukossa 7.2 ja kuvassa 7.8 on esitetty piharakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset.

Taulukko 7.2. Tampere piharakennevaihtoehdot, ympäristökuormitus.

	Murske	Sora (19,8 km)	Sora (27,1 km)
Energian kulutus, kWh	41 957	45 573	48 119
Polttoaineen kulutus, l	6 175	4 043	4 296
Kuljetusmatka, km	1 763	5 377	6 093
CO₂, kg	19 514	15 423	16 094
NO_x, kg	209	148	157
SO₂, kg	23	15	15
VOC, kg	41	27	27
Hiukkaset, kg	20	12	12
CO, kg	62	31	31
Pöly, kg	3 317	773	798
Meluaika, dBAh	15 669	16 196	17 198
Luonnonmateriaalit, t	2 674	2 444	2 444



Kuva 7.8. Tampere piharakennevaihtoehtojen ympäristökuormitus Meli-ohjelmalla.

Murskerakenteen päästöt ilmaan osoittautuivat merkittävämmiksi kuin luonnonmateriaalin, vaikka luonnonsora kuljettiinkin noin 20 km etäisyydeltä. Sen sijaan energiankulutus oli murskerakenteella pienempi. Myös sorarakennevaihtoehto, jossa suodatinkerroksen materiaali tuotiin 27 km etäisyydeltä, oli ilmapäästöjen osalta ympäristöystävällisempi kuin murskerakenne. Vertailussa ei oletettu huomioon soramuodostumien käytöstä aiheutuvia välillisiä ympäristövaikutuksia. Ongelmana voi lisäksi olla luonnonmateriaalien saatavuus.

7.5 Hyötykäytön ongelmia Vuoreksessa

Vuores-pilotissa tuli esille monia heikkolaatuisten materiaalien hyötykäytön estettä tai ongelmia, joihin hyötykäyttösuunnitelmat helposti kariutuvat. Tässä tapauksessa esiin nousivat erityisesti lupakäytännöt, niihin ja kaavoitukseen liittyvät valituskierrokset, aikataulu- ja varastointitilakysymykset, kilpailuttamisvaatimukset, ympäristöllisten ja taloudellisten kannustimien puute sekä se, että heikkolaatuisten materiaalien jalostamisen työtekniikoita, tuotteita tai menetelmiä ei ole tuotteistettu. Muita syitä ovat myös riskien jakamisen periaatteiden puuttuminen.

Aluerakentamiskohteissa merkittävä asia valmisteluvaiheessa on kaavoituksen ja lupien hankinnan hallinta. Kohteiden kaavoista valitetaan helposti ja usein valitusten käsittely kiertää kaikki oikeusasteet, jolloin päätöksenteko siirtyy epämääräiseen tulevaisuuteen. Aluerakentamiskohteissa ongelmana on lisäksi, että alueella on yhtä aikaa monta toimijaa rakentamassa eri tontteja ja katu- yms. rakennuskohteita. Jokaisella toimijalla on omat tapansa hoitaa massatalouttaan ja materiaalien hankinta perustuu omiin maanottoipaikkoihin tai omiin hankintaverkostoihin. Jokainen yksittäinen toimija optimoi omaa osaprojektiaan erityisesti taloudellisuuden kannalta, eikä tästä helpolla synny koko alueen yhteistä hyvää tavoittelevaa tulosta. Lisäksi alueellisesti on ajoittain kustannusvääristymiä kuljetusmarkkinoilla johtuen kysynnän epätasaisuudesta muualla. Massatalouden kokonaisuuden hallintaan tarvitaan siis uusia ja riittävän ohjaavia tekijöitä. Näitä ohjaavia tekijöitä voisivat olla mm. lähellä olevien maanvastaanottoaipaikkojen hintataso, erilaiset jäteveromaksut sekä tarjouspyyntövaiheessa esitetyt vaatimukset, ympäristövaikutusarvioinnit tai suositukset massojen käsittelylle.

Tässä pilotissa suunnitellulla massapankkijärjestelmällä olisi ollut hyvät mahdollisuudet hallinnoida Vuores-alueen massoja. Suunnitelma kaatui kuitenkin Tampereen kaupungin päätökseen kilpailuttaa koko alueen katurakennusurakat. Eli siis julkista sektorilta lain mukaan edellytetty kilpailuttaminen rajoittaa tällaisten julkisen sektorin alaisuudessa toimivien, ei voittoa tavoittelevien massapankkiorganisaatioiden syntymistä. Vaihtoehtona voisi olla tarjota tätä toimintaa yksityiselle sektorille, mutta se edellyttää maanvastaanottoaikoiksi soveltuvien alueiden tarjontaa.

Eräs mahdollisuus hallinnoida eri alueiden massoja paremmin olisi esirakentaa aluerakentamiskohteita tiettyyn tasoon. Ajatuksena olisi siis, että eniten ongelmia ja lupia vaativat rakennuksen työvaiheet sisältäen maamassojen pääasiallisen käsittelyn (pöly, melu, tärinä) pystyttäisiin hoitamaan keskitetysti.

8 Tuotannolliset, taloudelliset, ympäristölliset ja toimivuusarvot vertailurakenteille

8.1 Yleistä

Tutkimuksessa vertailtiin tie-, kevyenliikenteen ja piharakenteiden vaihtoehtoisia toteutuksia siten, että rakenteissa on hyödynnetty **lievästi routivaa moreenia esim. soraista hiekkamoreenia**. Sen lisäksi vertailtiin tierakenteita, joissa pohjamaana olevaa moreenia oli käsitelty eri tavoin. Katurakenteet jätettiin pois, koska tierakenteen voidaan katsoa edustavan suhteellisen hyvin samankaltaista rakennetta. Toisaalta katurakenne on selvästi vaativampi rakenne kuin tierakenne silloin kun siinä on mukana reunakiviä tai/ja putkijohtoja. Katurakenteita on tarvetta purkaa ja uudelleen rakentaa pieninä kaistoina esim. putkistojen liittymätöissä, siksi niihin ei suositella lujitteita. Eri vertailurakenteiden tuotannollisia seikkoja, taloudellisuutta, ympäristövaikutuksia ja toimivuutta vertailtiin keskenään laskennallisesti.

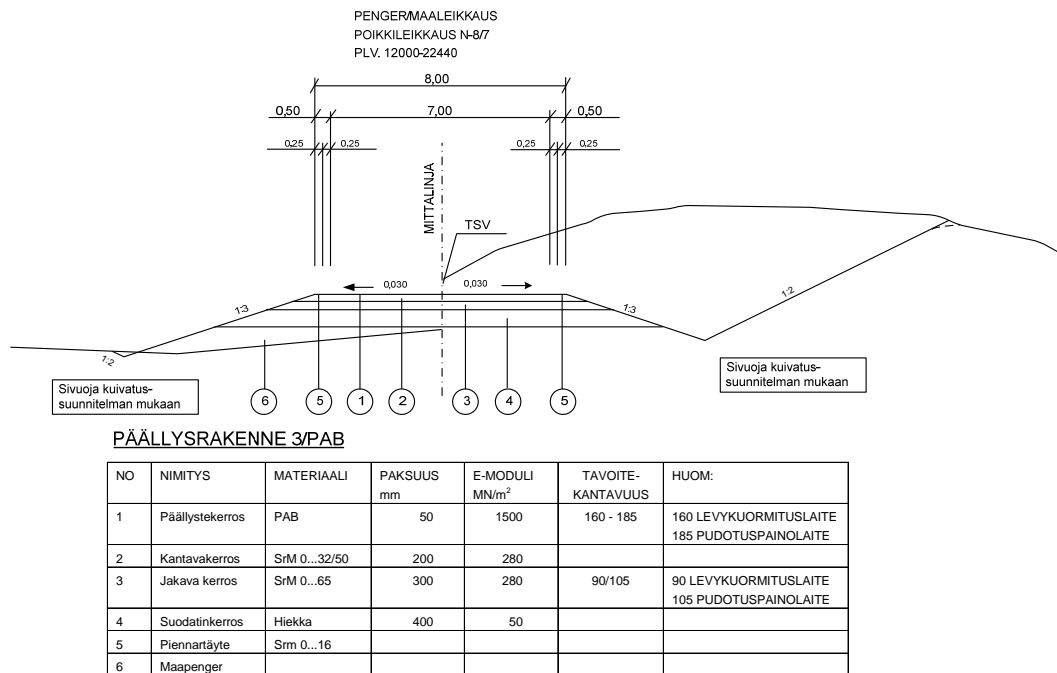
8.2 Tierakenne

Valittu tierakenne vastaa kerrospaksuuksiltaan Kiuruveden toteutettua koerakennetta. Tien leveys oli 8 metriä (päällyste 7 metriä). Rakenteen sivuluiskien kaltevuus oli 1:3. Vertailussa laskettujen rakenteiden pituudet olivat 100 metriä. Tierakenteelle vertailtiin vaihtoehtoa, joissa pohjamaana olevaa moreenia käsiteltiin siten, että päällysrakenteita voitiin ohentaa (A-sarjan rakenteet). Toisena vaihtoehtosarjana (B) tutkittiin rakenteita, joissa jalostettu/käsitelty moreeni sijoitettiin rakenteen jakavaan kerrokseen. Lisäksi tutkittiin vaihtoehtoa, jossa tehostettiin rakenteen kuivatusta (C). Rakenteita verrattiin ns. perusrakenteeseen, eli nykyisten ohjeiden mukaisesti suunniteltuun rakenteeseen (A.2), jonka tyyppiin perustusta on esitetty kuvassa 8.1.

Vertailtavat rakenteet olivat:

- A.1. Minimiratkaisu, ei homogenisointia
- A.2. **Perusrakenne:** pohjamaamoreenin homogenisointi 1 m syvyyteen (lisätyövaiheet homogenisointi + maan pinnan tiivistäminen)
- A.3. Karkean kiviaineksen lisäys (vanhojen rakennekerrosten sekoittaminen ja moreenin seassa olevien kivien murskaus) paikalla rakentaen

- A.4.** Karkean lisääminen murskaamalla - kuljetus edestakaisin, kuljetusmatka yhteen suuntaan 10 km
- A.5.** Homogenisointi + stabilointi maan pinnalla sementillä (Wirtgenin laite tai Allu, sementin kuljetusmatka 30 km)
- A.6.** Homogenisointi + stabilointi masuunihiekalla (masuunihiekan kuljetusmatka 60 km), pohjamaan stabilointiin pelkästään masuunihiekkaa 4 % (masuunihiekan valmistuksen päästöt oletettu nollassi, koska se on sivutuote)
- B.1** Perusrakenne 2 (lievästi routivalla moreenilla korvataan rakennekerroksia moreeni 500 mm + 200 mm hiekkaa jätetään suodattimeksi)
- B.2.** Koteloitu moreenirakenne (1 mm HDPE muovikalvo suojattu molemmin puolin kuitukankaalla 1200g/m² + tiivis asfaltti pinnassa)
- B.3** Moreeni + stabilointi masuunihiekalla (masuunihiekan kuljetusmatka 60 km), masuunikuonaa 5 %
- B.4** Moreeni + teräsverkko B500H - 5/8 - 150/200 kantavan ja jakavan välissä
- C.** Kuivatuksen tehostaminen (sivusalaojitus).



Kuva 8.1. Vertailurakenteen tyypipoikkileikkaus A.2.

Taulukko 8.1. Tierakenteiden vertailurakenteet ja niiden työvaiheet.

Vaihtoehto	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	A.6	B.1	B.2	B.3	B.4	C
Päällyste ja paksuus, mm	AB 50	AB 50	AB 50	AB 50	AB 50	AB 50	AB 50	tiivis AB 50	AB 50	AB 50	AB 50
Päällysteen määrä m ³	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Päällysteen kuljetusmatka, km	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Kantava kerros Soramurske 0 - 32/50 paksuus mm	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Jakava kerros, Soramurske 0 - 60	SrM	SrM	SrM	SrM	SrM	SrM	Mr	Mr	Mr	Mr	SrM
Paksuus, mm	300	300	300	300	300	300	500	500	500	500	300
Suodatinkerros, Hk paksuus mm	400	400	400	400	400	400	200	200	200	200	400
Muut toimenpiteet		*	**	†	‡	∩		∩∩	‡‡	***	‡‡‡

* Pohjan homogenisointi sisältää kivien poiston moreenista noin 1 metrin syvyyteen + pinnan tiivistäminen

** Homogenisointi + karkean kiviaineksen lisäys (vanhojen rakennekeroosten sekoittaminen ja moreenin seassa olevien kivien murskaus) paikalla rakentaen

† Homogenisointi paikan päällä + karkean kiviaineksen lisäys murskaamolle kuljetus edestakaisin 10 km

‡ Homogenisointi + YSE Sementin määrä 4 % + sekoitustyö paikan päällä, sideaineen kuljetusmatka 30 km

∩ Homogenisointi + Masuunikuona 4 % + sekoitustyö paikan päällä, sideaineen kuljetusmatka 60 km

∩∩ HDPE muovikalvo 1 mm + kuitukangas 1200g/m² kalvon molemmin puolin

‡‡ Jakavan kerroksen moreeni stabilointi masuunikuonalla 5 %

*** Moreenijakavan kantavan kerroksen päällä teräsverkko B500H - 5/8 - 150/200

‡‡‡ Salaojaputket pituus 200 m, halkaisija 100 mm, kaivot 10 kpl halkaisija 400 mm, korkeus 1 000 mm, ympärillä sala-ojasoraa noin 25 m³.

Tuotantotekniikat

Tuotannollisesti pohjamaan **homogenisointi eli tasalaatuistaminen** on yleensä laatuvaatimuksena Tiehallinnon ohjeiden mukaisesti /Rakennustieto 2006/. Joten rakenne A.1, jossa homogenisointia ei ole, vastaa hieman alimitoitettua rakennetta. On kuitenkin ilmeistä, että homogenisointia ei säännönmukaisesti toteuteta. Homogenisointi on suhteellisen edullinen tapa pienentää koko rakenteen käyttäytymisen epätasaisuusriskiä erityisesti routanousun osalta. Pohjamoreenit saattavat olla epätasalaatuisia jo lähtötilanteessa, joten lopputuloksen laatu riippuu tällöin paljon homogenisointityön tarkkuudesta. Oleellista menetelmän onnistumisen kannalta on, että homogenisoidun rakenteen pinta tiivistetään hyvin. Ongelmana voivat joskus olla suuret kivet ja lohkarit sekä niiden käsittely (siirretäänkö sivuun, rikotaanko, räjäytetäänkö vai viedäänkö pois). Kaikkiaan homogenisointi on olosuhdeherkkä työvaihe, joka pitäisi tehdä suhteellisen kuivissa olosuhteissa.

Karkean materiaalin sekoittaminen moreeniin voidaan tehdä joko paikan päällä tai murskaamalla. Luvussa 4.2 on tarkemmin esitetty sekoittamismenettely. Sekoitettava moreeni on usein varsin epätasalaatuista, joten materiaalien suhteuttamiseen on kiinnitettävä erityisesti huomiota, jotta lopputuloksen laatu pysyy tasaisena. Moreenin kuljettaminen erilliselle murskaamolle tai muulle käsittelyalueelle sekoittamista varten on suhteellisen työläs ja kallis, siksi myös epätodennäköinen vaihtoehto. Sitä voidaan kuitenkin käyttää, jos moreenia on muutenkin tarkoitus säilyttää varastointi- tai käsittelyalueella.

Pohjamaamoreenin **stabilointi** sideaineesta riippumatta on melko harvinaista. Ongelmana ovat menetelmien kehittymättömyys, pohjamaan laadun, kivisyyden ja rakeisuuden vaihtelut, jotka aiheuttavat myös lopputuloksen laadun vaihtelua.

Menetelmä on lisäksi olosuhdeherkkä, joten sen käyttö määrittämissä olosuhteissa on rajoitettua.

Kun moreenia käytetään rakennekerroksissa, on työ tehtävä suhteellisen kuivissa olosuhteissa. Tässä menetelmässä lopputuloksen laadunvaihtelu on paremmin hallinnassa, koska materiaali siirretään kerrosrakenteeksi. Toisaalta laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin pohjamaan osalta.

Rakennettaessa **muovikalvoeristystä** moreenin alle on varmistuttava siitä, että kalvo säilyy ehjänä asentamisen aikana. Levitettäessä moreenia kalvon päälle se on selvästi herkempi olosuhteille, kun vesi ei pääse poistumaan alaspäin. Kalvon asentaminen asettaa myös tiukemmat vaatimukset alla olevien kerrosten tasaisuudelle myös routanousujen suhteen.

Rakennekerrosstabilointi on jonkin verran kehittyneempää kuin pohjamaan stabilointi. Tosin syvyysulottuma kehittyneissä stabiloinnin sekoituslaitteissa on yleensä vain noin 200 mm, joten kovin paksuja rakennekerrospaksuuksia ei yhtenäisenä ole mahdollista stabiloida. Kerrosstabiloinnin laatu on paremmin hallinnassa, koska moreeni levitetään suodatinkerroksen päälle.

Teräsverkkoja käytettäessä ongelmana on niiden asentaminen, lähinnä päällä olevien kerrosten tiivistäminen, siten, ettei verkkoa rikota. Myös verkkorakenteiden alle kaivaminen on hankalaa. Siksi verkkoja ei suositella putkijohtojen päälle. Myös reunakivien ja pylväiden yms. perustusten asentaminen voi olla hankalaa verkkorakenteiden kohdalla.

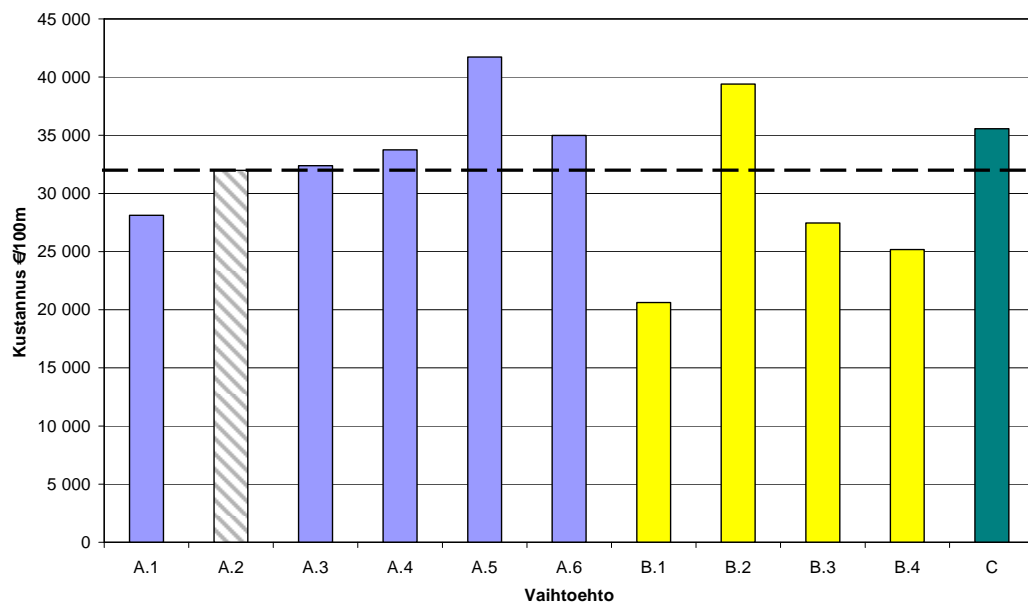
Kuivatuksen tehostaminen sivusalaojilla tai muilla ratkaisuilla on tehokas tapa lisätä rakenteiden käyttöikää. Ongelmana ovat luonnollisesti kuivatuksen rakentaminen, riittävien kaatojen järjestäminen sekä veden ohjaus eteenpäin.

Kustannusvertailu

Vertailurakenteiden kustannuksia vertailtiin euroissa (alv 0 %) sitoumuksetta perustuen usean kilometrin mittaisen tiehankkeen kustannustasoon. Yksikkökustannukset vastaavat kesän 2008 hintatasoa. Kustannusarviohinnat on laskettu tilaajataholla aiheutuvina kustannuksina eli ne sisältävät yleis- ja työkustannukset. Jakavan kerroksen materiaalina kustannusvertailussa on käytetty soramurskeen sijaan kalliomursketta, jota on paremmin saatavilla ympäri maata. Kustannukset vastaavat 100 metriä pitkää tierakennetta. Kustannusvertailu on esitetty taulukossa 8.2 ja kuvassa 8.2. Liitteessä 6 on yksityiskohtaisemmin esitetty kustannuslaskenta eli määrät ja yksikkökustannukset.

Taulukko 8.2. Tierakenteiden vertailurakenteet ja niiden kokonaiskustannukset.

Vaihtoehto Pohjamaan käsitteily	A.1 Ei homo- geni- sointia	A.2 perus- raken- neho- mogeni- sointi	A.3 homo- geni- sointi + karkean lisäys	A.4 homo- geni- sointi + karkea murs- kaamalla	A.5 homo- geni- sointi + YSE stabi- lointi	A.6 homo- geni- sointi + Masuunikuona stabi- lointi	C sala- ojitus
kokonaiskustannus €/100m	28114	31989	32389	33739	41739	34989	35564
Vaihtoehto Jakava kerros moreenia	B.1 perusrakenne		B.2 muovikalvo moreenin alla		B.3 stabilointi masuunikuonalla		B.4 teräsverkko
kokonaiskustannus €/100m	20611		39399		27461		25171
kokonaiskustannus homogenisoituna €/100m	24486		43274		31336		29046



Kuva 8.2. Tierakenteiden vertailurakenteiden kokonaiskustannukset.

Molemmassa tarkasteluserjoissa (A ja B) edullisin rakenne oli yksinkertainen rakenne. Nämä molemmat rakenteet vaativat toimiakseen tasalaatuiset pohjaolosuhteet eli kohteen, jossa pohjamaata ei ole tarpeen homogenisoida. Käytännössä rakenne A.2 olisi toteutettava rakenne, jos pohjamaana on moreenia. Siksi rakenteiden vertailu on tehty suhteessa vertailurakenteeseen A.2. Karkean lisäys paikan päällä nostaisi rakenteen hintaa vain noin 1 % ja murskaamalla hintalisäys olisi noin 5 - 6 %. Karkean lisäys (oletusmäärä noin 8 %) on siis varsin edullinen tapa lisätä rakenteen toimivuutta. Myös masuunikuonastabilointi ja salaojitus ovat kustannustehokkaita tapoja (hinnan lisäys 9 - 10 %) parantaa rakenteen toimivuutta. Sementtistabilointi osoittautui kalleimmaksi pohjamaan parannusmenetelmäksi.

Moreenin käyttö rakennekerroksissa on muissa vaihtoehdoissa kuin muovikalvo-rakenteessa (B.2) edullisempaa kuin kalliomurskeen käyttö, vaikka pohjamaan homogenisointi lisättäisiin kustannuksiin. Homogenisoitu moreenirakenne on noin 24 % halvempaa kuin vastaava kalliomurskerakenne. Rakenteen toimivuutta voidaan edelleen parantaa lisäämällä siihen teräsverkko (B.4) tai stabiloimalla moreeni masuunikuonalla (B.3). Nämä kummatkin parannusvaihtoehdot ovat homogenisoimattomina noin 15 - 22 % edullisempia kuin kalliomurskerakenne ja toimivuudeltaan samankaltaisia kalliomurskerakenteen kanssa.

Vertailurakenteiden ympäristökuormitukset

Vertailurakenteiden ympäristövaikutukset laskettiin Excel-pohjaisella Meli-ohjelmalla /Eskola et al. 1999, Laine-Ylijoki et al. 2000/. Meli-ohjelmalla voidaan laskea ja vertailla erilaisten tierakennevaihtoehtojen ympäristövaikutuksia. Ohjelma olettaa käytettävän keskimääräisiä työmenetelmiä ja -koneita ja sen materiaali-tietokanta rajoittuu yleisimpiin tierakentamisessa käytettäviin materiaaleihin. Laskelmien tekoa rajoitti tässä tutkimuksessa se, että Meli-ohjelmasta puuttui joitakin vertailurakenteiden sisältämiä materiaaleja ja työvaiheita. Tästä johtuen rakenne B.2. jouduttiin jättämään koko vertailusta pois. Vastaavasti salaojaputkien ja kajojen ympäristövaikutustiedot puuttuvat rakenteesta C (ei ole suoraan vertailtavissa muihin rakenteisiin). Moreenin käsittelyssä käytettävät koneet eivät kuulu Melin konekantaan, joten niiden vaikutuksia on arvioitu vastaavan työkoneen vaikutuksilla. Puuttuvilta osin laskennassa hyödynnettiin TRALCA-järjestelmää, joka on VTT:n sisäinen kuljetusten ja työkoneiden elinkaari päästöjen laskentajärjestelmä /Mäkelä 2008/.

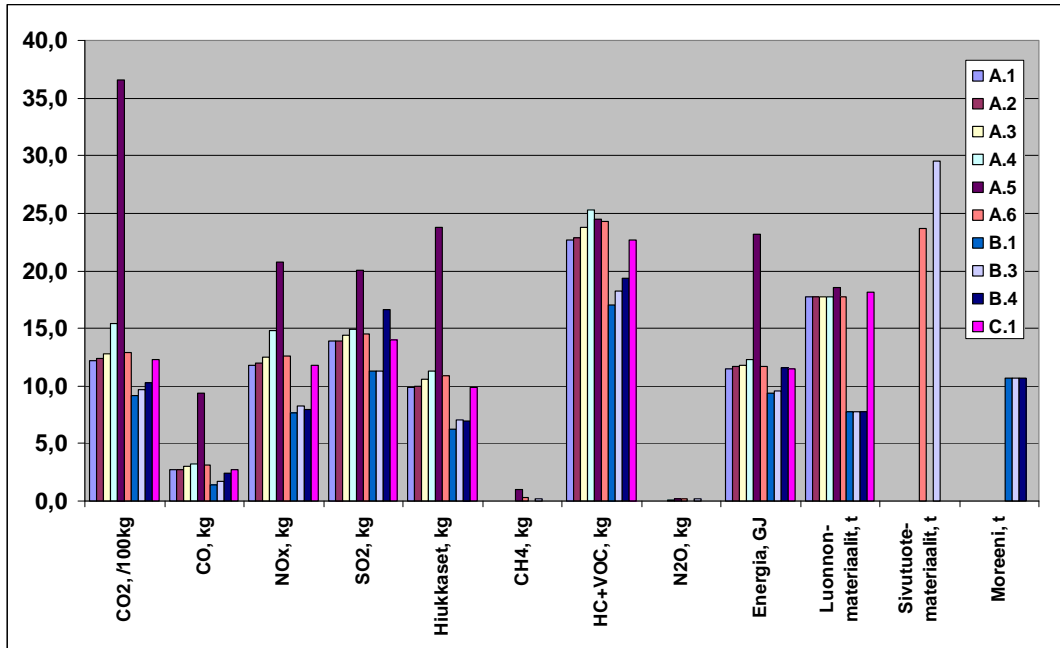
Taulukossa 8.2 ja Kuvassa 8.3 on esitetty Meli-laskelmien mukaiset ympäristökuormitukset tierakenteiden osalta. Kuvassa 8.4 eri rakenteiden ympäristövaikutukset on pisteytetty Melin sisältämällä painokertoimilla, jolloin on saatu laskettua kokonaisympäristövaikutusta kuvaavat ympäristölaatu pisteet. Menetelmä on kuvattu yksityiskohtaisemmin Eskola et al. /1999/ raportissa.

Taulukko 8.2. Vertailurakenteiden ympäristökuormitukset.

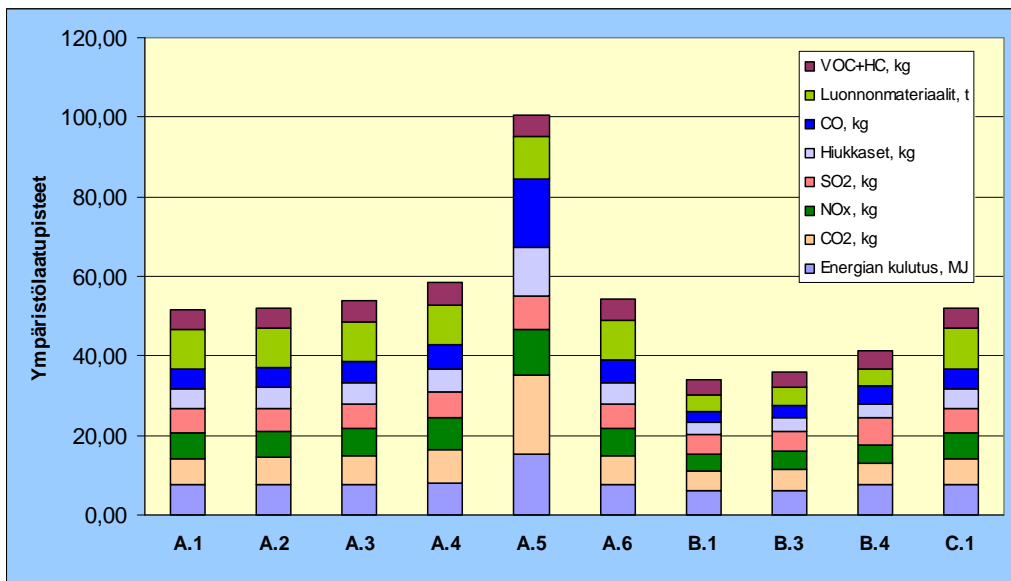
Ympäristökuormitukset yhteensä	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	A.6	B.1	B.3	B.4	C.1
CO ₂ , kg	12 239	12 372	12 780	15 390	36 588	12 925	9 129	9 710	10 248	12 302
CO, kg	27,1	27,7	29,8	32,7	94,1	30,9	14,0	16,8	23,9	27
NO _x , kg	118	120	125	148	208	126	76,2	82,9	79,6	118
SO ₂ , kg	13,9	13,9	14,4	14,9	20,0	14,6	11,3	11,3	16,6	14
Hiukkaset, kg	9,84	9,97	10,5	11,3	23,8	10,9	6,25	7,02	6,91	10
CH ₄ , kg	0,00	0,01	0,01	0,03	0,97	0,30	0,02	0,23	0,02	0,00
HC+VOC, kg	22,6	22,9	23,8	25,3	24,5	24,3	17,0	18,2	19,3	23
N ₂ O, kg	0,00	0,00	0,00	0,08	0,23	0,23	0,01	0,18	0,01	0,00
Käytetty energia (uusiutumaton), GJ	115	117	118	123	232	117	94	96	116	115
Luonnonmateriaalien käyttö*, t	1772	1772	1772	1772	1851	1772	777	777	777	1817
Sivutuotemateriaalien käyttö, t	0	0	0	0	0	24	0,0	29,5	0,0	0
Heikkolaatuisten materiaalien käyttö (moreeni), t	0	0	0	0	0	0	1063	1063	1063	0

Rakenne C ei suoraan vertailtavissa muihin.

Kuvassa 8.3 esitettyjen ympäristölaatu pisteiden laskennassa on käytetty taulukossa 8.3 ympäristökuormituksille esitettyjä suhteellisia painokertoimia. Nämä kertoimet on määritetty Meli-ohjelman kehittämisen yhteydessä asiantuntija-arvioiden perusteella ja niitä voidaan pitää tässä tapauksessa vain suuntaa-antavina.



Kuva 8.3. Tierakenteiden vertailurakenteiden ympäristökuormitukset Meli-ohjelmalla.



Kuva 8.4. Tierakenteiden vertailurakenteiden pisteytys Meli-ohjelmalla.

Sarjan A rakenteita verrattaessa keskenään havaitaan, että ylivoimaisesti suurimmat ympäristövaikutukset ovat rakenteella A.5, jossa on käytetty pohjamaan stabilointiaineena sementtiä. Ne ovat noin kaksinkertaiset verrattuna perusrakenteeseen A.1 ja hiilidioksidipäästöjen osalta lähes kolmikertaiset. Tämä merkittävä ero muodostuu lähes kokonaan sementin tuotannosta, joka vaatii paljon energiaa. Masuunikuonarakenteen edullisuus perustuu siihen, ettei sen tuotannosta oleteta syntyvän ympäristökuormituksia, koska se on sivutuote. Siten rakenteen ympäristökuormitukseen vaikuttaa eniten masuunikuonan kuljetusmatka. Rakenteen A.4 ympäristövaikutukset ovat noin 10 % korkeammat kuin rakenteen A.3, mikä puoltaa karkean aineksen lisäämistä paikanpäällä. Mielenkiintoista on myös se, että moreenin käyttö rakennekerroksissa (B.1 ja B.3) on selvästi ympäristöystävällisempää (noin 15 - 18 %) kuin pohjamaan parantaminen kaikkien tarkastelujen

ympäristövaikutusten osalta. Kuivatetun rakenteen C ympäristövaikutukset olivat suurin piirtein samat kuin perusrakenteella A.1. Tosin näistä laskelmista puuttuu salaojaputkien ja kaivojen valmistuksen ja kuljetuksen vaikutukset, joten ne eivät ole suoraan vertailukelpoisia.

Taulukko 8.3. Meli-ohjelman käyttämät suhteelliset painokertoimet /Eskola et al. 1999/.

Ympäristökuormitustekijä	Painokerroin
Energian kulutus, MJ	7,5
Polttoaineen kulutus, l	7,5
Kuljetusmatka, km	0
CO ₂ , kg	6,7
NO _x , kg	6,5
SO ₂ , kg	5,9
VOC+HC, kg	5
Hiukkaset, kg	5
CO, kg	5
Pöly, kg	5,5
Meluaika, dBAh	3,1
Luonnonmateriaalit, t	10
Läjitys/ylijäämämassa	4

Toimivuuden vertailu

Vertailurakenteiden toimivuutta verrattiin konsultilla vahvistetun projektiryhmän kanssa. Toimivuusvertailu oli luokittelevaa. Toimivuuden osatekijöiksi valittiin routanousun kokonaismäärä, vaurioriski epätasaisella routanousulla, olosuhdeherkkyys työn aikana, tiivistyvyys, väsymisherkkyys, herkkyys pysyville muodonmuutoksille (urautuminen), kevätkantavuus sekä mahdolliset ongelmat kaivutöissä kunnossapidossa. Näistä tekijöistä tiivistyvyys, olosuhdeherkkyys työn aikana ja kaivutyön ongelmat eivät vaikuta juurikaan rakenteiden käyttöikään. Tätä tulosta ei voi suoraan siirtää käyttöikään. Joidenkin menetelmien, kuten teräsverkkojen käyttö, osalta on olemassa kvantitatiivista tietoa niiden vaikutuksesta käyttöikään /Korkiala-Tanttu et al. 2003/.

Perusrakenteeksi, johon muita verrattiin, valittiin homogenisoitu rakenne A.2, jonka voidaan katsoa täyttävän Tiehallinnon laatuvaatimukset. Luokittelun skalaus oli sellainen, että arvo 0 vastasi perusarvoa tai sitä, ettei osaa sanoa. Jos rakenteen arvioitiin toimivan paremmin kuin rakenne A.2, se sai positiivisen arvon, joka oli maksimissaan +++. Vastaavasti heikommin toimivaksi arvioitu rakenne sai negatiivisen arvon, enimmillään arvon ---.

Toimivuusvertailun perusteella kaikki pohjamaan toimenpiteet (A.3, A.4, A.5 ja A.6 ja C) parantavat rakenteiden toimivuutta jonkin verran tai merkittävästi. Moreenin käyttö jakavassa kerroksessa alentaa kautta linjan sen toimivuutta jonkin verran. Jos moreenirakenteeseen lisätään teräsverkko tai moreeni stabiloidaan masuunikuonalla, sen toimivuus paranee jonkin verran tai osin merkittävästikin.

Taulukko 8.4. Tierakenteiden vertailurakenteiden riski toimivuudelle (+++, ++, +, +/-, --, ---, 0 = perusarvo/ei osaa sanoa) suhteessa rakenteeseen A.2.

Vaihtoehto Pohjamaan käsittely	A.1 Ei homo- geni- sointia	A.2 Perus- raken- neho- moge- nisointi	A.3 homo- geni- sointi + karkean lisäys	A.4 homogeni- sointi + karkean murs- kaamolla	A.5 homo- geni- sointi + YSE stabi- lointi	A.6 homogeni- sointi ja masuuni- kuona stabilointi	C sala- ojitus
routanousu koko- naismäärä	-	0	+	+	++	++	+
vaurioriski epäta- saisesta routanou- susta	---	0	+	++	++	++	+
väsymisherkkyyys	+	0	++	++	++	++	+
herkkyys urautu- miselle	-	0	++	+++	++	++	+
kevätkantavuus	0	0	+	+	++	++	+
olosuhdeherkkyyys työn aikana	+	0	+	+	0	0	0
tiivistyvyys	+	0	+++	+++	++	++	0
kaivutyön ongel- mat	0	0	0	0	-	-	0
Vaihtoehto Jakava kerros moreenia	B.1 perusrakenne		B.2 muovikalvo moreenin alla	B.3 stabilointi masuunikuonalla		B.4 teräsverkko	
routanousu koko- naismäärä	-		0	0		-	
vaurioriski epäta- saisesta routanou- susta	-		0	0		++	
väsymisherkkyyys	-		-	+		+	
herkkyys urautu- miselle	-		-	+		++	
kevätkantavuus	-		0	+		+	
olosuhdeherkkyyys työn aikana	-		--	-		-	
tiivistyvyys	-		-	0		0	
kaivutyön ongel- mat	-		--	-		---	

8.3 Piha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteet

Piharakenteiden vertailurakenteeksi valittiin InfraRYL:n mukainen asuintalora-
kentamiseen käytetty asfalttipäällysteinen rakennevaihtoehto, josta käytetään
nimeä D.1. Sen rinnalle kehitettiin luvun 5 tulosten perusteella rakennevaihtoehto,
jossa jakavan kerroksen soramurske korvattiin lievästi routivalla moreenilla, jonka
kerrospaksuutta lisättiin. Myös mahdollisena rakenteen alle tulevana täyttönä
käytettiin lievästi routivaa moreenia (rakenne D.2). Lisäksi tutkittiin vaihtoehtoa
D.3., jossa moreenirakenteeseen lisättiin teräsverkko kantavan ja jakavan kerrok-
sen väliin. Vertailussa vertailtiin 1 000 m² piha-alueen ympäristövaikutuksia sekä
kustannuksia. Koska Melissä ei ole erillistä taulukkoa piharakenteen laskentaan,
laskelmat tehtiin 10 m leveälle ja 100 m pitkälle osuudelle. Rakenteiden vertailu
on esitetty taulukossa 8.5.

Taulukko 8.5. Piha- ja kevyenliikenteen väylän rakennevaihtoehtojen sisältö ja työvaiheet.

Vaihtoehto	D.1	D.2	D.3	E.1	E.2	E.3
Päällyste ja paksuus	AB 50 mm	AB 50 mm	AB 50 mm	AB 50 mm	AB 50 mm	AB 50 mm
Päällysteen kuljetusmatka km	15	15	15	15	15	15
Kantava kerros Soramurske 0 - 32/50 Paksuus, mm	150	150	150	250	250	250
Kuljetusmatka	15	15	15	15	15	15
Teräsverkko			B500H - 5/8-150/200			B500H - 5/8-150/200
Jakava kerros,	Soramurske 0 - 60	lievästi routiva moreeni	lievästi routiva moreeni	Soramurske 0 - 60	lievästi routiva moreeni	lievästi routiva moreeni
Kuljetusmatka	15	0	0	15	0	0
Paksuus, mm	250	400	400	300	400	400
Suodatinkerros, Hk, paksuus mm	200	300	300	300	400	400
Kuljetusmatka, km	15	15	15	15	15	15
Täyttö pohjalle (noin 1 m)	routimaton täytemaa 1 m	kivetön, lievästi routiva moreeni 0,75 m	kivetön, lievästi routiva moreeni 0,75 m	routimaton täytemaa 1 m	kivetön, lievästi routiva moreeni 0,8 m	kivetön, lievästi routiva moreeni 0,8 m
Kuljetusmatka	15	0	0	15	0	0

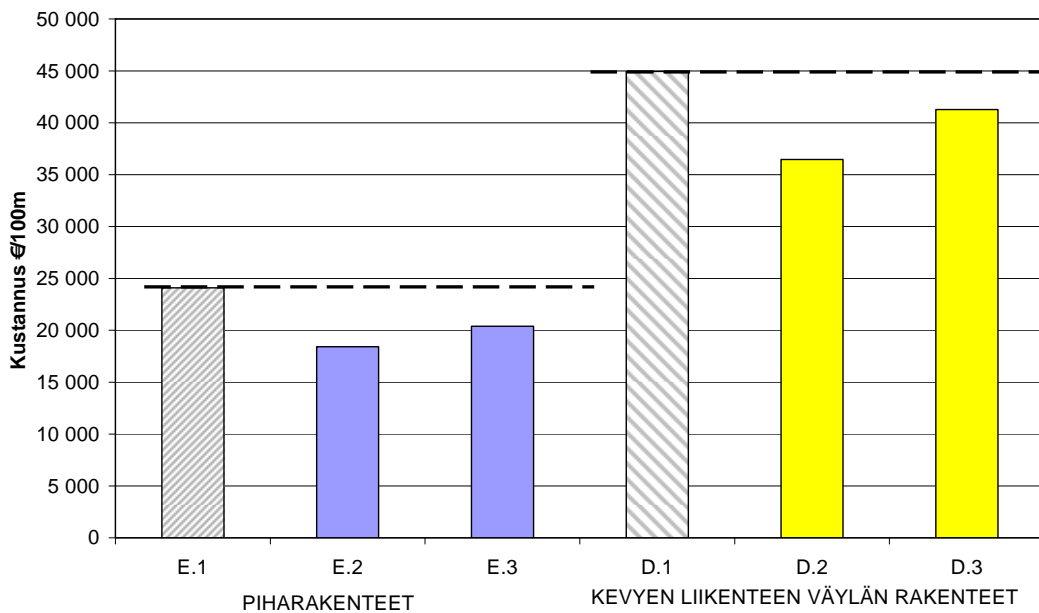
Kustannusvertailu

Vertailurakenteiden kustannuksia vertailtiin euroissa (alv 0 %) sitoumuksetta perustuen usean kilometrin mittaisen tiehankkeen kustannustasoon (taulukko 8.6 ja kuva 8.5). Yksikkökustannukset vastaavat kesän 2008 hintatasoa. Kustannusarviohinnat laskettu tilaajataholla aiheutuvina kustannuksina eli ne sisältävät yleis- ja työ kustannukset. Piharakenteiden (sarja D) kustannukset vastaavat 1000 m² rakentamiskustannuksia ja kevyen liikenteen väylän rakenteet (sarja E) 100 m pitkän osuuden rakentamista. Yksilöity kustannusarvio on esitetty liitteessä 6.

Taulukko 8.6. Piha ja pyörätierakenteiden kokonaiskustannukset.

Piharakenteet	D.1 murskerakenne	D.2 moreenirakenne	D.3 teräsverkko
kokonaiskustannus €/100m	43680	35200	40000
Kevyen liikenteen väylä	E.1 murskerakenne	E.2 moreenirakenne	E.3 teräsverkko
kokonaiskustannus €/100m	23824	18143	20111

Edullisimmat rakenteet saatiin molemmissa sarjoissa paikalla käyttämällä paikalla olevaa moreenia. Kustannukset nousivat noin 11 %, kun rakenteeseen lisättiin lisäksi teräsverkko jakavan kerroksen päälle. Murskerakenne oli noin 8 - 9 % kalliimpi kuin teräsverkollinen moreenirakenne.



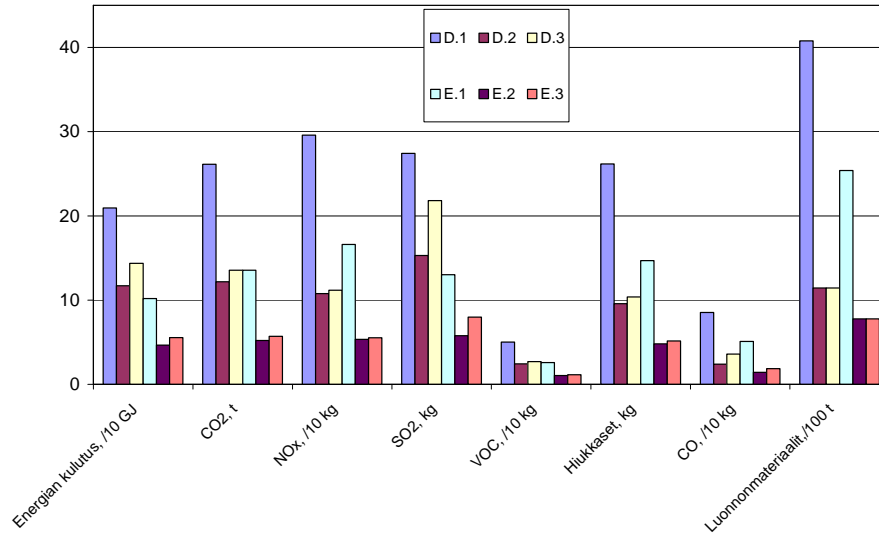
Kuva 8.5. Paha ja pyörätierakenteiden kokonaiskustannukset.

Ympäristökuormitukset

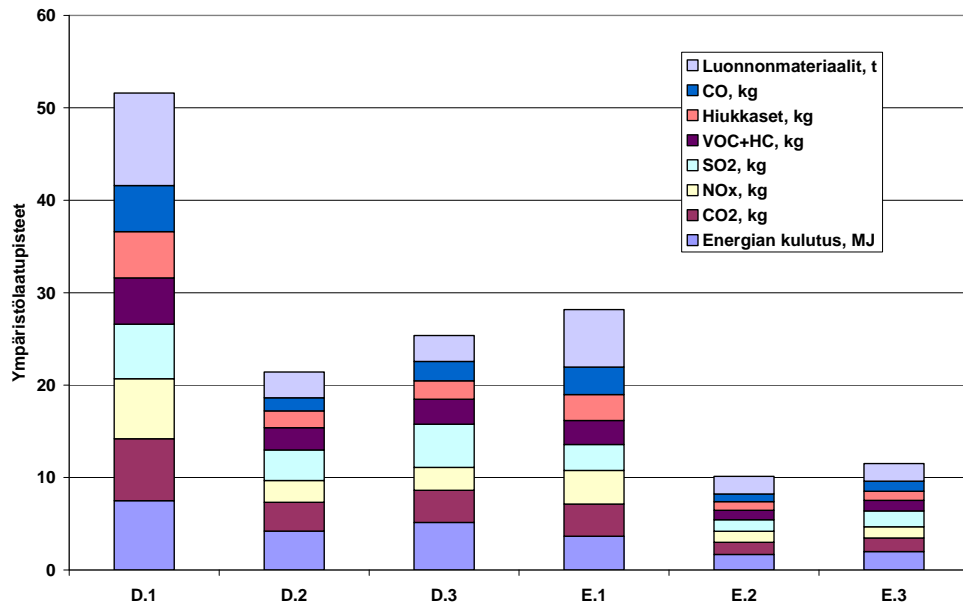
Kevyen liikenteen väylän osalta tarkasteltiin pengertä, jonka kokonaisleveys oli 4 m, josta 3 m oli päällystettyä. Tarkasteltavan osuuden pituus oli 100 m. Muilta osin rakenteiden mitoituksen periaatteet olivat vastaavat kuin piharakenteessa. Vertailu tehtiin perinteisen murskerakenteen (E.1), moreenirakenteen (E.2) ja teräsverkolla vahvistetun moreenirakenteen (E.3) välillä. Kummassakin tarkastelussa oletettiin, että moreeni saadaan suoraan paikan päältä ja pystytään tarvittaessa jalostamaan siellä. Meli ei sisällä teräsverkon valmistamiseen tarvittavaa raaka-ainemäärää, joten luonnonvarojen kulutuksessa teräsverkon käyttö ei näy. Teräksen ja verkon valmistuksesta sekä kuljetuksista aiheutuvat ympäristökuormitukset ovat mukana tarkastelussa. Taulukossa 8.7 ja kuvassa 8.6 on esitetty eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitus sekä kuvassa 8.7 painokertoimien avulla pisteytetyt tulokset (ympäristölaatuasteet). Pisteytyksessä vertailurakenteena on käytetty rakennetta D.1. Tulosten tulkinnassa on muistettava, että D- ja E-rakenteet eivät ole keskenään suoraan vertailukelpoisia, vaan tarkoitus on verrata D.1, D.2 ja D.3 rakenteita, sekä erikseen E.1, E.2 ja E.3 rakenteita. Laskelmissa moreenin hyödyntäminen näkyy luonnonmateriaalien käytön vähenemisenä ja vastaavasti kuljetusten päästöjen vähenemisenä, mutta muuten moreenin hyödyntämiselle ei ole laskettu hyötyä/bonusta.

Taulukko 8.7. Paha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteiden ympäristökuormitukset laskettuna Meli-ohjelmalla.

	D.1	D.2	D.3	E.1	E.2	E.3
Energian kulutus, GJ	209	117	144	102	46	56
CO ₂ , t	26	12	14	14	5	6
NO _x , kg	296	108	112	166	53	55
SO ₂ , kg	27	15	22	13	6	8
VOC, kg	50	24	27	26	10	11
Hiukkaset, kg	26	10	10	15	5	5
CO, kg	85	24	36	51	14	19
Luonnonmateriaalit, t	4,079	1,144	1,144	2,540	777	777



Kuva 8.6. Piha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteiden ympäristökuormitukset laskettuna Meli-ohjelmalla



Kuva 8.7. Piha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteiden vertailurakenteiden pisteytys Meli-ohjelmalla.

Kiviainesten korvaaminen moreenilla vähentää selvästi rakenteiden ympäristövaikutuksia. Vähennys tulee kiviainesten kaivun, murskauksen ja kuljetuksen aiheuttamien päästöjen välttämisestä.

Toimivuuden vertailu

Kuten edellä vastaava toimivuusarviointi (taulukko 8.8) tehtiin vaihtoehtoisten rakenteiden välillä. Nyt vertailurakenteina käytettiin murskerakenteita D.1 ja E.1.

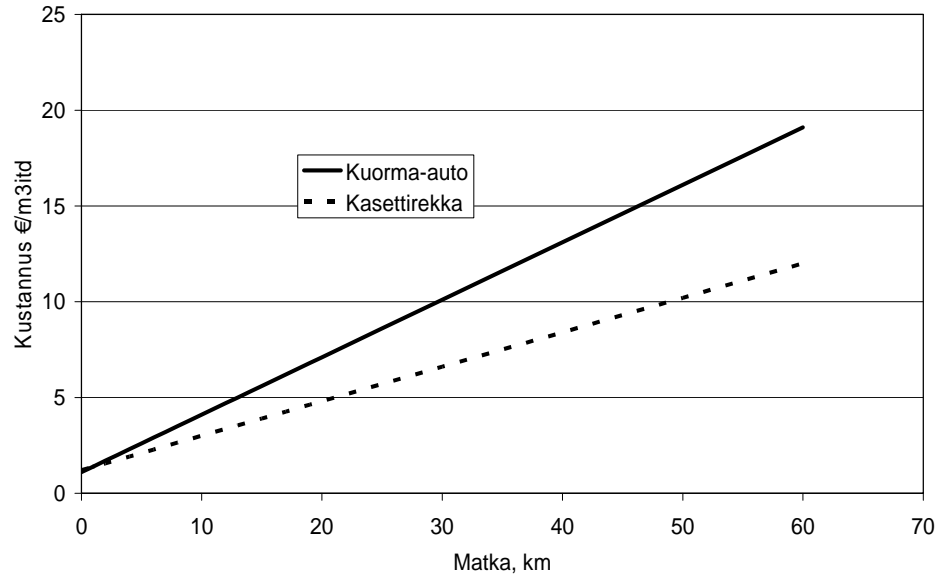
Taulukko 8.8. Piha- ja kevyen liikenteen väylän rakenteiden toimivuusarvio suhteessa tyyppirakenteeseen (+++, ++, +, +/-, -, ---, 0 = perusarvo/ei osaa sanoa) suhteessa rakenteisiin D.1 ja E.1.

Piharakenteet	D.1 murskerakenne	D.2 moreenirakenne	D.3 teräsverkko
routanousu kokonaismäärä	0	-	-
vaurioriski epätasaisesta routanoususta	0	-	+
väsymisherkkyyys	0	-	-
herkkyys urautumiselle	0	-	-
kevätkantavuus	0	-	0
olosuhdeherkkyys työn aikana	0	--	--
tiivistyvyys	0	-	-
kaivutyön ongelmat	0	0	---
Kevyen liikenteen väylä	E.1 murskerakenne	E.2 moreenirakenne	E.3 teräsverkko
routanousu kokonaismäärä	0	-	-
vaurioriski epätasaisesta routanoususta	0	-	+
väsymisherkkyyys	0	-	-
herkkyys urautumiselle	0	-	0
kevätkantavuus	0	-	0
olosuhdeherkkyys työn aikana	0	--	--
tiivistyvyys	0	-	-
kaivutyön ongelmat	0	0	---

Moreenirakenteiden voidaan olettaa toimivan jonkin verran heikommin lähes kautta linjan, joten vertailu painottui negatiivisiin arvoihin. Voidaan kuitenkin arvioida, että käyttöiltään teräsverkolla varustettu moreenirakenne vastaa murskerakenteen toimivuutta.

8.4 Kuljetuskustannukset

Vertailurakenteiden kustannusarviossa on kuljetuskustannukset arvioitu siten, että noin 10 km matkat on oletettu tehtävän kasettiautolla ja sitä lyhemmällä kuorma-autolla. Kuvassa 8.8 on esitetty kuorma-auton ja kasetti-auton kuljetuskustannusten vertailu kuljetusmatkan suhteen. Vertailussa käytetyt hinnat ovat laskettu urakka-ajotaksojen mukaan. Maankuljetuskalustolla on yleensä tuntitakuuhinnat (minimituntiansiot). Kiviaineksia (murskaamopaikalta tai soranottoapaikalta) päästään yleensä ajamaan urakka-ajona kasettiautoilla jo melko lyhyellekin ajomatalle (ajomatka yli 5 km), edellyttäen että kasettoimispaikat löytyvät. Kaivumaiden osalta kasettiauton käyttöä rajoittaa usein - etenkin pääkaupunkiseudulla - kuormausajat, ahtaat paikat tai ajoreitit, heikot kasettoimismahdollisuudet ja hitaat ajoreitit. Lisäksi vapaiden kasettiautojen saatavuus on välillä heikohko, koska autot ovat sopimusajoissa.



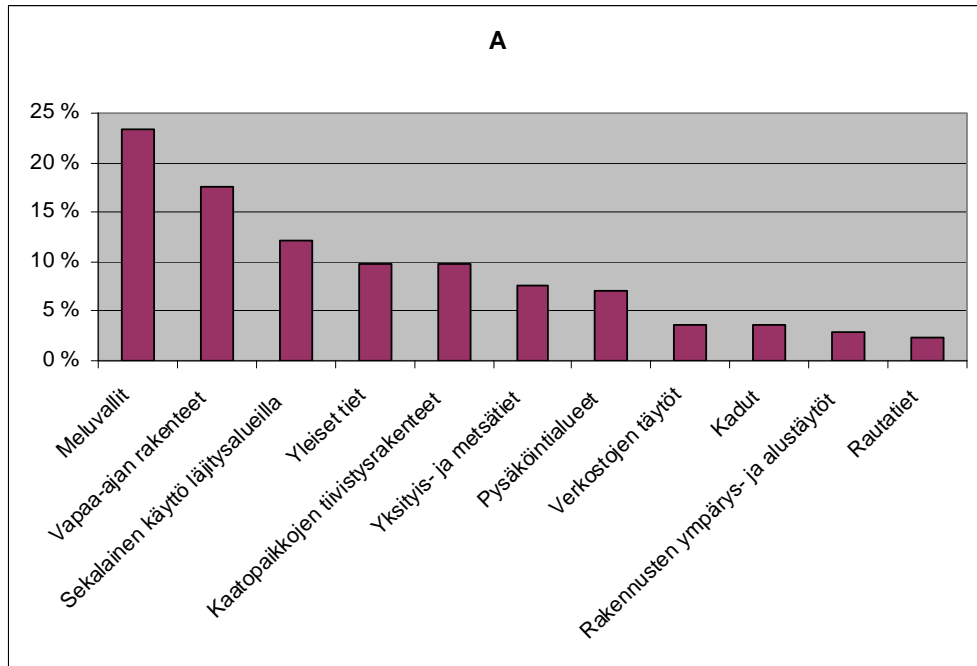
Kuva 8.8. Kuorma-auton ja kasettiauton kuljetuskustannus kuljetusmatkan suhteen.

9 Moreenin hyötykäyttömahdollisuuksia ja ominaisuuksien arvottaminen

Workshopissa 16.5.2008 keskityttiin moreenin käytön lisäämismahdollisuuksiin ja jalostetun moreenin ominaisuuksien arvottamiseen. Projektin ohjausryhmän jäsenistä ja tutkijoista koostuvalle joukolle esitettiin kysymyksiä sekä jalostamattoman moreenin käytön lisäämismahdollisuuksista että jalostetun moreenin käytön lisäämismahdollisuuksista. Näihin kysymyksiin vastaukset annettiin asiantuntijan roolissa. Lisäksi kysyttiin jalostetun moreenin ominaisuuksien arvottamisesta. Tähän kysymykseen vastattiin hankkijan roolissa. Kyselyn yksityiskohdat ja AHP-tekniikka on esitetty liitteessä 4.

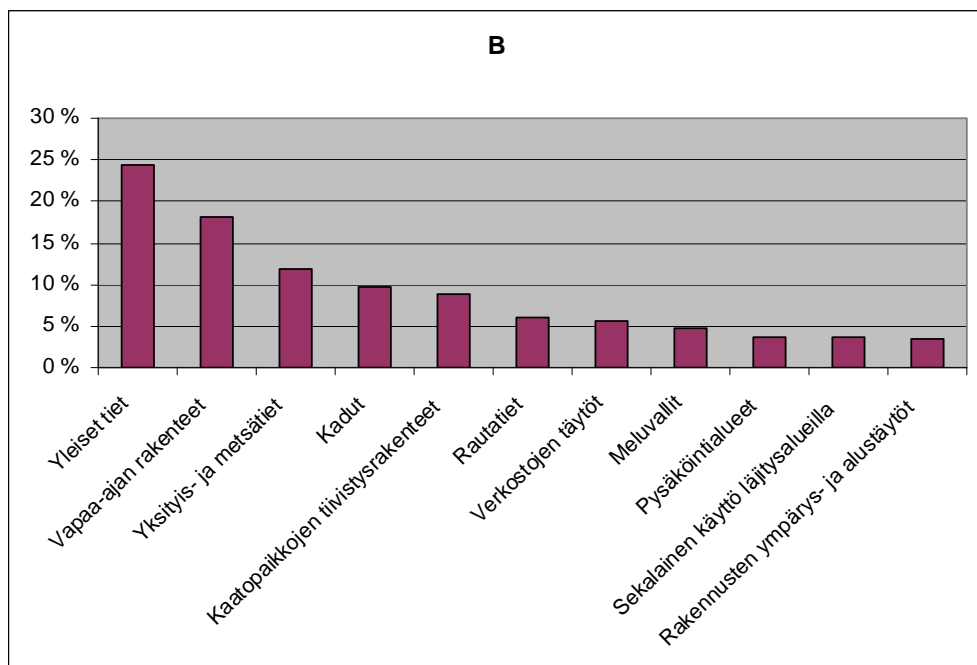
Keräämällä kaikkien vastaajien tulokset muodostettiin kollektiivinen mielipide siitä, missä materiaalien käyttöä jalostamattomana ja jalostettuna voidaan lisätä (kysymykset A ja B) ja mitkä ovat jalostetun moreenin merkittävimmät ominaisuudet (kysymys C). Kysymysten A ja B erotuksena luotiin käsitys jalostamisella saavutettavissa olevasta lisäkäyttöpotentiaalista.

Kuvissa 9.1 - 9.3 on esitetty kyselyn tulokset siten, että ensimmäisenä vasemmalla on annettu kohde, jossa käytön lisäämistä on pidetty potentiaalisimpana ja viimeisen oikealla vastaus, jossa käytön lisäämispotentiaali on pienin.



Kuva 9.1. Moreenin käytön lisäämismahdollisuudet jalostamattomana; vastaukset merkittävyysjärjestyksessä.

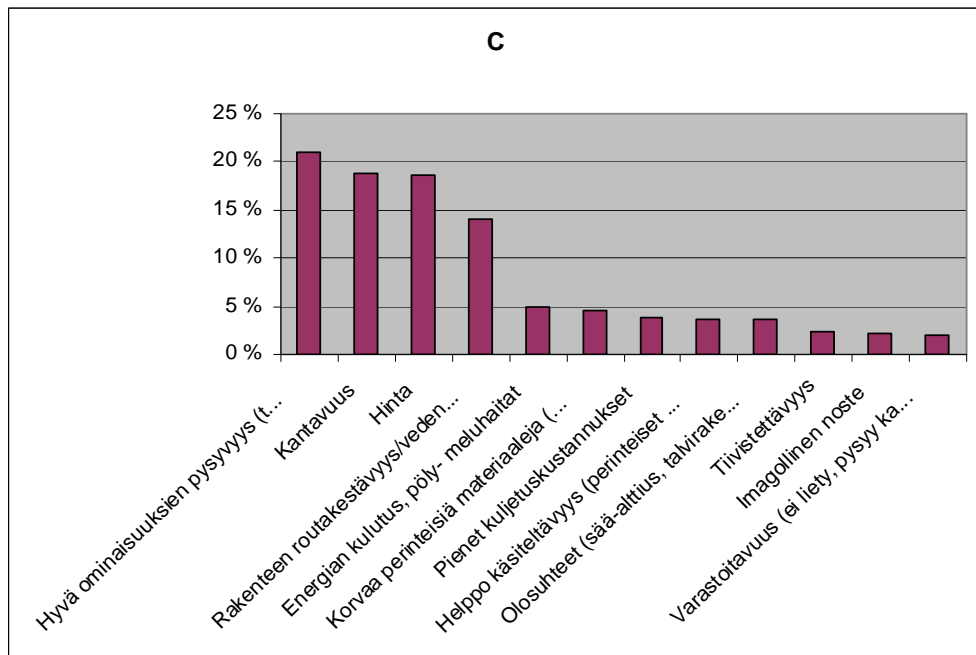
Kuvasta 9.1 voidaan havaita, että jalostamattomana moreenin käytön lisäämistä pidetään potentiaalisimpina meluvalleissa, kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa ja sekalaisessa käytössä läjitysalueilla. Vähäisintä käytön lisääminen olisi rautateissa.



Kuva 9.2. Moreenin käytön lisäämismahdollisuudet jalostettuna; vastaukset merkittävyysjärjestyksessä.

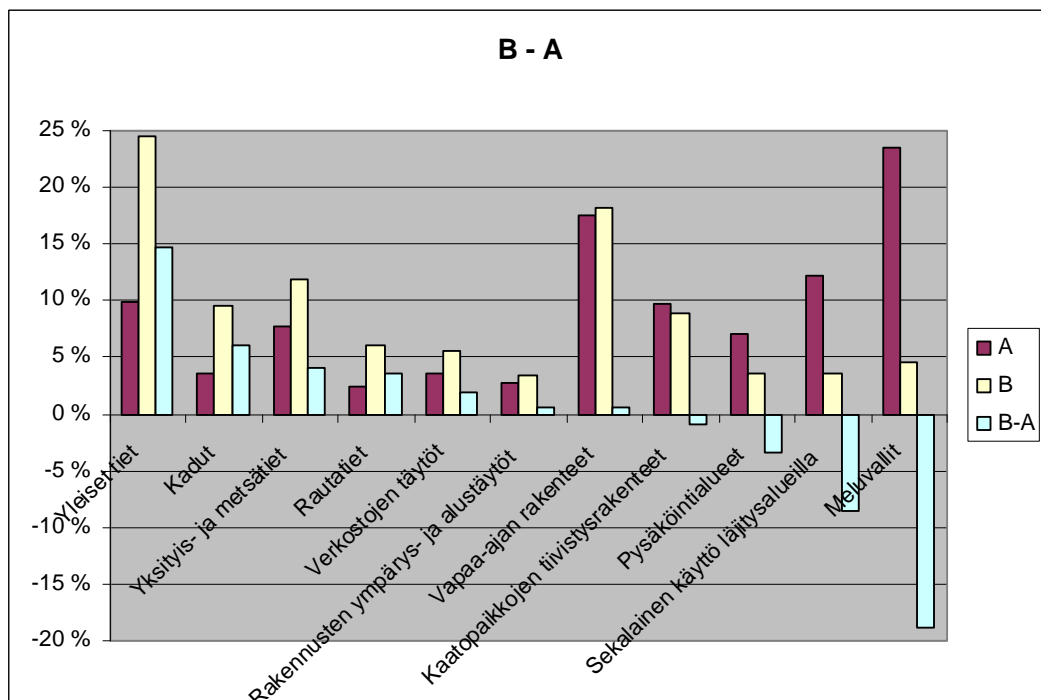
Sen sijaan jalostettuna käytön lisääminen olisi potentiaalisinta yleisillä teillä, vapaa-ajan rakenteissa ja yksityis- ja metsäteillä. Vähäisintä käytön lisääminen olisi rakennusten ympärys- ja alustäytöissä. Moreenin omaisuuksien arvottamisessa korkeimmalle arvostetaan ensin hyvää ominaisuuksien pysyvyyttä, sitten

kantavuutta ja vasta kolmanneksi eniten hintaa. Vähiten arvostetaan varastoitavuutta ja toiseksi vähiten moreenin käytön antamaa imagollista nostetta.



Kuva 9.3. Moreenin merkittävimmät jalostettavimmat ominaisuudet; vastaukset merkittävyysjärjestyksessä.

Moreenin jalostuksella saavutettavissa oleva lisäkäyttöpotentiaali on esitetty kuvassa 9.4. Tulosten mukaan moreenin jalostuksella sen käyttöä on lisättävissä eniten yleisillä teillä, lähes 15 %-yksikköä, eli käyttömäärät ovat yli kaksinkertaistettavissa. Kaduissa ja yksityis- ja metsäteissä lisäys on n. 5 %-yksikön luokkaa, eikä lisäys rautateissäkään jää paljoa näiden alle. Muissa kohteissa jalostaminen ei juurikaan lisää käyttömääriä, tai jopa vähentää sitä.

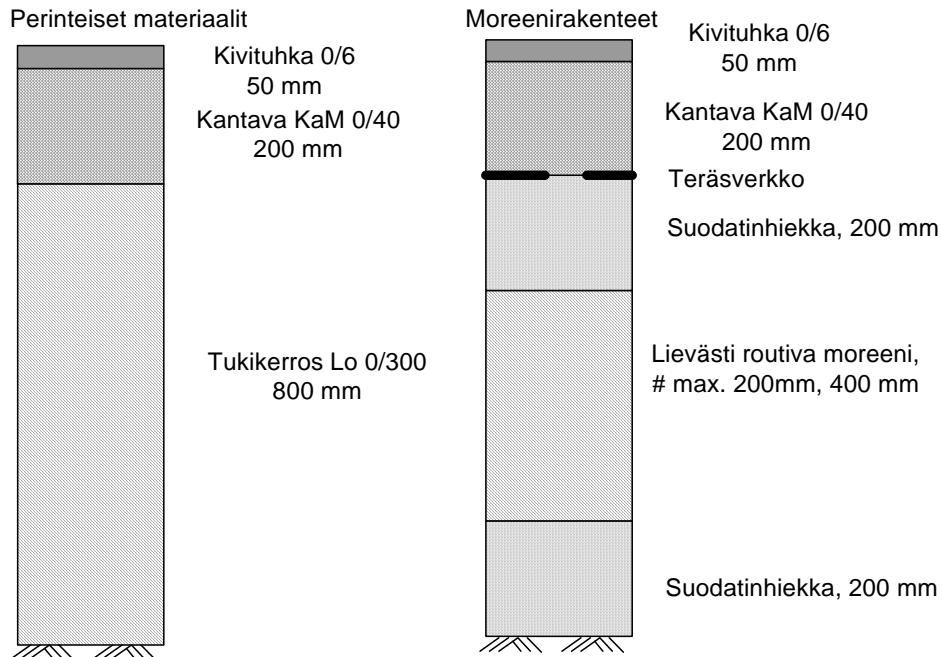


Kuva 9.4. Moreenin jalostuksella saavutettavissa oleva käyttöpotentiaali.

10 Moreenin tyyppirakenteet

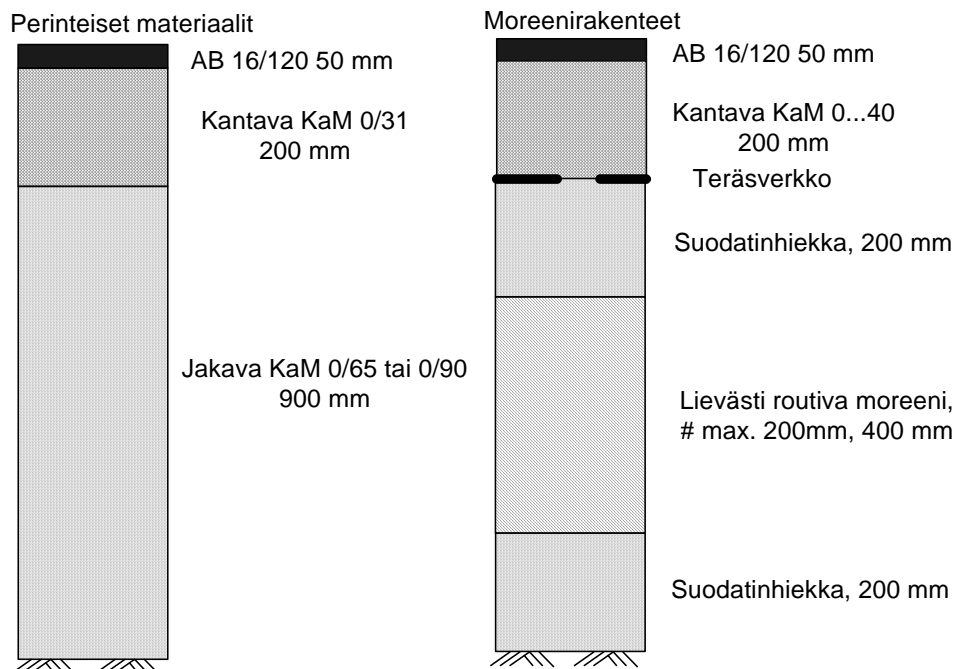
Kuvissa 10.1 ja 10.2 on esitetty perinteiset murskerakenteet Vuoreksen kohteeseen sekä kevyen liikenteen väylälle (kuva 10.1) ja päällystetylle piharakenteelle (kuva 10.2).

Kevyen liikenteen väylä kunnossapitoluokka III, katuluokka 6



Kuva 10.1. Kevyen liikenteen väylän murske- ja moreenirakenteet.

Piharakenne Vuores



Kuva 10.2. Pihan murske- ja moreenirakenteet.

11 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ja edistää heikkolaatuisten materiaalien hyötykäyttömahdollisuuksia parempilaatuisten materiaalien (hiekkä, sora, louhe ja kalliomurske) korvaajana. Hyötykäytöllä voidaan pienentää materiaalien läjitys-tarvetta ja vähentää kuljetettavien massojen määriä. Massojen paikalla hyödyntäminen säästää myös kustannuksia ja vähentää kuljetuksista aiheutuvia ympäristö-vaikutuksia.

Tutkimuksessa laadittiin ehdotus erityisesti moreenien käyttömahdollisuuksista teiden ja katujen rakennekerroksissa sekä muissa täytöissä. Suomessa on selvästi potentiaalia lisätä moreenien hyötykäyttöä sekä jalostamattomana ja jalostettuina väylärakentamisessa. Arvion mukaan lisäkäyttöpotentiaali olisi noin 15 % luokkaa jalostettuna. Toistaiseksi moreenin jalostusyrietykset ovat olleet hajanaisia, eikä menetelmiä ole tuotteistettu tai ohjeistettu. Tämän tueksi tarvitaan laitteisto- ja menetelmäkehittämistä.

Moreenien käytettävyyttä hankaloittaa usein korkea hienoainespitoisuus sekä kivisyys. Moreenia voidaan jalostaa kerrosrakennemateriaaliksi murskaamalla, poistamalla hienoainesta ja kiviä, sekoittamalla karkeampia aineksia ja stabiloimalla sekä pelleteimalla. Käyttökelpoisimmat menetelmät ovat murskaus, sekoittaminen, kivien poisto sekä stabilointi. Näistä paikalla tehtäviä menetelmiä ovat murskaus, sekoittaminen, kivien poisto ja stabilointi. Pohjamaana olevaa moreenia voidaan edullisesti jalostaa homogenisoimalla.

Lievästi routivia moreeneja voidaan käyttää rakennekerroksissa, jos huolehditaan riittävästä kuivatuksesta. Laskennallisten tarkastelujen perusteella erilaisilla kuivatusratkaisuilla voidaan jonkin verran vaikuttaa rakenteen sisältämään vesimäärään ja tasoittaa tien poikkisuuntaista kantavuutta. Näiden rakenteiden käyttöikä voidaan edelleen lisätä asentamalla rakenteeseen myös raudoitteita ja lujitteita. Samalla voidaan pienentää rakenteiden vaurioitumista.

Vuoreksen alueella olevia kivisiä, routivia moreeneja voitaisiin hyötykäyttää jalostamattomana alueen sekalaisissa täytöissä, meluvälleissa sekä luiskatäytöissä. Jos moreenista poistetaan ylisuuret kivet, on se käyttökelpoista kohteissa, joissa vaaditaan kantavuutta, muttei ehdotonta routimattomuutta. Toisaalta moreenia käytetään jo nyt näissä rakenteissa, kun vastaaviin rakenteisiin ohjataan alueellisia kaivumassoja. Toiminta ei kuitenkaan ole systemaattista vaan perustuu samanlaiseen ylijäämämassan syntyyn ja toisaalta sopivan käyttökohteen rakentamiseen. Tätä moreeniin käyttömuotoa voidaan kuitenkin lisätä parantamalla alueellisten maapankkien ja tiedonvälityksen toimintaa.

Moreenin kivistä ja lohkarista osa on suhteellisen suurikokoista, joten ne saattavat tarvita rikottamista tai jopa räjäyttämistä ennen käyttöä. Jalostettuna tätä moreenia voitaisiin käyttää esimerkiksi kevyenliikenteen väylien täytöissä sekä niiden kerrosrakenteissa. Lisäksi moreenia voitaisiin sijoittaa tonttien piharakenteisiin. Jalostusmenetelminä tulevat kyseeseen murskaus, hienoaineksen poisto (varauksella) sekä sekoitusta toisiin materiaaleihin. Sekoittamisella voidaan saavuttaa jopa kantavan kerroksen materiaalivaatimukset täyttävää materiaalia. Nämä jalostustoimenpiteet vaativat erillistä jalostus- tai käsittelyaluetta.

Kustannus-, toimivuus-, tuotanto- ja ympäristökuormituksia vertailtaessa moreeni-rakenteet osoittivat olevansa sekä tierakenteissa, kevyen liikenteen väylissä että piharakenteissa kustannustehokkaita, toimivia ja ympäristöystävällisempiä kuin tavanomaisesti käytetyt murskerakenteet. Toimivuudeltaan vähintään samanvertaisiksi arvioidut teräsverkon sisältävät rakenteet, joissa lievästi routivaa moreenia oli käytetty jakavassa kerroksessa, olivat noin 10 % edullisempia kuin vastaavat murskerakenteet. Moreenirakenteet ovat erityisen kilpailukykyisiä alueilla, jossa on käytettävissä lievästi routivaa pienehkön jalostustarpeen vaatimaa materiaalia.

Tärkein käytön este tutkimuksessa esitetyille moreenia sisältäville maarakenteille on käyttökokemuksen puute ja toimivuusriskit. Koska maarakenteiden käyttöikä on pitkä, ei niihin liittyviä pitkäaikaisia riskejä haluta ottaa. Ilman tilaajien ja urakoitsijoiden luottamusta rakenteiden toimivuuteen, ei moreenin todellista hyötykäyttöä voida merkittävästi lisätä, vaan lisäystä voidaan saada vain toissijaisissa käyttökohteissa. Toimivuuden osoittaminen käytännön alan toimijoille edellyttää koerakentamisen toteuttamista sekä kohteiden pitkäaikaista koordinoitua seuranta.

Tutkimuksessa tuli esille myös joitakin muita heikkolaatuisten materiaalien hyötykäytön esteitä tai ongelmia. Tässä tapauksessa esiin nousivat erityisesti lupa-käytännöt, niihin ja kaavoitukseen liittyvät valituskierrokset, riskien jakamisen periaatteet, aikataulu- ja varastointilakysymykset, kilpailuttamisvaatimukset, ympäristöllisten ja taloudellisten kannustimien puute sekä se, että heikkolaatuisten materiaalien jalostamisen työtekniikoita, tuotteita tai menetelmiä ei ole tuotettu.

Aluerakentamiskohteissa merkittävä asia valmisteluvaiheessa on kaavoituksen ja lupien hankinnan hallinta. Kaavoitusvaiheessa tulee osoittaa alueet maankäsitteilytoiminnoille ja määräaikaiselle varastoinnille. Tämä vähentää merkittävästi toteutusvaiheen lupaongelmia. Toisaalta se asettaa uusia vaatimuksia kaavoitusosaamiselle, jotta näihin liittyvistä virheistä ei aiheudu perusteita kaavavalituksille.

Aluerakentamiskohteissa ongelmana on lisäksi, että alueella on yhtä aikaa monta toimijaa rakentamassa eri tontteja ja katu- yms. rakennuskohteita ja toimijat optimoivat omia osaprojektejaan erityisesti taloudellisuuden kannalta. Tonttien luovutusehdoissa tulisi harkita vaatimuksia osallistua alueellisen massojen käsittelyn järjestelyihin. Näiden vaatimusten tulee koskea myös julkisten alueiden urakointia.

Heikkolaatuisten maa-ainesten jalostamista ja hyötykäyttöä tulee edistää myös urakkakilpailumenettelyillä. Julkisen sektorin tulee siirtyä urakkakilpailuissa kokonaistaloudellisesti edullisimman tarjouksen valintaan ja ottaa laatutekijöiden pisteytyksessä huomioon luonnonmateriaalien käyttö sekä tarjotun vaihtoehdon edellyttämä kuljetustarve. Toinen vaihtoehto on ohjata toimintaa maamassojen vastaanottomaksuilla tai jäteveroilla, mutta lyhyellä aikavälillä nämä nostavat kustannuksia.

Eräs mahdollisuus hallinnoida paremmin eri alueiden massoja on esirakentaa aluerakentamiskohteita tiettyyn tasoon, jolloin julkinen taho voi ohjata yksityiskohtaisemmin raakamaan jalostamista. Tavoitteena olisi siis, että eniten ongelmia

ja lupia vaativat maarakentamisen työvaiheet sisältäen maamassojen pääasiallisen käsittelyn (pöly, melu, värinä) pystyttäisiin hoitamaan keskitetysti.

Vastaavasti kuin tutkimuksessa esitetyistä rakennetyypeistä tulee hankkia käytännön kokemuksia, pitää heikkolaatuisten maa-ainesten jalostusmenetelmiä kehittää käytännön hankkeissa. Moreenin murskausta ja seulontaa sekä sekoitusmenetelmiä ja näihin liittyvää kalustoa tulee testata ja tulokset raportoida laajasti toimialalle.

Tärkein peruste heikkolaatuisten maa-ainesten käytön lisäämiselle on luonnonvarojen säästäminen ja haitallisten ympäristövaikutusten vähentäminen. Yksittäisten tekniikoiden kehittämisen lisäksi tarvitaan viranomaisten ja alan muiden toimijoiden sitoutumista ja toimenpiteiden määrittelyä ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi.

12 Jatkotutkimusehdotukset

Tulevaisuudessa tarvitaan kehittyneempiä arviointijärjestelmiä ja laskentatyökaluja arvioimaan ratkaisujen ympäristövaikutuksia ja arvioimaan niitä hyötyjä, joita voidaan saavuttaa käyttämällä ja jalostamalla paikallisia materiaaleja. Myös tilaajien mielenkiinto käyttää ekotehokkuutta yhtenä valintakriteerinä tieinvestointien hankinnassa lisää tarvetta kehittää näitä järjestelmiä ja työkaluja. Arviointi edellyttää riittäviä tietoja tarkasteltavista kohteista ja niiden sisältämistä rakenteista. Taustatiedoiksi tarvitaan mm. suunnitteluohjelmista saatavia massa- ja logistiikkatietoja tietoja käytettävistä työmenetelmistä ja -koneista, sekä eri materiaalien ympäristöprofiileja, joiden perusteella voidaan laskea tarkasteltavien vaihtoehtojen ympäristökuormitukset. Tämä työkalu voidaan implementoida suunnitteluohjelmiin tai se voidaan toteuttaa erillisenä laskentaohjelmana.

Ekotehokkuuden huomiointi hankinnassa edellyttää, että ohjeistetut tai yleisesti hyväksytyt menettelyt ympäristövaikutusten sisällyttämiseksi hankinnan päätöksentekoon ovat olemassa. Tämä työ on jo käynnissä mm. Tiehallinnossa /Valkeisenmäki et al. 2008/. Menettelyt tai ainakin niiden painoarvot lienevät tulevaisuudessa sektori- ja urakkatyypikohtaisia noudattaen kuitenkin yhteisesti hyväksytyjä pelisääntöjä. Kehittäminen tulisi siis tehdä alan kanssa yhteistyössä.

Hyötykäytön tehostaminen edellyttää myös moreenien jalostusmenetelmien tuoteistamista ja ohjeistamista, jota tuetaan laitteisto- ja menetelmäkehittämisellä.

Lähdeviitteet

- Ahonen, M., Holappa, T., Huttunen, E., Kivikoski, H., 2003, Mt 941 Männikkövaara, Kohderaportti TPPT 42, TPPT-tutkimusohjelma. Espoo. 55 s.
- Ahonen, M., Holappa, T., Huttunen, E., Kivikoski, H., 2004, Mt 595 Kiuruvesi, Kohderaportti TPPT 35, TPPT-tutkimusohjelma. Espoo. 51 s + liitt. 10 s.
- Eskola, Paula; Mroueh, Ulla-Maija; Juvankoski, Markku; Ruotoistenmäki, Antti. 1999. Maarakentamisen elinkaariarviointi. Espoo, VTT. 111 s. + liitt. 16 s. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes; 1962. ISBN 951-38-5446-9; 951-38-5447-7 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1962.pdf>
- Committee on Frost Actions in Soils. Frost I Jord (Frost Action in Soil). Nr. 17, Oslo, Norway (November 1976); in Norwegian.
- GTK 2008, Viitattu 24.6.2008. Rakentamisen kivi- ja maa-ainekset <http://www.gtk.fi/luonnonvarat/kiviaines/>
- Kauranne L.K. & al., 1972, Rakennusgeologia II. ISBN 951-671-017-4. Otakustantamo 1972. 530 s.
- Kivikoski, H., 2004, Mt 5950 Salahmi, Kohderaportti TPPT 36, TPPT-tutkimusohjelma. Espoo 2004. 41 s + liitt. 5 s.
- Korhonen, K-H., & Gardemeister, R., 1975, Maalajien kaivuluokitus. Tiedonanto 1. VTT, Geotekniikan laboratorio. Otaniemi 1975. 80 s. + liitt.
- Korkiala-Tanttu L., Kivikoski H., Rathmayer H. ja Törnqvist J., 2003, Teräsverkon käyttö tierakenteiden koerakennuskohteissa; synteesi. Helsinki 2003. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 34/2003. 41 s. + liitt. 13 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-096-0, TIEH 3200822. <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200822-verterasverkkayttierak.pdf>
- Korkiala-Tanttu L., Tenhunen J., Eskola P., Häkkinen T., Hiltunen M.-R. ja Tuominen A., 2006, Väylärakentamisen ympäristövaikutukset ja ekoindikaattorit; Ehdotus arviointijärjestelmäksi, Tiehallinnon selvityksiä 22/2006, 53 s. + app. 36 s.
- Kvick, M., 1997, Maantien 595 parantaminen välillä Luupuvesi-Salahmi. TPPT-kohde. Päättötyö, Pohjois-Savon ammattikorkeakoulu 1997. 69 s. + liitteet.
- Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U-M., Wellman, K. & Mäkelä, E. Maarakentamisen elinkaariarviointi. Ympäristövaikutusten laskentaohjelma. VTT Tiedotteita 2014. Espoo 2000, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2014.pdf>
- Mikkola, K., 1996, Maantien 941 parantaminen välillä Männikkövaara - Posion kunnanraja. TPPT-kohde. Insinööriyö, Rovaniemen teknillinen oppilaitos. 49 s. + liitteet.
- Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H., Kettunen, A., Viikin savikatu. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Julkaisu 81/2000. Helsinki 2000.
- Mäkelä, K. TRALCA-järjestelmä. VTT:n sisäisessä käytössä oleva liikenteen ja työkonien elinkaari päästöjen laskentajärjestelmä.

Rakennustieto, 2006, InfraRYL 2006, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja alueet, Helsinki, 621 s.

Rekola Maija, 2008, Rakentamisessa syntyvien ylijäämäkivi- ja maa-ainesten hyötykäyttö, diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2008

Saarelainen, Seppo, 1990, Routavaurioiden korjausrakenteet valtiolla 21 Peetrassa. Mitoitus, koerakentaminen ja seuranta v. 1986 - 1988. Espoo 1990. 62 s. + liitt. 15 s.

SFS-EN ISO 14688-2, 2008, Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan tunnistaminen ja luokitus. Osa 2: Luokituksen perusteet. Suomen Standardoimisliitto, Helsinki, p. 33.

SGU 2007a. Grus, sand och krossberg [WWW]. 2005. Sveriges geologiska undersökning. [Viitattu 17.11.2006] Saatavissa: http://www.sgu.se/dokument/service_sgu_publ/perpubl_2005-3.pdf

SGU 2007b. Kiviainestuotanto Ruotsissa, kuvaaja [WWW]. [Viitattu 17.11.2006] Saatavissa: http://www.sgu.se/pics/miljo_miljomal/ballast_1984-2004.gif

Suni, H. & Salmenkaita, S., 1996, Moreenien hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin, tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma (TPPT) TIEL 3200386 Tielaitoksen selvityksiä 17/1996.

Suni, H., 1998, Moreenin jalostaminen pellettoimalla: loppuraportti: tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma (TPPT)/Tuotanto, Konsultointi. Helsinki: Tielaitos, 1998. - 45 s. (Tielaitoksen selvityksiä, ISSN 0788-3722; 18/1998) 3200509.

Tie- ja vesirakennushallitus, 1986, Normaalmääräykset ja ohjeet. IV Tien rakennus (kansio B).

Tielaitos, 1993, Moreenin jalostaminen, Tielaitoksen selvityksiä 77/1993.

Tieleikkausten pohjatutkimukset, 1995, Tielaitos, Geokeskus, Geotekniikan informaatiojulkaisuja, ISBN 951-726-155-1, TIEL 3200354, Helsinki 1995.

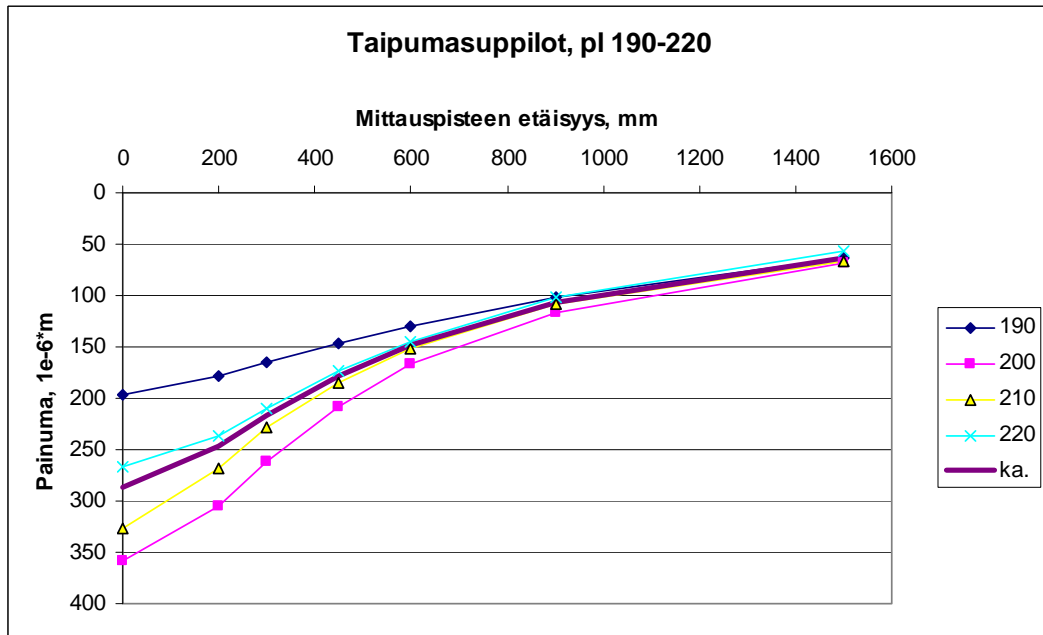
Tielaitos 1996, TPPT: Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin, Tielaitoksen selvityksiä 17/1996.

UEPG. 2007, [Viitattu 19.04.2007] Kiviainesten käyttö Euroopassa [WWW]. Saatavissa: http://www.uepg.eu/uploads/documents/122-10-uepg_statistics_2005-en.xls

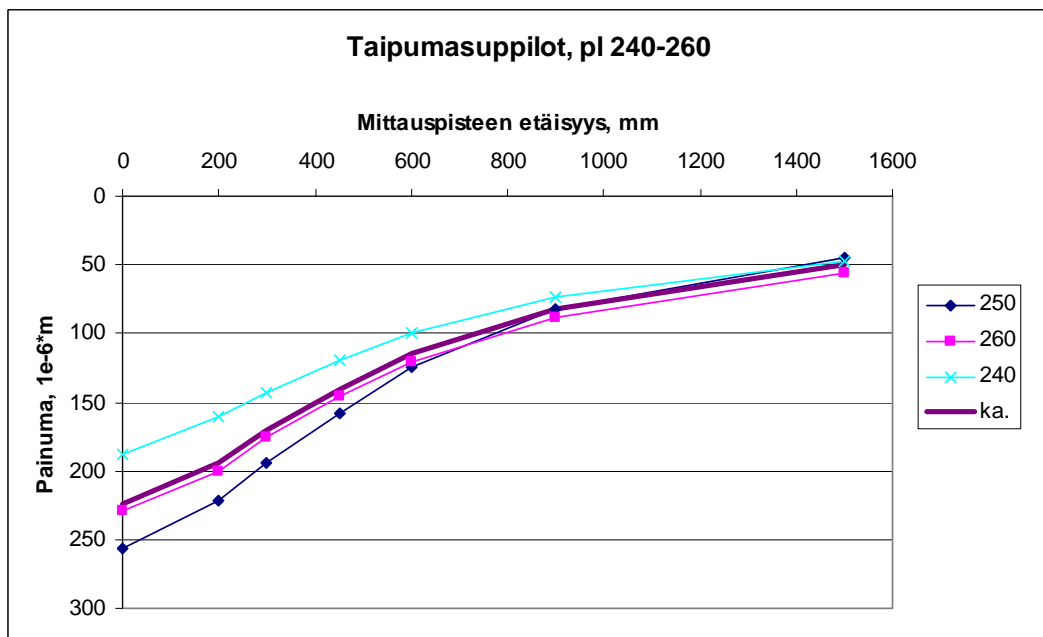
Valkeisenmäki, A., Eskola, P., Nousiainen, A., Antila, R., Mutanen, E. ja Kotilainen, K. 2008. Tienrakennuksen ekotehokkuuden parantaminen. Helsinki. Tiehallinto, Keskushallinto. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 39/2008, 40 s. + liitt. 5 s. ISSN 1459-1561, TIEH 4000637-v. http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/4000637-v-tie-rakenn_ekotehokk_parant.pdf

Vertainen Ilkka, 2008, puhelu 8.1.2008, www.megawatti.net

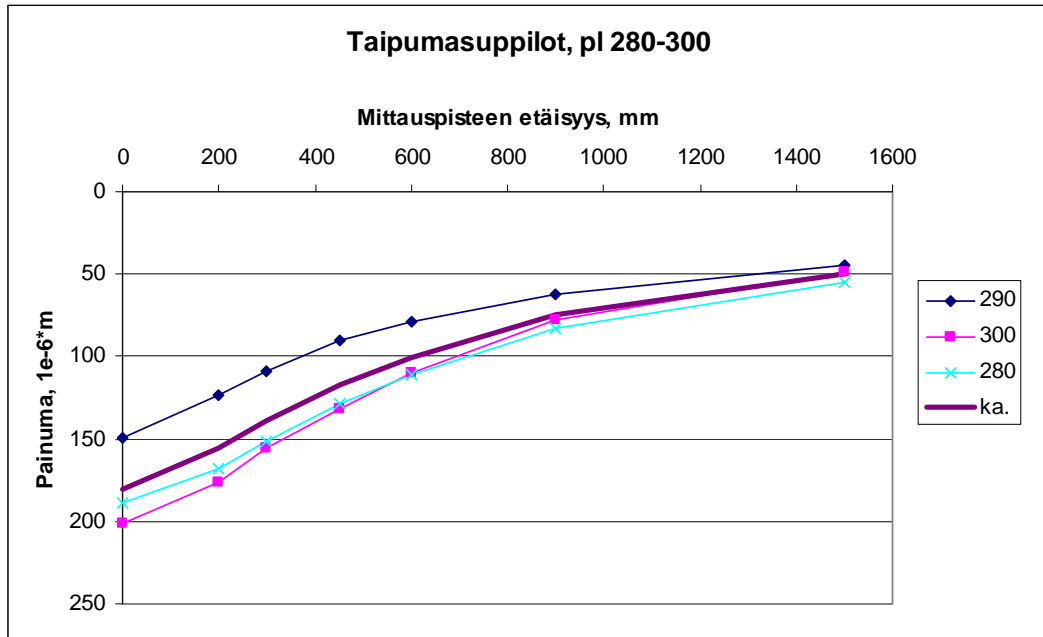
LIITE 1. Viikin savikatu, pudotuspainolaitemittaukset



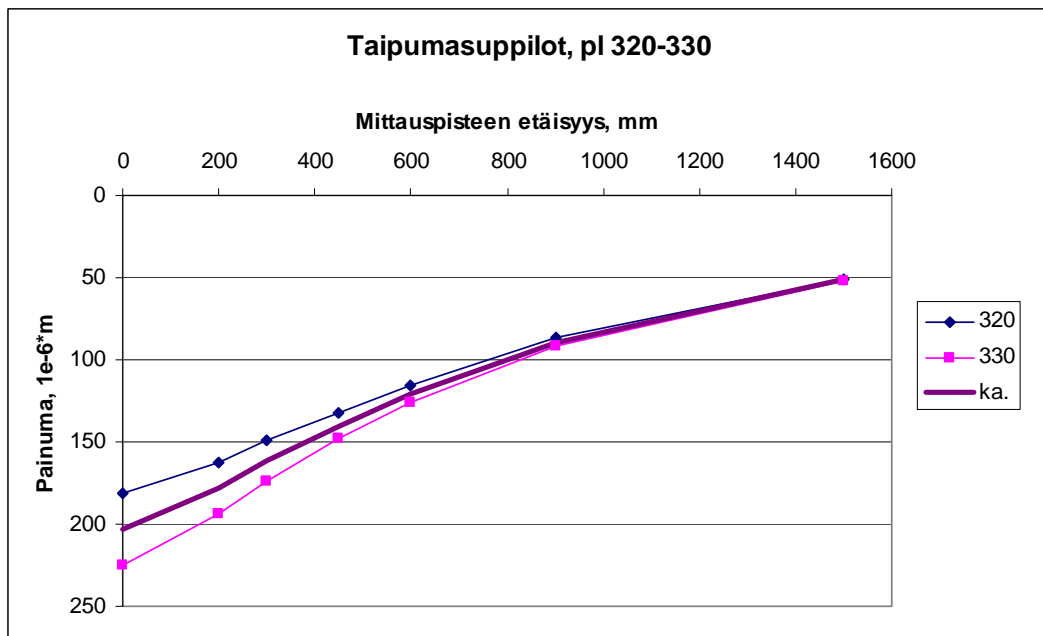
Kuva LI.1. Koealueen materiaali E1.



Kuva LI.2. Koealueen materiaali Se+CaO.



Kuva L1.3. Koealueen materiaali JMk+Se.



Kuva L1.4. Vertailurakenne. Vertailurakenne sisältää massastabiloidun saven tukikerroksena.

LIITE 2. Moreenin vedenimuominaisuuksien ja vedenläpäisvyyden määrittäminen

Tilavuusvesipitoisuuden ja negatiivisen huokospaineen sekä tilavuusvesipitoisuuden ja vedenläpäisvyyden väliset riippuvuudet määritettiin moreeneille ja hiekkale rakeisuuksien ja arvioidun tilavuuspainon perusteella käyttämällä van Genuchtenin mallia. van Genuchtenin mallissa (L1) kyllästysaste on /Högsta & Öberg 1992/

$$S_r = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + (\alpha_{vG} * h_c)^n)^m} \quad (L1)$$

missä S_r on kyllästysaste, -

α_{vG}	maaparametri, joka normalisoi kaikki maalajit samaan tasoon
θ	tilavuusvesipitoisuus, -
θ_r	residuaali tilavuusvesipitoisuus, -
θ_s	kyllästyneen tilan tilavuusvesipitoisuus, -
h_c	kapillaarinen nousukorkeus, m
n	maaparametri
m	maaparametri, $m = (1-1/n)$.

Parametrit α_{vG} ja n voidaan laskea rakeisuuskäyrän läpäisyprosentteja d_{75} ja d_{25} vastaavien raekokojen ja huokosluvun e (kiintotiheyden ja kuivatilavuuspainon) avulla. Kaavoissa L2 - L8 on esitetty eri apumuuttujien/parametrien kaavoja

$$\alpha_{AP} = e^{(0.312 * \log(d_{75} / d_{25}))} \quad (L2)$$

$$\frac{h_{25}}{h_{75}} = (d_{25} / d_{75})^{((3 * \alpha_{AP} - 1) / 2)} \quad (L3)$$

$$L = \log\left(\frac{h_{25}}{h_{75}}\right) \quad (L4)$$

$$n = -0.0983 + \frac{1}{1.0566 * L - 0.5486 * L^2 + 0.1008 * L^3} \quad (L5)$$

$$h_{75} = 0.0614 * \frac{1}{e^{1/2}} * \frac{1}{d_{75}^{((3 * \alpha_{AP} - 1) / 2)}} \quad (L6)$$

$$e = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_d} \quad (L7)$$

$$\alpha_{vG} = \frac{1}{h_{75}} (0.75^{-1/(1-1/n)} - 1)^{1/n} \quad (L8)$$

Parametrien määrittämisen jälkeen kyllästysaste on siis kapillaarisen nousukorkeuden funktiona L9 /van Genuchten/

$$S_r = \frac{1}{[1 + (\alpha_{vG} * h_c)^n]^m} \quad (L9)$$

ja vedenläpäisevyys k_s [m/s] kyllästysasteen funktiona L10

$$k = k_s * \left(\sqrt{S_r} * [1 - (1 - S_r^{1/m})^m]^2 \right) \quad (L10)$$

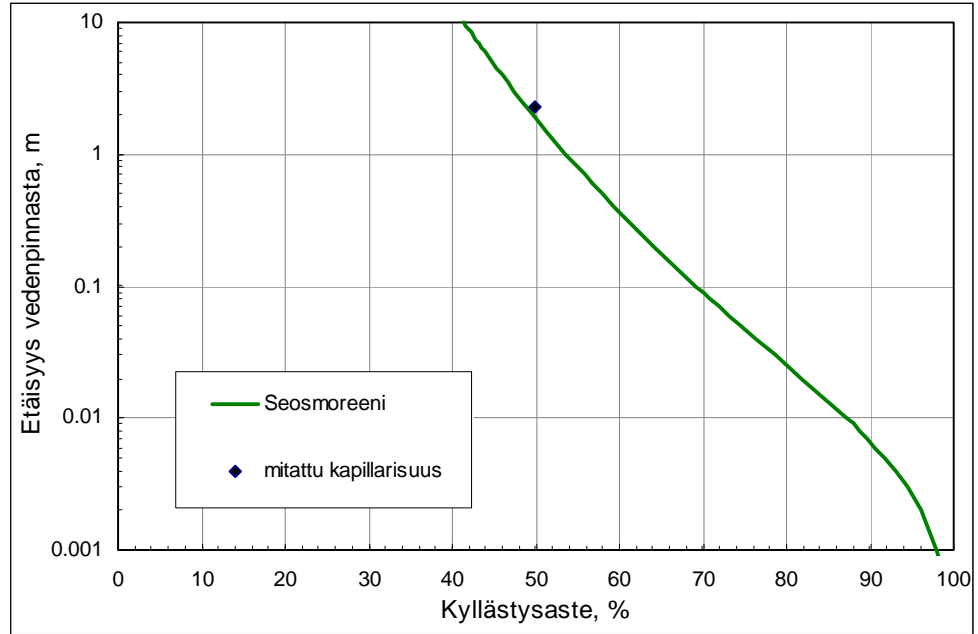
Taulukossa L2.1 on esitetty materiaaleille osin määritetyt ja osin lasketut arvot, joita on käytetty hyväksi laskelmissa tarvittavia lähtötietoja muodostettaessa.

Taulukko L2.1 Lähtötietojen muodostamisessa käytetyt arvot.

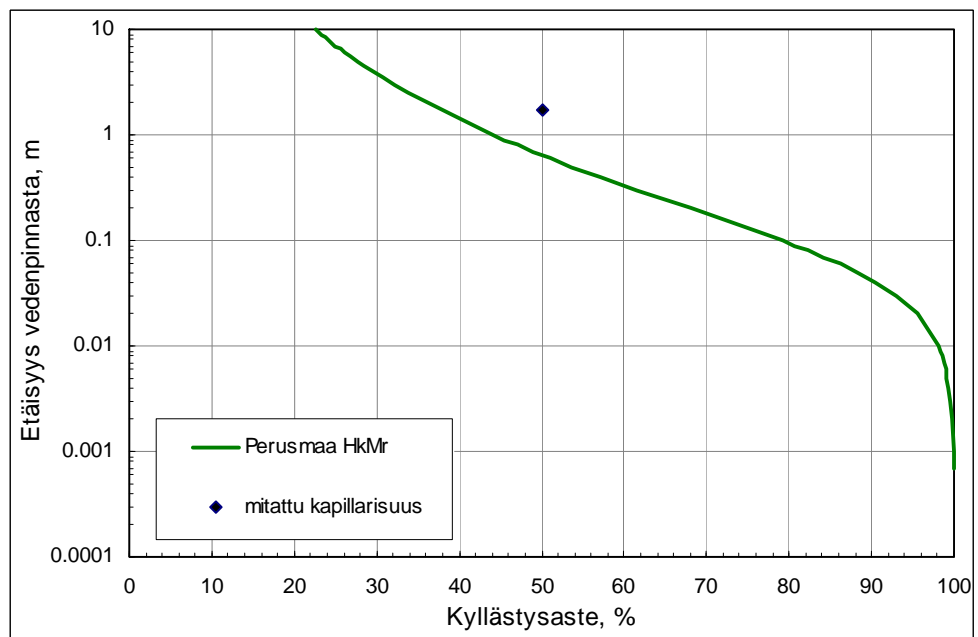
Kerros	Materiaali	d_{75} , mm	d_{25} , mm	kuivatilavuus- paino ρ_d , g/cm ³	huokoisuus, e, -	vedenläpäisevyys, k, m/s
Päällyste 1)					0.090	1.0E-08
Kantava	soramurske	31.429	2.000	2.000	0.245	2.1E-04
Moreenikerros 2)	seosmoreeni (alun perin)	1.375	0.050	1.900	0.283	3.8E-08
	seosmoreeni (käytetty)	1.375	0.050	1.748	0.340	2.0E-07
	seosmoreeni (karkeutettu)	1.375	0.100	1.748	0.340	4.1E-06
Kuivatuskerros	karkea Hk	1.929	0.440	1.800	0.321	4.7E-04
Pohjamaa	HkMr	0.808	0.057	1.835	0.308	4.1E-07
Luiskatäyte 3)	HkMr	0.808	0.057	1.835	0.308	4.1E-07

- 1) Päällystekerrokset on kuvattu yhtenä asfalttikerroksen, jonka paksuus on 10 cm ja vedenläpäisevyys normaalisti $1 \cdot 10^{-8}$ m/s ja tilavuusvesipitoisuus 9 % imupaineen suuruudesta riippumatta. Vedenläpäisevyyttä on tarkasteluissa vaihdeltu rajoissa $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-10}$ m/s. Myös tilavuusvesipitoisuutta vaihdeltiin tarkastelussa.
- 2) Alun perin seosmoreenin ominaisuudet valittiin kuivatilavuuspainon maksimin perusteella; varsinaiset laskelmat on tehty käyttäen tilavuuspainona 92 %:ia Proctor-tiivyydestä.
- 3) Luiskatäyte on tarkasteluissa perusmaan hiekkamoreeni; kohteessa on käytetty myös seosmoreenia luiskatäyteenä.

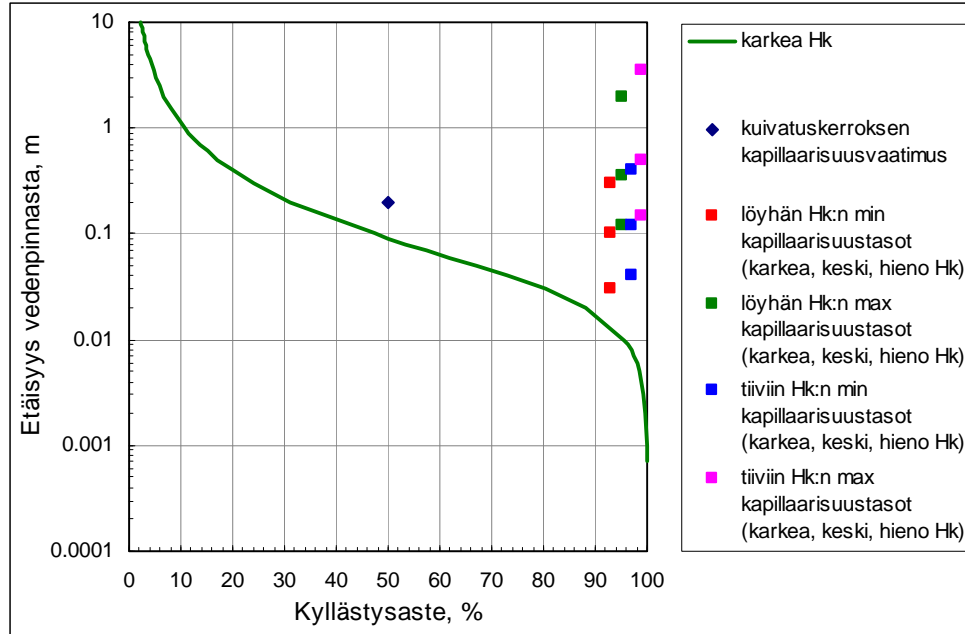
Taulukon L2.1 arvoilla ja kaavoilla 9 - 10 määritettiin seosmoreenin kapillaarisuudeksi 2,0 m (havaittu h_c 2,3 m), perusmaan kapillaarisuudeksi 0,65 m (h_c 1,7 m) ja karkean hiekan kapillaarisuudeksi 90 mm (vaatimus < 200 mm). Seosmoreenin kapillaarisuus vastaa melko hyvin havaittua kapillaarisuutta. Perusmaan kapillaarisuus jää melko paljon havaittua arvoa pienemmäksi. Vaikka perusmaan kuivatilavuuspaino nostettaisiin 2,2 g/cm³, jäisi kapillaarisuus edelleen alle 1 m:n. Kuvissa L2.1 - L2.3 on esitetty van Genuchtenin kaavalla saadut rakeisuuksiin perustuvat vedenimukäyrät ja mitatut kapillaarisuudet. Karkean hiekan kuvaajassa on lisäksi esitetty eri hiekkalajitteiden tyypillisiä kapillaarisuuden arvoja eri tiivystiloissa.



Kuva L2.1. Seosmoreenin vedenimukäyrä ja seosmoreenille mitattu kapillarisuus.



Kuva L2.2. Perusmaan moreenin vedenimukäyrä ja mitattu kapillaarisuus.



Kuva L2.3. Kuivatuskerroksen vedenimukäyrä ja materiaalille asetettu kapillaarisuusvaatimus.

Laskennallisissa tarkasteluissa ongelmana oli myös käytettyjen moreenien vedenläpäisevyyksien arviointi. Luotettavaa systemaattista tapaa vedenläpäisevyyden arvioimiseksi esimerkiksi rakeisuuteen tai kapillaariseen nousuun perustuen ei ole olemassa. Moreenien vedenläpäisevyyden suuruusluokan arvioimiseksi tehtiin kuitenkin seuraava tarkastelu.

Vedenläpäisevyyttä tarkasteltiin viitteissä /Nieminen & Kellomäki 1982/ ja /Nieminen 1985/ esitettyjen määritysten pohjalta. Nieminen /Nieminen 1985/ on kuitenkin todennut, ettei (alle 16 mm aineksesta) määritetyillä kapillaarisen nousukorkeuden ja hydraulisen johtavuuden välillä havaita keskinäistä riippuvuussuhdetta. Vedenläpäisevyysaineisto koostui 46 näytteestä, jotka edustivat moreeneja savisesta siltimoreenista soraiseen hiekkamoreeniin (taulukko L2.2).

Taulukko L2.2. Moreeninäytteiden ominaisuudet /Nieminen & Kellomäki 1982/ ja /Nieminen 1985/.

Näyte	Maalaji	Kapillaarisuus, h, m	d 0.074, %	d 0.002, %	Hydraulinen johtavuus, k, m/s
2	SrHkMr	0.26	13	5	2.81E-06
3	SrHkMr	0.65	19	3	6.80E-07
4	SrHkMr	0.42	21	3	1.66E-05
7	HkMr	1.2	23	5	2.22E-06
8	HkMr	7.85	28	4	1.50E-07
9	SiHkMr	0.27	30	2	2.16E-05
10	SiHkMr	1.1	35	5	5.80E-07
11	SiHkMr	1.05	36	2	1.17E-06
12	SiHkMr	2.15	46	7	5.50E-07
13	SiHkMr	1.36	41	5	5.20E-07
17	SiHkMr	0.98	49	4	8.50E-07
18	SiHkMr	6.95	49	15	5.40E-07
19	HkSiMr	1.37	52	10	1.60E-07
52	HkMr	0.6	22	3	1.74E-05
54	SiHkMr	1.24	21	2	1.83E-06
55	SiHkMr	1.5	33	2	4.20E-07
56	SiHkMr	2.73	35	7	3.41E-06
57	SiHkMr	1.46	35	7	3.08E-06
58	SiHkMr	1.11	36	4	5.10E-07
59	SiHkMr	0.7	39	4	4.70E-07
61	SiHkMr	2.73	40	6	8.70E-08
63	SiHkMr	2.11	41	7	5.40E-07
64	SiHkMr	1	42	4	1.28E-06
67	SiHkMr	0.77	43	4	1.12E-06
69	SiHkMr	0.3	46	10	3.38E-06
71	SiHkMr	1.15	47	2	2.65E-06
72	SiHkMr	1.68	47	10	7.30E-07
74	SiHkMr	2.49	47	3	1.04E-05
75	SiHkMr	1.82	42	1	6.90E-07
77	HkSiMr	2.86	56	8	1.91E-06
78	SaSiMr	9	47	13	1.06E-06
79	HkSiMr	1.44	59	7	2.60E-07
95	SiHkMr	0.99	35	1	2.53E-06
96	HkMr	0.42	23	3	1.47E-05
106	SrHkMr	0.81	15	1	9.89E-06
107	HkMr	0.39	21	2	1.62E-06
110	SiHkMr	1.14	40	1	8.60E-07
117	HkMr	0.38	25	3	1.36E-05
118	SiHkMr	0.72	36	3	1.48E-06
120	HkMr	0.7	27	2	1.72E-06
126	SiHkMr	1.8	39	6	8.20E-07
129	SiHkMr	1.89	33	4	2.80E-07
133	SiHkMr	1.13	31	4	7.40E-06
134	SiHkMr	1.58	38	2	1.87E-06
145	SiHkMr	1.84	36	3	3.21E-06
147	SiHkMr	9	46	15	4.20E-07

Aineistoon testattiin ensin ns. Hazenin kaavan soveltuvuutta, jossa kertoimelle C_1 käytettiin arvo 1,5. Kaava 12 on tarkoitettu lähinnä löyhälle suodatinhiekalle. Sekarakeisissa maissa pienet rakeet kuitenkin määräävät läpäisevyyttä keskimääristä enemmän, joten kaavassa käytettävä raekoko d_{10} (läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko) soveltuu sen puolesta jollainlailla myös moreenien tarkasteluun. Kaavassa L11 käytettävä kerroin C_1 löyhällä suodatinhiekalla on 1,0 - 1,5. Moree-

niaineistossa ei läpäisyprosenttia 10 vastaavaa raekoko ollut käytettävissä, joten se määritettiin raekokoja $d_{0,002}$ mm ja $d_{0,074}$ mm vastaavien läpäisyprosenttien avulla niille näytteille, joille se oli mahdollista tehdä ($d_{0,002} < 10\%$). Kaavalla saadaan havaintoihin kohtuudella sopivia vedenläpäisevyyksiä, kun kerroin C_1 on 0,6.

$$k = C_1 * d_{10}^2 \quad (L11)$$

missä k on vedenläpäisevyys, m/s

C_1 kerroin

d_{10} raekoko läpäisyprosentin 10 kohdalla, cm (huom. yksikkö kaavassa).

Toisessa riippuvuutta selvittävässä tarkastelussa vedenläpäisevyydelle tehtiin paloittaiset sovitusfunktiot kapillaarisen nousukorkeuden suhteen. Sovittaminen suoritettiin ainoastaan niille näytteille, joissa kapillaarisen nousukorkeuden arvoksi oli saatu alle 2,0 m. Jäljelle jääneistä 34 näytehavainnoista poistettiin vielä 7 näytteen havainnot, jonka jälkeen saatiin taulukossa L2.3 esitetyt riippuvuus-suhteet kapillaarisen nousukorkeuden ja vedenläpäisevyyden välille. Jäljempänä tällä paloittaisella funktiolla käytetään nimitystä ”hc1”.

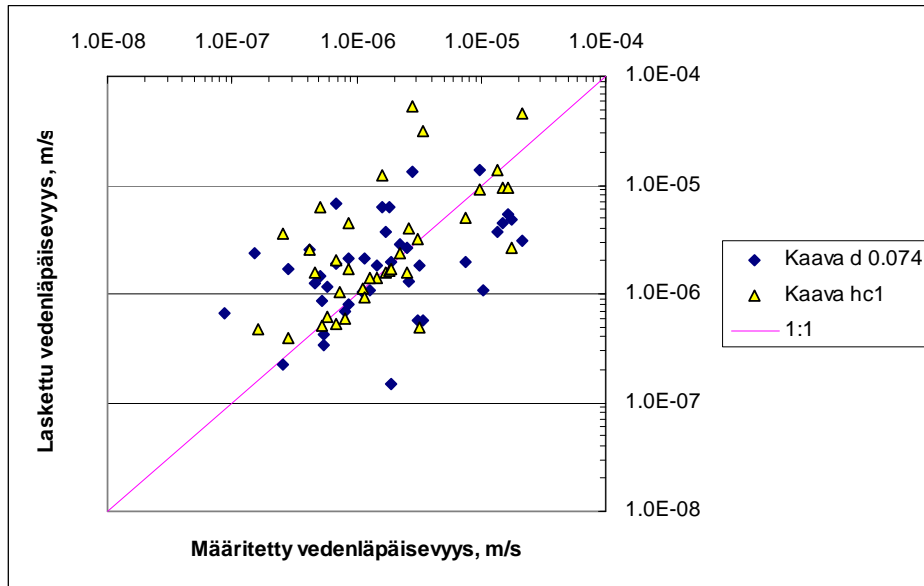
Taulukko L2.3. Moreenin vedenläpäisevyys kapillaarisen nousukorkeuden funktiona.

Kapillaarinen nousukorkeus, h_c	Vedenläpäisevyys, k , m/s (tekstissä kaava hc1)	R^2
$h_c < 0,8$ m	$k = 4,38 * 10^{-7} * h_c^{-3.55}$	0,66
$h_c < 1,1$ m	$k = 1,41 * 10^{-6} * h_c^{-8.87}$	0,85
$h_c < 1,4$ m	$k = 2,27 * 10^{-5} * h_c^{-12.3}$	0,90
$h_c < 2,0$ m	$k = 6,67 * 10^{-5} * h_c^{-8.06}$	0,88

Tarkastelusta poistetut näytteet (7 kpl) olivat etupäässä silttisiä hiekkamoreeneja (5 kpl), hiekkamoreeni (1 kpl) ja sorainen hiekkamoreeni (1 kpl). Poiston perusteluina oli se, että muodoltaan suhteellisen samanlaiset riippuvuudet saatiin näin aikaiseksi. Jo aineiston alkuperäisen tarkastelun yhteydessä on todettu, ettei kahden erilaisen veden liikkumismuodon välillä ole havaittavissa riippuvuussuhdetta. Poisto pitääkin tässä nähdä eräänlaisena mahdollisesti virheellisten havaintojen poistamisena, koska näiden suureiden määrittämisessä voi tapahtua virhe mm. siinä, että kapillaarisuuden määrittämisessä näyte on aina varmasti kyllästynyt, kun taas vedenläpäisevyyden määrittämisessä näytteeseen huokostilaan jäävät kuplat voivat estää veden kulkeutumista.

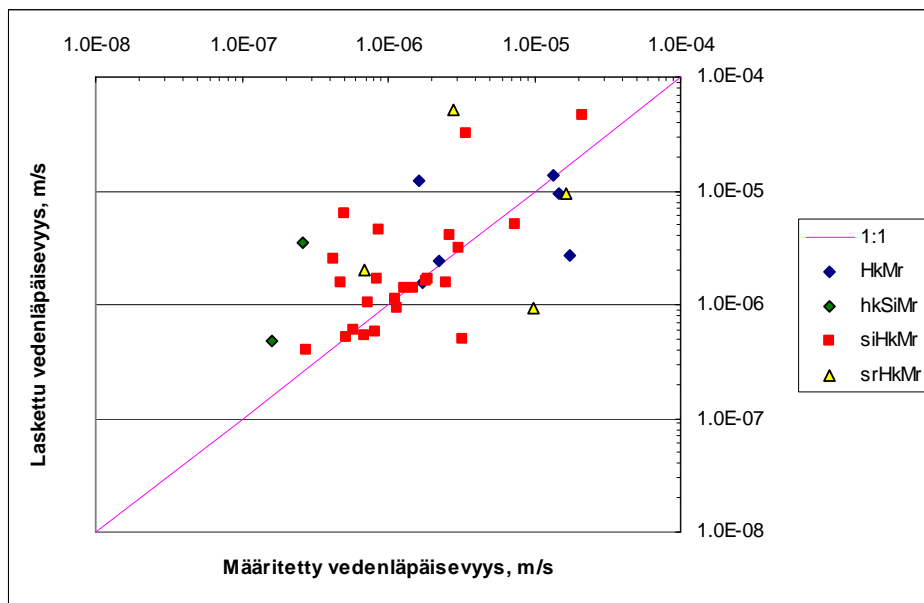
Sekä ns. Hazenin kaavan soveltamisella, että kapillaarisuuden perusteella johdetuilla sovitusfunktiolla saadut vedenläpäisevyyden arvot suhteessa mitattuihin vedenläpäisevyyden arvoihin on esitetty kuvassa L2.4.

Hazenin kaavan sovelluksella saatiin lasketulle läpäisevyydelle arvoja, jotka olivat keskimäärin 2,27-kertaisia määritettyyn arvoon nähden (minimissään 0,08 - kertaisia ja maksimissaan 16-kertaisia; kyseessä kuitenkin yksittäin arvo - seuraavaksi suurin arvo on 9,9). Kaava hc1 antoi puolestaan n. 3 -kertaisia arvoja (min 0,15, max 19). Kaavalla hc1 saadut arvot näyttäsivät sopivan melko hyvin laskennallisiin arvoihin (kuva L2.5).



Kuva L2.4. Määritetyt ja eri tavoin lasketut moreeninäytteiden vedenläpäisevyys-

det.

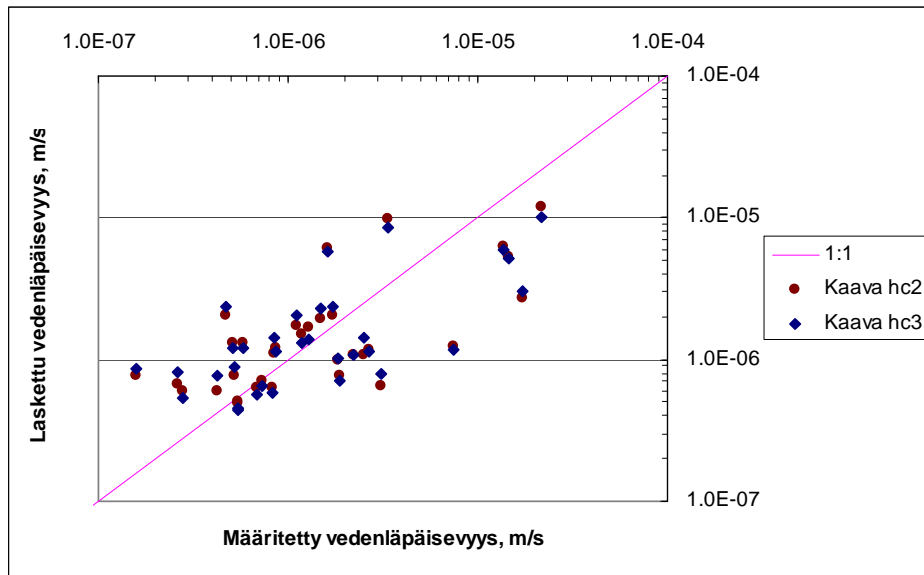


Kuva L2.5. Kaavalla hc1 saadut tulokset maalajeittain.

Kapillaarisen nousukorkeuden avulla määritettävää vedenläpäisevyyden sovitusta yritettiin parantaa vielä poistamalla aineistosta soraiset hiekkamoreenit. Samalla suurin kapillaarisuuden arvo nostettiin 2,2 m:iin. Paloittaisen sovitusten (kaava hc2, ks. taulukko L2.4) korrelaatiokertoimet kuitenkin heikkenivät suuresti ja parhaiten tähän aineistoon sopi koko aineistolle tehty sovitus (kaava hc3; ks. taulukko L2.4). Molemmilla kaavoilla (hc2 ja hc3) saatiin keskimäärin 1,4 -kertaisia (min 0,16, max 5) arvoja määritettyihin läpäisevyyksiin nähden.

Taulukko L2.4. Moreenin vedenläpäisevyys kapillaarisen nousukorkeuden funktiona (ilman $srHkMr:a$).

Kapillaarinen nousukorkeus, h_c	Vedenläpäisevyys, k , m/s (tekstissä kaava $hc2$)	R^2
$h_c < 1,0$ m	$k = 1,07 \cdot 10^{-6} \cdot h_c^{-1.84}$	0,39
$h_c < 1,5$ m	$k = 1,69 \cdot 10^{-6} \cdot h_c^{-2.53}$	0,08
$h_c < 2,2$ m	$k = 1,49 \cdot 10^{-6} \cdot h_c^{-1.45}$	0,11
	(tekstissä kaava $hc3$)	
$h_c 0 - 2,2$ m	$k = 1,40 \cdot 10^{-6} \cdot h_c^{-1.5}$	0,46



Kuva L2.6. Kaavoilla $hc2$ ja $hc3$ (kaavat taulukossa L3.3) lasketut vedenläpäisevydet mitattujen vedenläpäisevyysien suhteen.

Sovitusta yritettiin vielä parantaa huomioimalla moreenin hienoaineksesta määritetty hienoaineksen tilavuuspaino ja näennäistiheyttä vastaava huokoisuus. Nämä tiedot oli käytettävissä ainoastaan 29 maanäytteestä ja määrä kutistui edelleen 22:een, kun jätettiin pois havainnot, joissa kapillaarinen nousukorkeus oli yli 2,2 m. Aineisto on esitetty taulukossa L2.5.

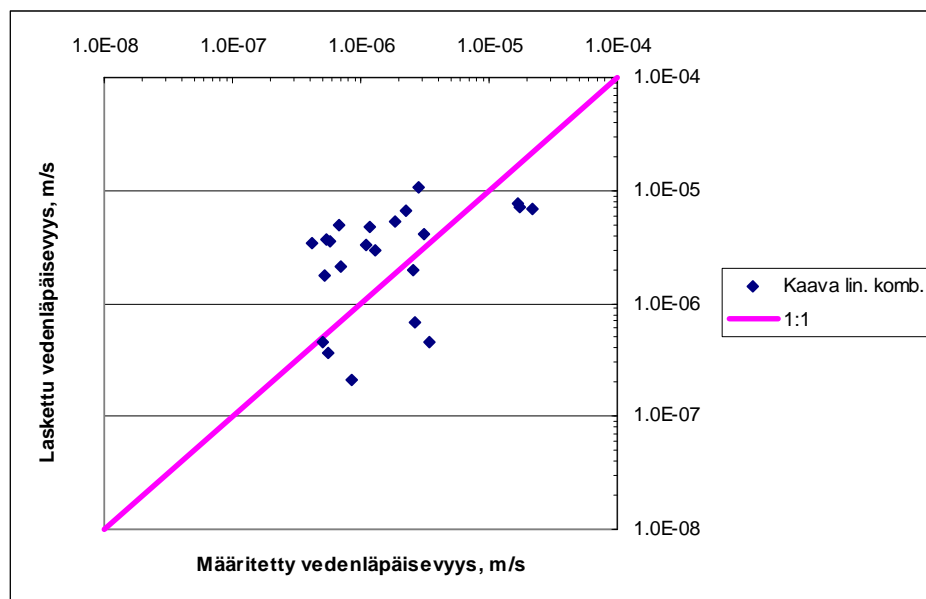
Lineaarikombinaatiokaavan kertoimille etsittiin kertoimet pienimmän neliösumman menettelyllä (kaava L12). Kaavalla L12 saadut vedenläpäisevydet olivat 0,14 - 8,22 -kertaisia määritettyyn läpäisevyyteen nähden (kuva L3.4).

$$k = -3.5 \cdot 10^{-7} \cdot \rho + 1.93 \cdot 10^{-7} \cdot \phi + 2.34 \cdot 10^{-8} \cdot h_c - 3.7 \cdot 10^{-9} \cdot d_{0.074}^2 + 6.75 \cdot 10^{-11} \quad (L12)$$

missä k on vedenläpäisevyys, m/s
 ρ hienoaineksen tilavuuspaino, g/cm^3
 ϕ näennäistiheyttä vastaava huokoisuus, -
 h_c kapillaarinen nousukorkeus, m
 $d_{0.074}$ ko. raekoon läpäisyprosentti, %.

Taulukko L2.5. Hienoaineksen tilavuuspaino- ja huokoisuusmääriykset sisältävät moreeninäytteet /Nieminen 1982/ ja /Nieminen 1985/.

Näyte	Maalaji	Hienoaineksen tilavuuspaino g/cm ³	Näennäis-huokoisuus, %	Todellinen huokoisuus, %	Kapillaarisuus, h, m	d 0.074, % alle 16 mm aineksesta	d 0.002, % alle 16 mm aineksesta	Hydraulinen johtavuus, k, m/s
2	SrHkMr	0.90	60.7	66.4	0.26	13	5	2.81E-06
3	SrHkMr	1.31	34.4	52.6	0.65	19	3	6.80E-07
4	SrHkMr	0.85	49.2	67.9	0.42	21	3	1.66E-05
7	HkMr	0.93	45.6	66	1.2	23	5	2.22E-06
8	HkMr	1.10	35	59.4	7.85	28	4	1.50E-07
9	SiHkMr	1.12	54.2	59.7	0.27	30	2	2.16E-05
10	SiHkMr	1.14	44	58.4	1.1	35	5	5.80E-07
11	SiHkMr	1.17	51.5	56.8	1.05	36	2	1.17E-06
12	SiHkMr	1.29	44.4	53.4	2.15	46	7	5.50E-07
13	SiHkMr	1.35	43.5	52.3	1.36	41	5	5.20E-07
17	SiHkMr	1.11	48.9	58.6	0.98	49	4	8.50E-07
18	SiHkMr	1.04	45.7	63	6.95	49	15	5.40E-07
19	HkSiMr	1.22	39.8	55.2	1.37	52	10	1.60E-07
52	HkMr	1.13	48	58	0.6	22	3	1.74E-05
54	SiHkMr	1.26	38.4	55.2	1.24	21	2	1.83E-06
55	SiHkMr	0.94	40.2	66	1.5	33	2	4.20E-07
56	SiHkMr	1.15	47.8	58.1	2.73	35	7	3.41E-06
57	SiHkMr	1.20	46.4	56.4	1.46	35	7	3.08E-06
58	SiHkMr	1.18	29.1	58.3	1.11	36	4	5.10E-07
61	SiHkMr	1.11	53.6	58.9	2.73	40	6	8.70E-08
63	SiHkMr	0.90	52.7	67.8	2.11	41	7	5.40E-07
64	SiHkMr	1.12	50.9	58.9	1	42	4	1.28E-06
67	SiHkMr	1.03	54.4	63	0.77	43	4	1.12E-06
69	SiHkMr	1.10	44.8	60.2	0.3	46	10	3.38E-06
71	SiHkMr	1.24	47.9	54.8	1.15	47	2	2.65E-06
75	SiHkMr	1.20	46.7	56.2	1.82	42	1	6.90E-07
77	HkSiMr	1.17	54.8	56.7	2.86	56	8	1.91E-06
78	SaSiMr	0.74	36	73.6	9	47	13	1.06E-06
95	SiHkMr	1.30	36	52.7	0.99	35	1	2.53E-06



Kuva L3.4. Määritetty ja kaavalla L12 laskettu moreenin vedenläpäisevyys.

Moreenin läpäisevyys riippuu myös muita tekijöistä. Raekoon ohella tilavuuspaino ja huokoisuus vaikuttavat läpäisevyyteen merkittävästi. Tässä esitetyllä rakeisuuteen perustuvalla kaavalla näyttäisi olevan mahdollista arvioida läpäise-

vyys noin dekadin tarkkuudella ja periaatteessa kapillaarisen nousukorkeuden perusteella maalaji huomioiden jopa vielä vähän tarkemmin. Kapillaariseen nousukorkeuden määrittämiseen sisältyy kuitenkin jo sinällään melko suuri tulosten hajoamisen mahdollisuus, nousukorkeuden määrittämisestä riippuen. Moreenin vedenläpäisevyys tulisikin määrittää aina, kun sitä tarvitaan suunnittelun pohjana. Esitetyt menettelyt soveltuvat alustavaan suunnitteluun.

Seosmoreenin vedenläpäisevyydeksi arvioitiin alun perin käsikirjoissa esitettyyn aineistoon ja kokemukseen perustuen $3,8 \cdot 10^{-8}$ m/s. Raekokoon perustuvilla menettelyillä saatiin suurempia vedenläpäisevyyksiä, esim. Hazenin kaavalla L12 $2,9 \cdot 10^{-7}$ m/s ($C_1 = 1,5$), mikä on 5.2-kertainen alun perin valittuun arvoon nähden. Laskelmissa käytettiin näiden perusteella arvioitua seosmoreenin vedenläpäisevyyttä eli $2,0 \cdot 10^{-7}$ m/s. Moreeniaineistolla myöhemmin tehdyn tarkastelun pohjalta Hazenin kaavalla ($C_1 = 0,6$) saatiin läpäisevyydeksi $1,16 \cdot 10^{-7}$ m/s, mikä puolestaan on noin 3-kertainen alun perin valittuun ja noin 2-kertainen käytettyyn arvoon nähden.

Viitteet:

Högsta, U., Öberg, A-L., 1992, Negativa portryck och dess betydelse för stabilität i silt och sandslänter. Examarbete. Rapport X 92:1. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för geoteknik med grundläggning, 1992. 39 s

Nieminen, P. & Kellomäki, A., 1982, Moreenin hienoaineksen huokoisuudesta. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakennusgeologia, Raportti 10. 123 s.

Nieminen, P., 1985, Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkyyteen. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisuja 34. Tampere 1985. 92 s., + 12 s. liitteet.

van Genuchten, M. Th. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Science Society of America Journal 44, 892-898. www-sivuilta Rocscience geotechnical software. [Viitattu 15.4.2008]

Saatavissa:
[http://www.rocscience.com/downloads/phase2/webhelp/phase2_model/Define_Hydraulic_Properties_\(Seepage_Analysis\).htm](http://www.rocscience.com/downloads/phase2/webhelp/phase2_model/Define_Hydraulic_Properties_(Seepage_Analysis).htm)

LIITE 3. Jakavan kerroksen moreeni; laskennalliset tarkastelut

Tarkastelujen taustaa

Laskennallisten tarkastelujen tavoitteena oli selvittää kuivatuskerrosten sijoittamisen vaikutus sandwich-rakenteissa ns. märkien materiaalien käyttäytymiseen ja edelleen rakenteen käyttäytymiseen. Toisena tavoitteena oli selvittää, miksi tarkasteluun valittu Männikkövaaran rakenne on käyttäytynyt niin hyvin kuin se on käyttäytynyt melko suuresta tasaisesta routanoususta huolimatta. Männikkövaaran moreenia voidaan pitää eräällä tavalla ”jalostettuna” materiaalina, koska se on seosmoreenia. Ko. moreenin koostumusta on tarkasteltu myöhemmin. INFRARYL 2006:ssa on /Rakennustieto 2006/ annettu seuraavat vaatimukset ja ohjeet koskien penger- ja luiskatäyttöjen rakentamista huonommin vettäläpäisevistä materiaaleista:

InfraRYL 2006, kohta 18110.3.2.2 Kerrospengerryksen tekeminen tie- ja katurakenteissa, s. 350: Jos penkereen täyteenä käytetään märkää silttiä, penkereeseen tehdään vähintään 0,30 m paksu kuivatuskerros jokaista n. 0,70 - 1,40 m paksuista silttikerrosta kohti. Huonoissa olosuhteissa rakennetaan enintään 0,70 m paksu silttikerros kuivatuskerrosten väliin.

InfraRYL 2006, kohta 18110.3.3.2, Kerrospengerryksen tekeminen ratarakenteissa, s. 350: Ratarakenteissa rakeisuusalueen PL 1a materiaalin, jossa hienoaainespitoisuus 7 - 35 %, käyttö ratapenkereessä edellyttää, että penkereeseen tehdään korkeussuunnassa noin 1 - 2 m välein vähintään 300 mm paksuinen vaakasuora vettä johtava kerros karkeammasta materiaalista, esimerkiksi sorasta.

InfraRYL 2006, kohta 18110.3.1, Maapenkereen tekeminen, yleistä, s. 347, vasemman palstan ohje: Jos luiskissa käytetään heikommin vettä läpäisevää materiaalia kuin varsinaisessa penkereessä, tehdään luiskiin noin 50 m välein vettä läpäiseviä veden purkautumiskohtia hiekasta tai sorasta. Ne tehdään luiskan alareunaan vähintään 1 m pituisina ja 0.3 m korkuisina.

Jos tierakenteissa päällysrakenteen luiskatäyttönä käytetään vesitiivistä kelpoisuusluokkien H4 ja S4 maata tai savea, silttiä ja silttimoorenia sisältävää materiaalia, on luiskatäyttö katkaistava järjestämällä vedelle poistumisaukkoja luiskatäytön läpi ojaan. Luiskatäyttö korvataan 2 m:n matkalla soralla tai sepelillä. Hiekka-, sora ja louhepenkereiden kohdalla aukko ulotetaan penkereen alapintaan asti. Luiskan aukkojen välimatka on notkokohdissa ja pohjavettä tiheissä pituuskaltevilla leikkauksissa 0 - 20 m, vedenjakajakohdissa ja korkeilla penkereillä 0 - 100 m ja muualla 20 - 50 m. Aukkoja ei tarvita ulkokaarteen puolella, jos alusrakenne on kallistettu sisäkaarteeseen päin, eikä salaojin kuivatetussa rakenteessa. Vaihtoehtoisesti rakenne kuivatetaan salaojilla, josta on purkuaukkoja riittävän tiheästi. Salaoja on ainoa vaihtoehto, kun rakennekerrokset ulottuvat avo-ojan pohjan alapuolelle.

Laskelmissa tarkasteltiin Männikkövaaran moreenirakennetta. Kohteen yksityiskohtainen kuvaus on esitetty kappaleessa 5.2. Männikkövaaran koerakennuskohteen tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakestävyys tehostamalla kuivatusta salaojittavalla ja kapillaarisen nousun katkaisevalla sorakerroksella moreenirakenteen alla. Vanhan tien rakennekerrokset ja penger käytettiin hyväksi moreenin jalostamisessa. Jatkossa tästä rakenteesta käytetystä moreenista käytetäänkin nimitystä seosmoreeni. Kohteessa vanha tien päällysrakenne ja pohjamaa sekoitettiin keskenään noin 2 m:n syvyydelle tien tasausviivasta. Pengerrakenne kuivatettiin salaojituksella ja kapillaarisen nousun katkaisevalla sorakerroksella. Seosmoreeni oli rakeisuudeltaan hiekkamoreenia.

Seurantatalvien mitatut routanousut ovat seosmoreenirakenteessa olleet selvästi suurempia kuin perinteisessä massanvaihtorakenteessa. Keskimääräiset maksimiroutanousut eri talvina ovat olleet noin 100 mm. Routanousuista 50 - 90 % on talvesta riippuen muodostunut itse seosmoreenin routimisesta. Päälystevaurioita seosmoreenirakenteessa on kuitenkin ollut vähän. Vähäisiin päälystevaurioihin on vaikuttanut tien tasainen routiminen poikkileikkauksessa. Vaikka routanousut ovat olleet suuria, routanousuerot tien keskilinjan ja reunojen välillä ovat olleet hyvin pieniä. Tien tasaisuus oli viimeksi vuonna 2001 tehdyissä mittauksissa keväällä keskimäärin tyydyttävä ja kesällä keskimäärin hyvä.

Laskennallisen tarkastelun alkuarvojen määrittämissä ja tulosten suuruusluokan tarkastuksessa käytettiin hyväksi kohteen rakentamisaikaisesta opinnäytetyöstä /Mikkola 1996/ ja kohteessa TPPT:n yhteydessä tehtyjä seurantamittauksia /Ahonen et al. 2003/.

Kuivatusratkaisujen analysointi

Kosteustilan vaikutukset kantavuuteen ja hetkellisiin muodonmuutoksiin

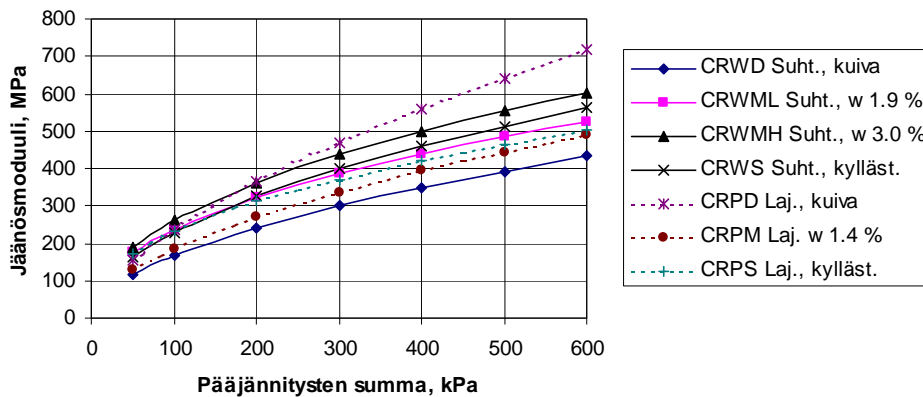
Kosteustilan vaikutus karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin on selvä. Vaikutuksen suuruus ja suunta riippuvat kuitenkin sekä materiaalityypistä että kosteuden määrästä. Osittain kyllästyneillä suhteistuneilla materiaaleilla kosteus kasvattaa jäykkyysmoduulia. Tämä aiheutuu osittain veden kyllästämissä huokosissa vaikuttavasta pintajännityksestä (näennäisestä koheesiosta), joka painaa maaraakeita toisiaan vasten. Tämän vaikutuksen suuruus riippuu maamateriaalin keskimääräisestä rae-/huokoskoosta ja veden määrästä sekä kiviaineksen pintaominaisuuksien ja veden välisestä vuorovaikutuksesta. Runsaasti hienoainesta sisältävillä ja tiiviisti pakkautuvilla materiaaleilla vaikutus on suurempi. Näennäisestä koheesiosta aiheutuvaksi on tulkittu myös alhaisilla vesipitoisuuksilla karkearakeisella kalliomurskeella (0 - 40 mm) havaitut melko suuret moduulien erot; vesipitoisuuden kasvu eräällä kalliomurskeella 0,7 %:sta 1,8 %:iin aiheutti moduulin alentumisen noin puoleen jakavassa ja kantavassa kerroksessa tyypillisesti esiintyvällä pääjännitysten summan alueella /Kolisoja 1993 a/.

Vesipitoisuuden vaikutus materiaalin palautuvaan jäykkyysmoduulin on edullinen vain suhteellisen alhaisilla vesipitoisuuden/kyllästysasteen arvoilla. Kyllästysasteen kasvaessa yhä suurempi osa huokosista täyttyy vedellä. Näennäisen koheesio-vaikutus lakkaa kokonaan, kun materiaali on veden kyllästänyt. Suuremmilla vesipitoisuuksilla (kyllästysaste 20 - 100 %) on havaittu, että useiden eri materiaalien jäykkyysmoduulit alenevat kyllästysasteen kasvaessa. Materiaalin ollessa lopulta kokonaan kyllästynyt heikkenee sen kyky vastustaa sekä palau-

tuvia että pysyviä muodonmuutoksia oleellisesti. Pysyvien muodonmuutosten osalta kriittisenä kyllästysasteen rajana pidetään sorilla ja murskeilla 80 - 85 % rajaa, jonka jälkeen riski pysyville muodonmuutoksille kasvaa voimakkaasti. Materiaalin kosteuspitoisuuden vaihtelun vaikutuksen on todettu olevan suurin pyörityneillä murskaantumattomilla rakeilla, mutta vähäisempi murskatulla kiviaineksella /Kolisoja 1993 a/. Käytetyllä tiivistystyöllä tai materiaalin raekokojakautumalla ei sen sijaan todettu olevan selvää vaikutusta muodonmuutosominaisuuksien kosteusherkkyyteen.

Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet esiselvitysvaiheen kuormituskokeissa /Kolisoja 1993 b/ palautuvan muodonmuutoksen moduuli suhteistuneella kalliomurskeella kasvoi selvästi näytteen kosteuspitoisuuden kasvassa täysin kuivasta tilasta noin 30 % kyllästysasteeseen ($w \sim 3\%$). Täysin veden kyllästämillä näytteillä moduuliarvot kuitenkin pienenivät jälleen ja vastasivat suunnilleen vajaan 20 %:n kyllästysasteessa ($w \sim 1,9\%$) tutkituille näytteille määritettyjä arvoja. Kosteustilan vaikutus koemateriaalin käyttäytymiseen on esitetty kuvassa L3.1. Näytetunnukset esim. CRWD, on avattu kuvaan: CR crushed rock, W/P well/poorly graded, D/S dry/saturated ja alhainen tai korkea vesipitoisuus ML/MH ilmoitettu prosentteina. Lajittuneella kalliomurskeella saadut tulokset poikkesivat merkittävästi suhteistuneella kalliomurskeella saaduista tuloksista. Suurimmat jäykkyysmoduulin arvot saatiin kuivilla näytteillä ja alhaisimmat kosteana kuormitetuilla näytteillä. Täysin kyllästyneenä saadut moduulin arvot olivat vain hieman suurempia kuin kosteana tutkituilla näytteillä.

Suhteistunut ja lajittunut kalliomurske



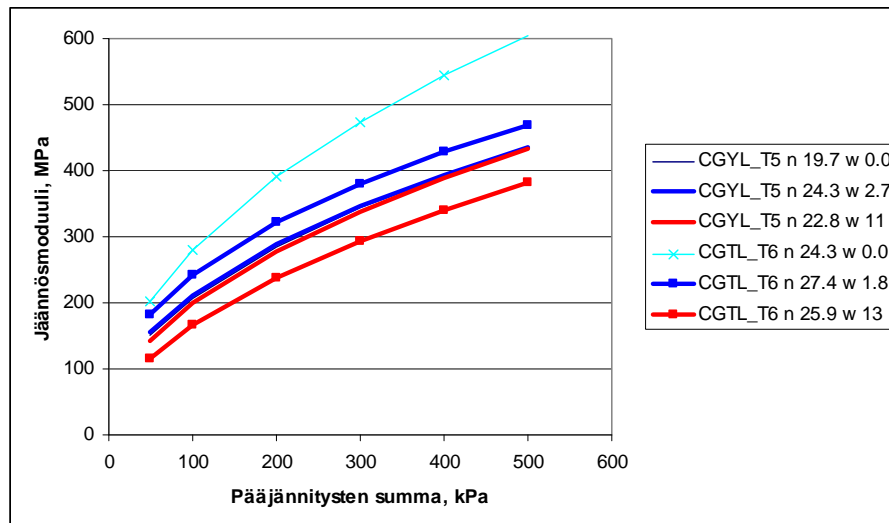
Kuva L3.1. Vesipitoisuuden vaikutus suhteistuneen ja lajittuneen kalliomurskeen jäykkyysmoduuliin. Esiselvitysvaiheen kuormituskokeiden tulokset $K-\theta$ -mallilla pääjännitysvälille 50 - 600 kPa piirrettynä ko. viitteessä esitetyjä mallin parametreja, näytetunnuksia ja -tietoja käyttäen /Kolisoja 1993 b/.

Männikkövaaran rakenteen laskelmissa kantavassa kerroksessa on käytetty suhteistunutta soramursketta. Suhteistuneella soramurskeella vesipitoisuuden vaihtelulla puolestaan on havaittu melko vähäinen vaikutus moduuliin yli päätään, mutta lajittuneella soramurskeella vesipitoisuuden kasvu sen sijaan näyttää alentavan moduulia lähes kautta linjan pääjännityksen summasta riippumatta kuten kuvasta L3.2 voidaan havaita. Kuvan L3.2 näytetunnuksissa CG on crushed gravel, YL/TL näytteen ottopaikan tunnus ja T5/T6 rakeisuutta kuvaava tunnus. Laskelmissa käytetty materiaali on rakeisuudeltaan lähempänä rakeisuutta T5 kuin T6. Rakeisuuskäyrä T6 on roikkuvampi raekoon d_{50} ollessa 20 mm:n luokkaa ja T5 suurempi, raekoon d_{50} ollessa 10 mm:n luokkaa.

Kalliomurskeella kosteustilan vaikutus riippui siis selvästi näytteen raekokojakautumasta. Suhteistuneella materiaalilla moduuli kasvoi aluksi vesipitoisuuden kasvaessa, lajittuneella materiaalilla vaikutus oli päinvastainen, mutta erot eri kosteuspitoisuuksien välillä eivät olleet kuitenkaan kovin merkittäviä. Soramurskeilla puolestaan suhteistuneilla materiaaleilla erot olivat pienet ja lajittuneella materiaalilla suuremmat /Kolisoja 1993 b/.

Havaintojen perusteella vesipitoisuuden vaihtelu ääriarvojensa välillä (kuiva, kyllästynyt) saattaa vaikuttaa materiaalin moduuliin jopa lähes puolella /Kolisoja 1993 b, Laukkanen & Leivo 1995/. Vaikutuksen suuruus ja suuntakin vaihtelevat kuitenkin materiaalista ja rakeisuusjakautumasta riippuen. Pienimmillään vesipitoisuuden vaihtelut näyttäisivät olevan suhteistuneella soramurskeella. Lajittuneella soramurskeella vaihtelut olivat puolestaan suuria. Vesipitoisuuden kasvataminen alensi moduulin tasoa n. 40 %. Lajittuneella kalliomurskeella vesipitoisuuden kasvu kuivasta kosteaan ja kyllästyneeseen tilaan alensi moduulia noin neljänneksen ja suhteistuneella kalliomurskeella vesipitoisuuden nousu puolestaan nosti moduulin arvoa noin kolmanneksen ($w \sim 2\%$ tai kyllästynyt) tai hieman enemmänkin ($w \sim 3\%$).

Rakeisuusjakautuman vaikutukset jäykkäysmoduuliin näyttäisivät kuitenkin pienentyvän merkittävästi, kun vesipitoisuus lähenee käytännön rakenteissa vaikuttavia vesipitoisuuksia. Täysin kuivien materiaalien ja toisaalta täysin kyllästyneiden materiaalien esiintyminen tierakenteissa on harvinaista. Tilannetta, jossa ylempät rakennekerrokset ovat kyllästyneet, ei saisi päästä syntymään lainkaan.



Kuva L3.2. Vesipitoisuuden vaikutus suhteistuneen ja lajittuneen soramurskeen jäykkäysmoduuliin. Esiselvitysvaiheen kuormituskokeiden tulokset $K-\theta$ -mallilla pääjännitysvälille 50 - 600 kPa piirrettynä viitteessä /Kolisoja 1997/ esitettyjä mallin parametreja, näytetunnuksia ja -tietoja käyttäen.

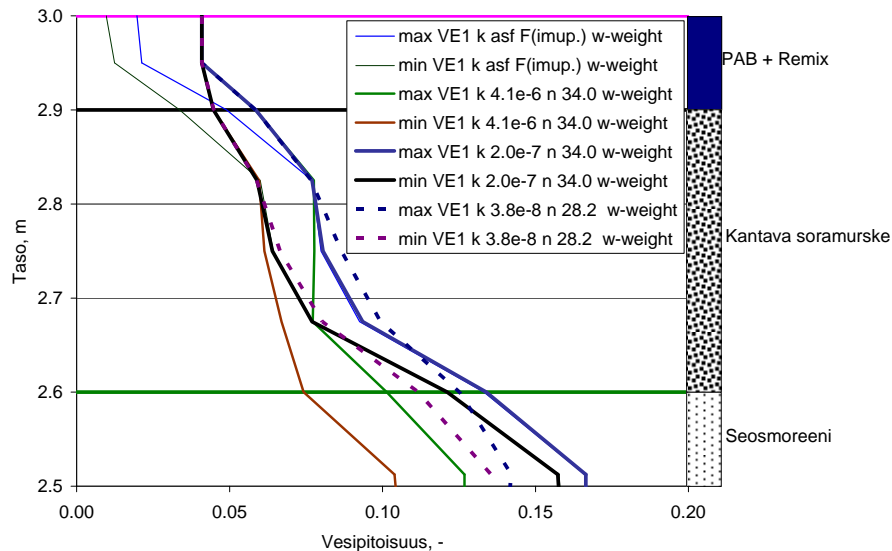
Kosteustilan vaikutukset pysyviin muodonmuutoksiin

Kosteustila (vesipitoisuus) vaikuttaa merkittävästi myös sitomattoman materiaalin pysyviin muodonmuutoksiin (deformaatioon) eli urautumiseen. Useat tutkimukset /mm. Saba et al. 2006/ ovat osoittaneet, että tämän vaikutuksen suuruutta ei suoraan voida arvioida hetkellisestä muodonmuutoksista eli moduulin suuruudesta. Tämä johtuu siitä, että pysyvä muodonmuutoksen suuruutta ohjaa rakenteen leikkausjännitystila, kun taas hetkellinen muodonmuutos aiheutuu pääasiassa suu-

rimmasta pääjännityksestä /Korkiala-Tanttu 2008/. VTT:llä suoritettujen koetietokokeiden /Korkiala-Tanttu et al. 2003/ ovat osoittaneet, että vain 0,2 - 0,5 % vesipitoisuuden kasvu voi nopeuttaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä rakennekerroksissa yli kaksinkertaisesti materiaalista riippuen. Myös Ruotsissa on havaittu urautumisnopeuden kasvavan 2,5 - 5 kertaiseksi, kun olosuhteet muuttuivat kuivasta märäksi (vedenpintaa nostettiin 500 - 600 mm) /Wiman 2001/.

Asfaltin tilavuusvesipitoisuuden vaikutus

Kuvassa L3.3 on esitetty vertailun vuoksi tehty tarkastelu, jossa asfaltin tilavuusvesipitoisuus on annettu imupaineen funktiona. Kuvasta voidaan havaita, ettei kantavan kerroksen vesipitoisuus oleellisesti riipu asfaltin tästä ominaisuudesta. Kantavan kerroksen ylintä osaa lukuun ottamatta lasketut vesipitoisuudet ovat samat kuin nykyisellä rakenteella muutenkin. Jatkossa tarkasteluissa on asfaltilla käytetty vakio tilavuusvesipitoisuutta.



Kuva L3.3. Kantavan kerroksen vesipitoisuudet, kun asfaltin tilavuusvesipitoisuus on annettu imupaineen funktiona verrattuna eri vedenkulkeutumisominaisuudet omaaviin seosmoreenirakenteisiin, joissa asfaltin ominaisuudet eivät riipu imupaineesta.

Laskennan lähtötiedot

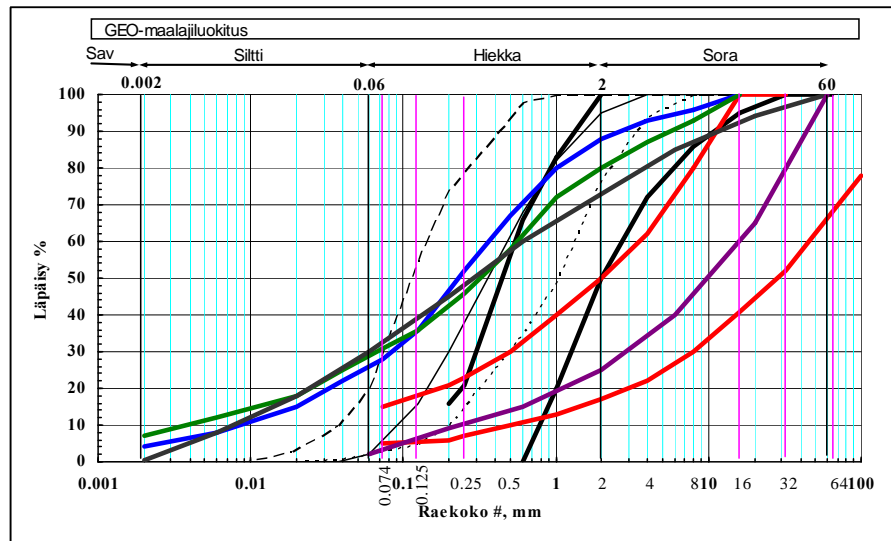
Männikkövaarassa tien leveys on 7,0 m ja päällysteen leveys 6,5 m. Päällysteen kaksipuolinen kallistus on 0,04. Luiskan kaltevuus on 1:3. Rakenteessa olevan moreenikerroksen luiskan kaltevuus on 1:1. Rakennekerrokset, niiden paksuudet ja materiaalit on esitetty kuvassa 5.4.

Kosteuskäyttämistarkastelussa käytettiin SEEP/W-ohjelmaa, jonne rakenteen geometria määritettiin mahdollisimman tarkasti vastaamaan koerakenteen mittoja. Poikkeuksena olivat päällysrakennekerros ja sidottu kantava kerros, jotka kuvattiin yhtenä 100 mm paksuna kerroksena. Suodatinkerros mallinnettiin samaan kaltevuuteen kuin päällystekin /kts. Mikkola 1996/.

Koerakenteessa on käytetty seosmoreenia, jossa suurin massaosuus (40,7 %) on perusmaan moreenia. Muuten seoksessa on mukana päällystettä, tasauskerroksen, kantavan ja jakavan kerroksen materiaalia, mutta myös turvetta ja silttiä. Seosmo-

reenin maksimitilavuuspainoksi oli määritetty $19,0 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuudeksi $8,8 \%$ /Ahonen et al. 2003/.

Perusmaan ja seosmoreenin rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 5.4. Samaan kuvaan on piirretty myös Tielaituksen suunnitteluohjeiden /TVL 1985/ mukaiset rajakäyrät moreenimurskeesta tehtävälle jakavalle kerrokselle (punaiset viivat) sekä moreenimurskerakenteen eristyskerroksen rakeisuusvaatimuksen rajakäyrät (mustat viivat). Kuvassa on myös esitetty erilaisten hiekkojen, hienon, keskikarkean ja karkean hiekan rakeisuuskäyriä. Näistä karkeaa hiekkaa on käytetty tarkastelun lähtöarvon määrittämisessä. Myös kantavassa/jakavassa kerroksessa käytetylle soramurskeelle valitun materiaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa L3.4.



Kuva L3.4. Materiaalien rakeisuuksien ohjealueita ja rakeisuuskäyriä. Violetti viiva kantavan/jakavan kerroksen soramurske, vihreä viiva Männikkövaaran seosmoreeni, sininen viiva Männikkövaaran perusmaan hiekkamoreeni, harmaa viiva toinen hiekkamoreeni (Maalajien kaivuluokitus, 1975). Ohuet viivat erilaisia hiekkoja. Karkeaa hiekkaa on käytetty rakenteen suodatinkerroksen mallinnuksessa.

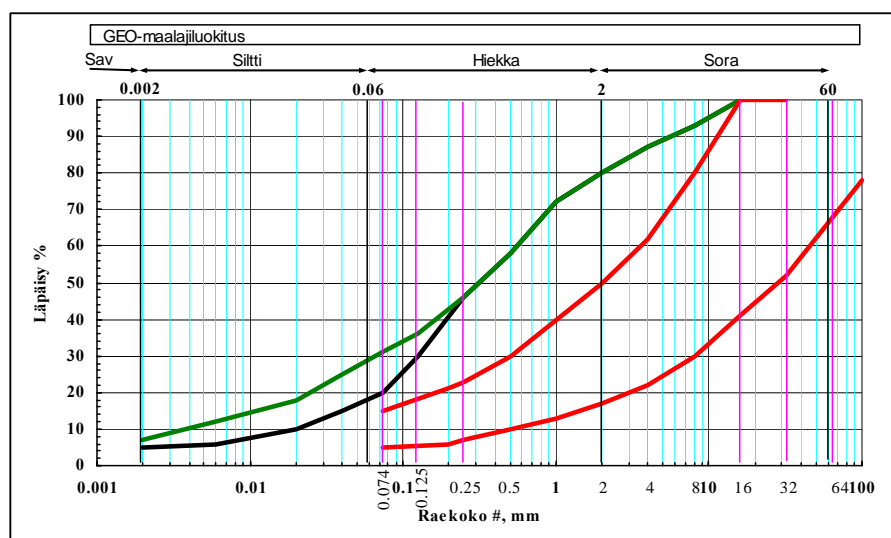
Tarkastelua varten on tunnettava materiaalien vedenjohtavuudet tilavuusvesipitoisuuden funktiona. Näitä määrittämiä ei ollut käytettävissä. Sen sijaan kapillaariset nousukorkeudet oli määritetty perusmaan moreenille $h_c = 1,7 \text{ m}$ ja seosmoreenille $h_c = 2,3 \text{ m}$. Kuivatuskerroksen materiaalin kapillaarinen nousukorkeus oli rajoitettu enintään 200 mm :ksi. Näiden tietojen perusteella määritettiin laskelmissa tarvittavat ominaisuudet. Määrittäminen on esitetty liitteessä 2. Laskelmissa käytetyt arvot on esitetty taulukossa L3.1 ja L3.2. Taulukossa L3.2 on esitetty rakeisuuksiin ja tilavuuspainoihin perustuvat materiaalien vedenmuominaisuudet. Materiaalien rakeisuustietoja ja vedenläpäisevyysarvoja on verrattu taulukossa L3.1. Tarkastelua varten johdettiin muiden tietojen perusteella ns. kuvitteellinen seosmoreeni, jonka rakeisuus yhdessä varsinaisen kohteessa käytetyn seosmoreenin rakeisuuden kanssa on esitetty kuvassa L3.5. Materiaalien vedenmuominaisuudet on esitetty kuvissa L3.6 ja L3.7.

Taulukko L3.1. Tarkasteluissa käytettyjen materiaalien vedenimuominaisuudet.

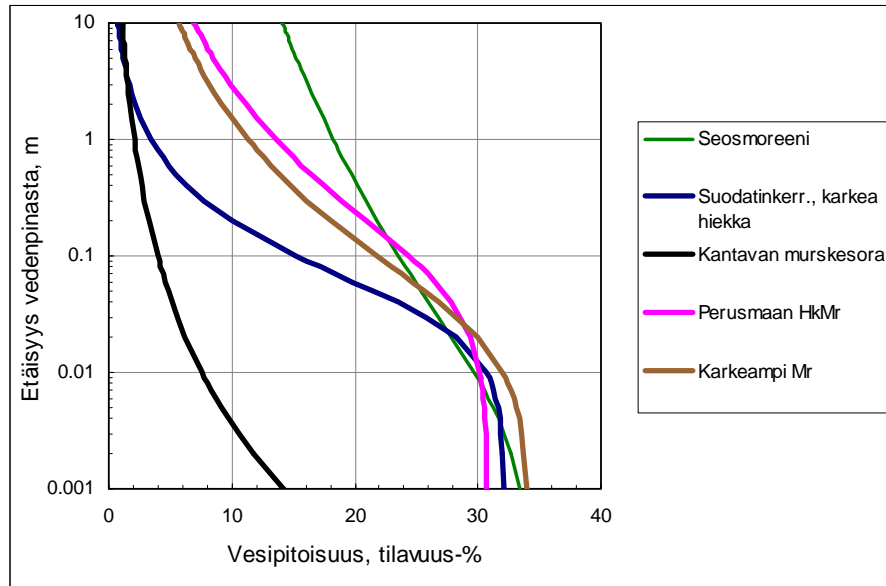
Materiaali	Kantavan kerroksen murskesora		Alun perin valittu seosmoreeni.		Tarkasteluissa käytetty seosmoreeni		Karkeutettu seosmoreeni		Kuivatuskerroksen karkea hiekka		Perusmaan hiekkamoreeni	
	Paine, kPa	Til. w, -	Vedenläp., k, m/s	Til. w, -	Vedenläp., k, m/s	Til. w, -	Vedenläp., k, m/s	Til. w, -	Vedenläp., k, m/s	Til. w, -	Vedenläp., k, m/s	Til. w, -
-100	0.011	9.6E-19	0.119	8.5E-18	0.141	3.3E-17	0.057	1.6E-14	0.007	8.0E-14	0.069	2.1E-14
-90	0.011	1.3E-18	0.120	1.1E-17	0.143	4.2E-17	0.059	2.1E-14	0.008	1.2E-13	0.072	2.8E-14
-80	0.012	1.8E-18	0.122	1.4E-17	0.145	5.5E-17	0.061	2.9E-14	0.009	1.8E-13	0.074	3.8E-14
-70	0.012	2.5E-18	0.124	1.9E-17	0.147	7.4E-17	0.064	4.2E-14	0.009	3.0E-13	0.077	5.5E-14
-60	0.013	3.8E-18	0.126	2.7E-17	0.149	1.1E-16	0.067	6.4E-14	0.010	5.3E-13	0.081	8.4E-14
-50	0.013	6.3E-18	0.129	4.1E-17	0.152	1.6E-16	0.070	1.1E-13	0.012	1.0E-12	0.085	1.4E-13
-40	0.014	1.1E-17	0.132	6.9E-17	0.156	2.7E-16	0.075	1.9E-13	0.014	2.3E-12	0.091	2.5E-13
-30	0.015	2.5E-17	0.136	1.3E-16	0.161	5.1E-16	0.082	4.3E-13	0.017	6.7E-12	0.099	5.6E-13
-20	0.017	7.4E-17	0.143	3.3E-16	0.169	1.3E-15	0.092	1.3E-12	0.022	3.0E-11	0.111	1.7E-12
-10	0.021	4.8E-16	0.154	1.6E-15	0.182	6.3E-15	0.113	8.6E-12	0.035	3.8E-10	0.136	1.1E-11
0	0.245	2.1E-04	0.283	3.8E-08	0.340	2.0E-07	0.340	4.1E-06	0.321	4.7E-04	0.308	4.1E-07

Taulukko L3.2. Materiaalien vedenläpäisevyys ja rakeisuuden tunnuslukuja.

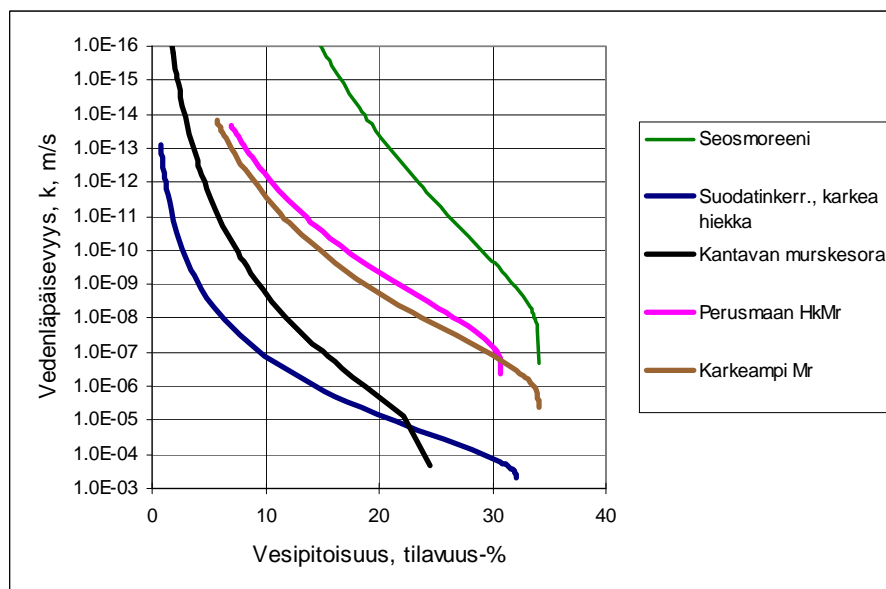
Ominaisuus	Murskesora	Alun perin valittu seosmoreeni.	Tarkasteluissa käytetty seosmoreeni	Karkeutettu seosmoreeni	Karkea hiekka	Perusmaan hiekkamoreeni
k, m/s	2.1E-04	3.8E-08	2.0E-07	4.13E-06	4.70E-04	4.1E-07
d ₂₅ , mm	2.00	0.05	0.05	0.10	0.44	0.06
d ₇₅ , mm	31.4	1.38	1.38	1.38	1.93	0.81
d ₅₀ , mm	11.6	0.33	0.33	0.33	1.03	0.23
d ₆₀ , mm	17.2	0.577	0.577	0.577	1.39	0.383
d ₁₀ , mm	0.266	0.0044	0.0044	0.020	0.200	0.0100



Kuva L3.5. Kohteessa käytetyn seosmoreenin (vihreä viiva) ja kuvitteellisen karkeutetun seosmoreenin (musta viiva) rakeisuudet. Punaiset rajaviivat moreenimurskeesta tehdyn jakavan kerroksen rakeisuusvaatimus (TVL 1985).

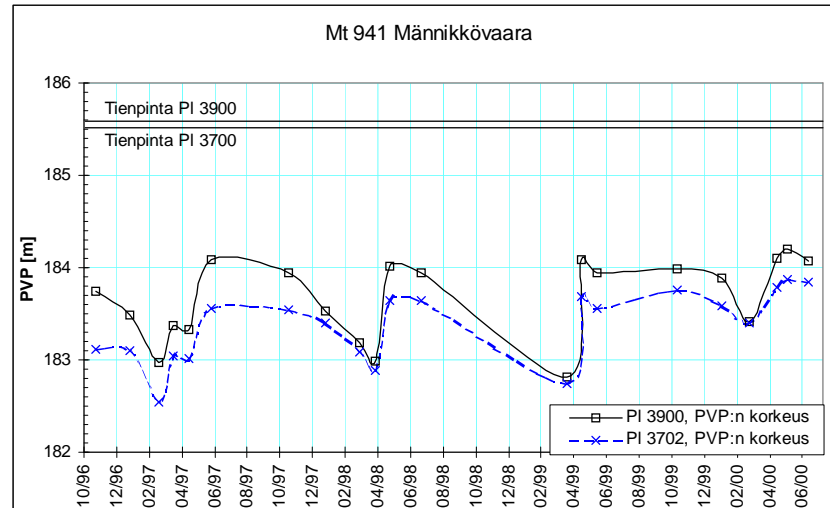


Kuva L3.6. Materiaalien imupaine tilavuusvesipitoisuuden suhteen.



Kuva L3.7. Materiaalien vedenläpäisevyys tilavuusvesipitoisuuden suhteen.

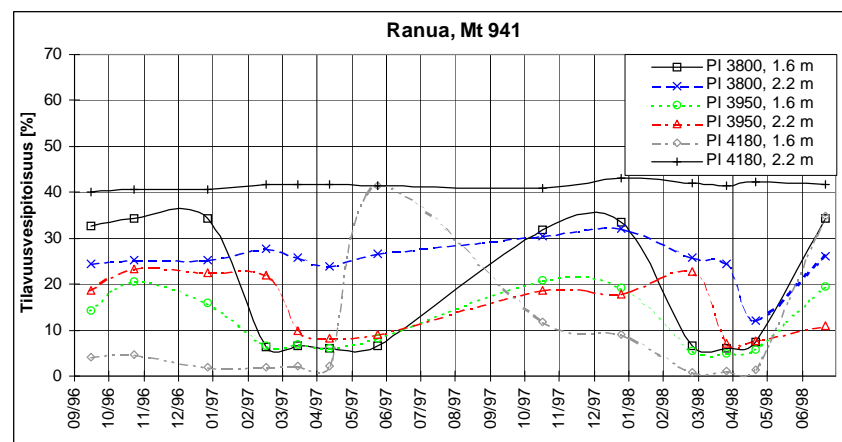
Pohjavedenpintaa on kohteessa mitattu kahdesta tien sivuissa olevasta pohjavesiputkesta paaluilla pl. 3702 ja pl. 3900 eli seosmoreenirakenteen molemmissa päissä. Pohjavedenpinta vaihteli syksyn 1996 ja kevään 1997 välisenä aikana 1,23 - 2,7 metriä tien tasausviivasta. Pohjavesi oli alhaisimmillaan helmikuun puolivälissä ja korkeimmillaan toukokuun lopulla. Syksyn 1997 ja alkukesän 1998 välisenä aikana pohjavesi vaihteli välillä 1,3 - 2,37 metriä tien tasausviivasta ollen alhaisimmillaan maaliskuun lopussa ja korkeimmillaan huhtikuun lopulla. Keväällä 1999 pohjavedenpinta vaihteli välillä 1,42 - 2,76 metriä tien tasausviivasta. Pohjavesi oli tällöin alhaisimmillaan maaliskuun lopussa ja korkeimmillaan huhtikuun lopulla. Keväällä 2000 pohjavesi oli korkeimmillaan vaihdellen välillä 1,10 - 1,88 metriä tien tasausviivasta ollen alhaisimmillaan helmikuun lopussa ja korkeimmillaan toukokuun alussa. Seurannan aikaiset pohjavesihavainnot on esitetty kuvassa L3.8 /Ahonen et al. 2003/.



Kuva L3.8. Pohjavedenpinnan taso syksystä 1996 kesäkuun puoliväliin 2000 /Ahonen et al. 2003/.

Laskennalliseen tarkasteluun pohjavedenpinta mallinnettiin siten, että pohjavedenpinnan ollessa suodatinkerroksen alapinnan alapuolella, pohjavedenpinnan oletettiin käyttäytyvän havaitun mukaisesti. Pohjavedenpinnan tason noustessa kuivatustasona toimivan salaojitetun suodatinkerroksen alapinnan yläpuolelle, pohjavedenpinnan tasona käytettiin suodatinkerroksen alapinnan tasoa.

Tierakenteen ja pohjamaan kosteusvaihtelua mitattiin kolmessa poikkileikkauksessa syvyyksillä 1,6 m (seosmoreeni) ja 2,2 m (pohjamaa) tien tasausviivasta. Syksyllä 1996 seosmoreenin tilavuusvesipitoisuudeksi mitattiin yli 30 % ja pohjamaan noin 25 %, eli moreenin vesipitoisuus oli korkeampi kuin pohjamaassa. Syksyllä 1997 seosmoreenirakenteen vesipitoisuus nousi lähelle samaa tasoa kuin rakentamisen jälkeisenä syksynä. Tällöin pohjamaan vesipitoisuus oli noin 5 til-%-yksikköä korkeammalla kuin syksyllä 1996, ollen kuitenkin pienempi kuin seosmoreenissa. Tilavuusvesipitoisuuksien jyrkkä pieneminen talvella johtuu materiaalin jäätymisestä. Sulan tilan tilavuusvesipitoisuudet seosmoreenissa ovat vaihdelleet vuosina 1996 - 2001 välillä 32,2 - 34,4 til-% (ka. 33 til-%) ja vastaavassa kohdassa pohjamaassa 23,8 - 32,2 til-% (ka. 28 til-%) /Ahonen et al. 2003/. Tilavuusvesipitoisuuden muutokset syksystä 1996 kesään 1998 on esitetty kuvassa L3.9.



Kuva L3.9. Tilavuusvesipitoisuuden muutokset mittauspisteissä pl. 3800, pl. 3950 ja pl. 4180 syksystä 1996 kesään 1998 /Ahonen et al. 2003/.

Tarkasteluissa käytetty sadanta määritettiin Oulun ja Kuusamon sulan tilan (ilman lämpötila $> 0\text{ °C}$) sadantojen 30 vuoden keskiarvoista. Oulussa sademäärä on vuosittain ollut keskimäärin 298 mm aikavälillä 12.4. - 29.10. ja Kuusamossa vastaavasti 327 mm aikavälillä 27.4. - 17.10. Kohteen keskimääräiseksi sademääräksi saadaan siis 312 mm aikavälillä 19.4. - 23.10. Tämä sademäärä annettiin kuormitukseksi kuukausittain keskimääräisenä päiväsadantana.

Mallinnetut perustapaukset

Perustapauksina mallinnettiin Männikkövaaran nykyinen rakenne (VE1), nykyinen rakenne ilman moreenikerroksen alla olevaa kuivatuskerrosta (VE2) sekä rakenne, jossa moreenikerroksen keskellä on kuivatuskerros. Nykyisen moreenirakenteen laskentamalli on esitetty kuvassa L3.10 ja vastaavan rakenteen ilman alla olevaa kuivatuskerrosta kuvassa L3.11. Kuvissa L3.12 ja L3.13 on esitetty rakenteet, joissa kuivatuskerros on myös moreenikerroksen keskellä. Näistä toisessa (VE3) kuivatuskerros päättyy suoraan luiskatäytteeseen ja toisessa (VE4) kuivatuskerros on viety luiskatäyteen läpi luiskan ulkopintaan asti.

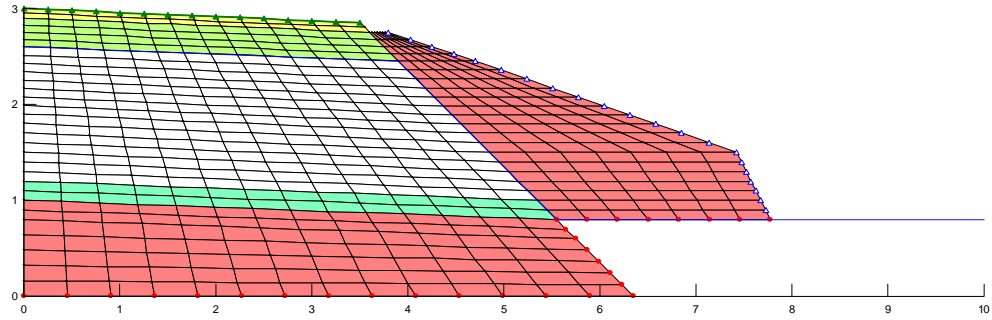
Näiden perustapausten lisäksi on tarkasteltu muutamia parannettuja ratkaisuja. Kaikki tarkastellut tapaukset ovat:

- VE1 Nykyisen rakenteen laskentamalli
- VE2 Nykyisen rakenteen laskentamalli ilman moreenikerroksen alla olevaa kuivatuskerrosta
- VE3 Nykyisen rakenteen laskentamalli, johon on lisätty kuivatuskerros moreenikerroksen keskelle
- VE4 Nykyisen rakenteen laskentamalli, johon on lisätty luiskamateriaalin läpi luiskan pintaan asti ulottuva kuivatuskerros moreenikerroksen keskelle
- VE5 Seosmoreeni poistettu rakenteesta kokonaan
- VE6 Rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerros
- VE7 Rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ohella välikuivatuskerros
- VE8 Rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen lisäksi kuivatuskerros kantavan alle
- VE9 Rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ja välikuivatuskerroksen ohella suodatinkerros kantavan/jakavan alle
- VE10 Rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ohella suodatinkerros kantavan/jakavan alle ja välikuivatuskerros sekä seosmoreenin alla olevat kuivatuskerrokset on paksunnettu 300 mm:iin.

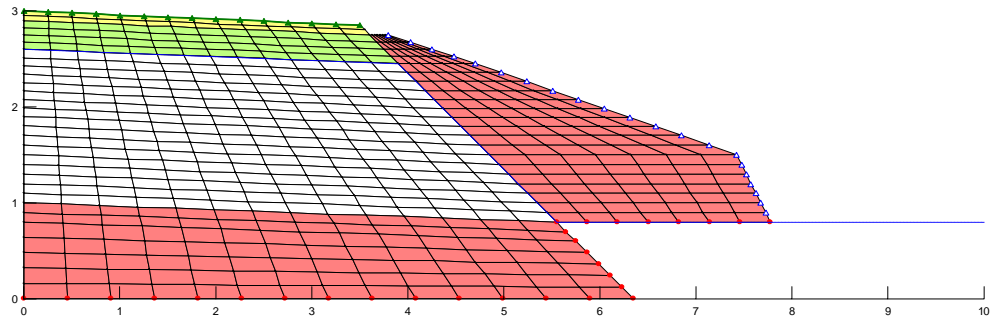
Eri perusmalleilla saatuja tuloksia on vertailtu etupäässä tilavuusvesipitoisuuksina tien keskilinjan pystyleikkauksessa. Vertailuja on tehty myös niiden pisteiden suhteen, joissa on tehty tilavuusvesipitoisuusmittauksia. Rakenteita on vertailtu myös kantavan kerroksen vesipitoisuuksien suhteen. Tulokset on esitetty ensisijaisesti tilavuusvesipitoisuuksina, koska ne ovat niinä sekä mitattu että laskettu. Tarvittaessa tilavuusvesipitoisuudet on muutettu vesipitoisuuksiksi painoprosentteina kaavalla L13.

$$w[p\%] = \frac{1000}{\rho_d} * w[til\%] \quad (13)$$

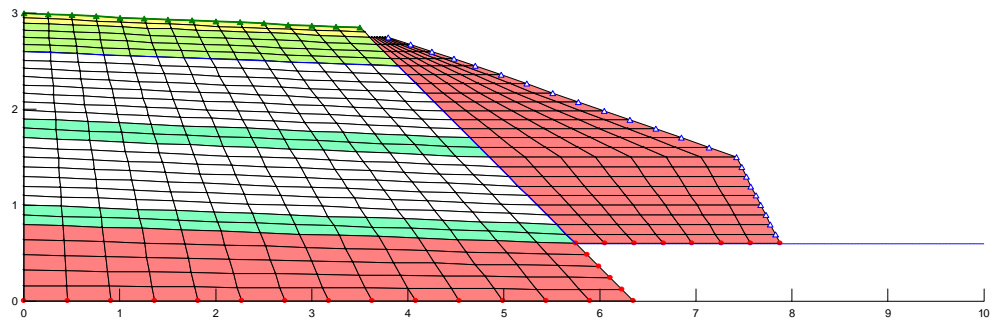
missä ρ_d on kuivatilavuuspaino, kg/m^3 .



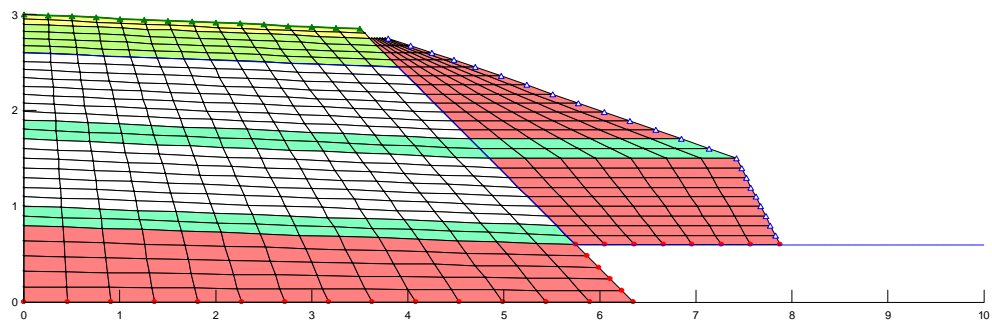
Kuva L3.11. Nykyisen rakenteen laskentamalli (VE1).



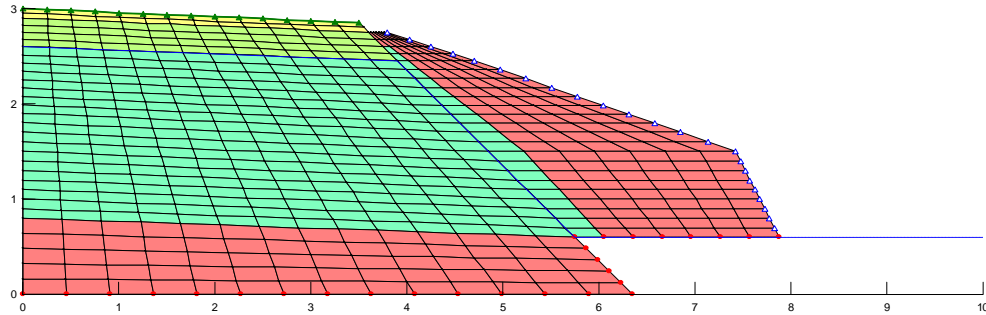
Kuva L3.12. Nykyisen rakenteen laskentamalli ilman moreenikerroksen alla olevaa kuivatuskerrosta (VE2).



Kuva L3.13. Nykyisen rakenteen laskentamalli, johon on lisätty kuivatuskerros moreenikerroksen keskelle (VE3).



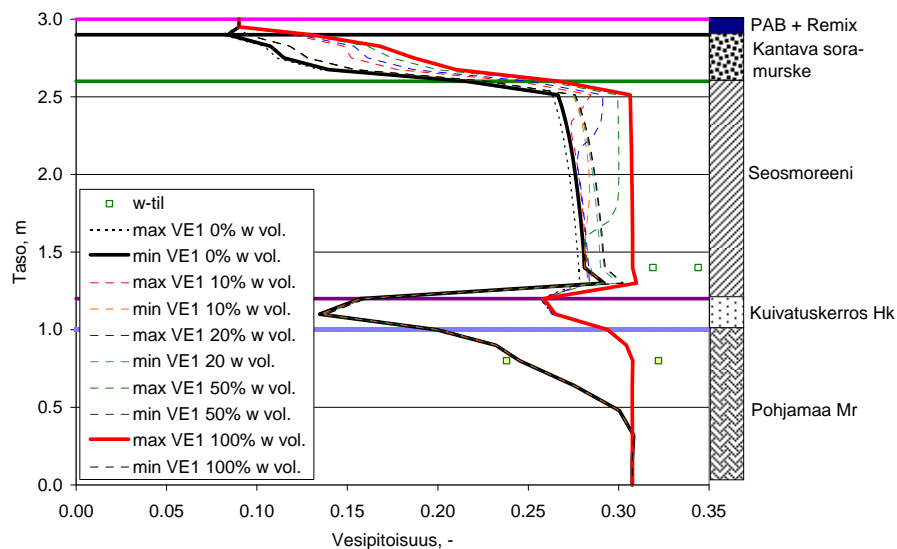
Kuva L3.14. Nykyisen rakenteen laskentamalli, johon on lisätty luiskamateriaalin läpi luiskan pintaan asti ulottuva kuivatuskerros moreenikerroksen keskelle (VE4).



Kuva L3.15. VE5: seosmoreeni poistettu rakenteesta kokonaan.

Tulosten tarkastelu

Tarkastelut tehtiin ensin erisuuruilla sateen määrillä. Sateen määrällä tarkoitetaan tässä sitä osuutta sulan tilan sadannasta (312 mm), joka kohdistuu rakenteen päällysteeseen. Loppuosa sadannasta joko valuu pois tai haihtuu rakenteen pinnasta lähes saman tien. Kuvassa L3.16 on esitetty nykyisen rakenteen lasketut tilavuusvesipitoisuudet tien keskilinjasta pystyleikkauksessa, joita on täydennetty havaittujen tilavuusvesipitoisuuksien vaihtelurajoilla. Valitulla sateen määrällä ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta keskilinjasta tilavuusvesipitoisuuseroihin eri sateen määrillä (0 %, 10 %, 20 %, 50 % ja 100 %). Tilavuusvesipitoisuus on pienin sateen määrällä 0 % (eli ei sadetta) ja suurin sateen määrällä 100 % (eli ei haihduntaa eikä valuntaa).



Kuva L3.16. Männikkövaaran koerakenteessa havaitut (1.5 m keskilinjasta) ja VE1 mukaan lasketut (tien keskilinjalla) tilavuusvesipitoisuudet eri sateilla.

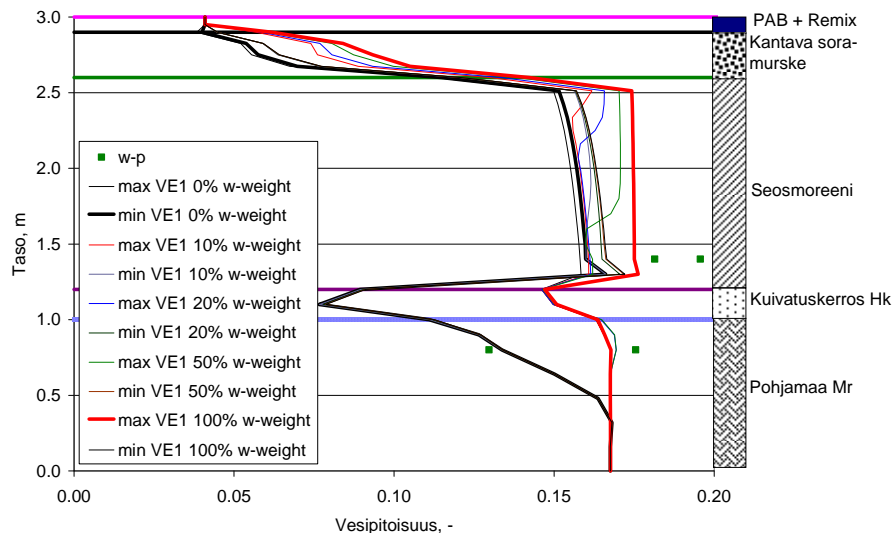
Lasketun seosmoreenin vesipitoisuuden ja pohjavedenpinnan minimi ajoittuvat samaan ajankohtaan (18.2.) sateen määrällä 0 %. Vesipitoisuus on tällöin 28 til-% (koko havaittu vaihteluväli 32 - 34,4 til-%). Myös lasketun perusmaan moreenin vesipitoisuuden minimin ajankohta sateen määrällä 0 % on sama (18.2.). Vesipitoisuus on tällöin 24 til-% (koko havaittu vaihteluväli 23.8 - 32.2 til-%).

Maksimi vesipitoisuus saavutetaan molemmilla havaintotasolla sateen määrällä 100 % 31.8. Perusmaa on tällöin kyllästynyt tilavuusvesipitoisuuden ollessa 30,8 % (huokoisuus laskennassa 30,8 %) ja seosmoreenin vesipitoisuuden ollessa

30,7 % (huokoisuus laskennassa 34 %). Jatkossa näitä ajankohtia ja ääriarvoja on käytetty kuvaamaan keskilinjän pystysuuntaisen kosteustilan vaihteluvälejä.

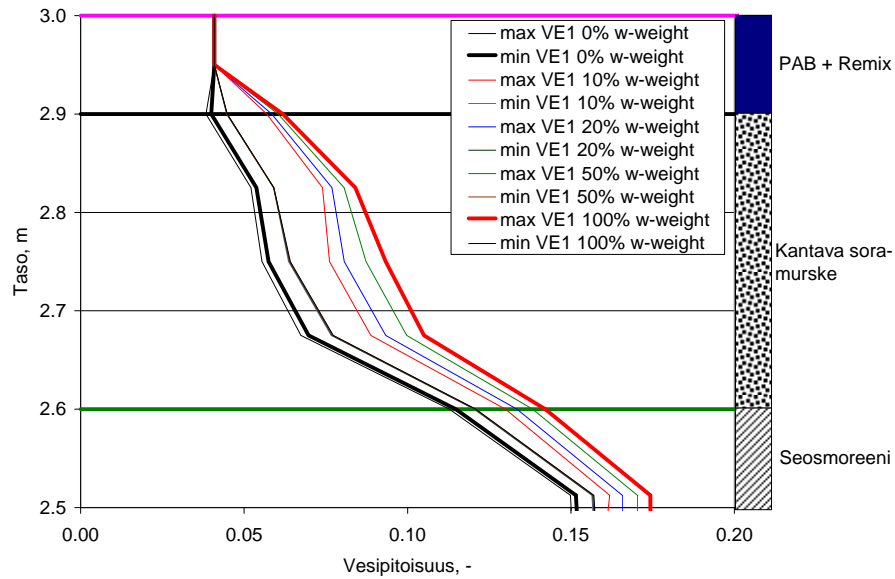
Kuvasta L3.16 voidaan havaita, että sademäärien vaihtelut toistaa melko hyvin havaittua vesipitoisuuden vaihtelua rakenteessa. Seosmoreeniassa tämä vaihtelu on likimain oikean suuruinen, mutta laskettu taso on havaittua alhaisempi. Perusmaassa vesipitoisuuden minimi on oikealla tasolla, maksimivesipitoisuuden jäädessä kuitenkin jonkin verran havaitusta. Laskettu vesipitoisuus ei kuitenkaan voi nousta tätä suuremmaksi, koska perusmaa on laskennallisesti jo kyllästynyt.

Keskilinjalla määritetty vesipitoisuusjakautuma ei täysin vastaa sivulla olevien havaintopisteiden vesipitoisuutta, koska keskilinja on rakenteen kuivin osa. Tämä johtuu oletuksesta, että vesi valuu tien reunaan kohti ja pitää reuna-alueita tien keskikohtaa kosteampana. Kuvaa L3.16 vastaavat vesipitoisuudet on esitetty kuvassa L3.17 myös painoprosenteiksi muutettuna.



Kuva L3.17. Männikkövaaran koerakenteessa havaitut (1,5 m keskilinjasta) ja VE1 mukaan lasketut (tien keskilinjalla) vesipitoisuudet (painoprosentteja) eri sateilla.

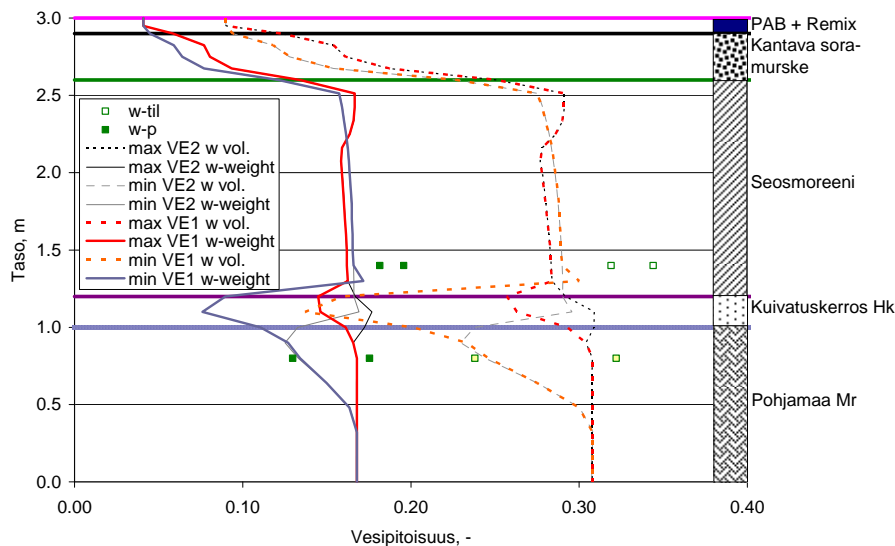
Kuvassa L3.18 on tarkasteltu rakenteen vesipitoisuusjakautuma kantavan kerroksen osalta. Kantavassa kerroksessa vesipitoisuus on vaihdellut välillä 5 - 11 p-% (mukaan ei ole otettu kerrosten rajapintojen pisteitä). Kantavan kerroksen keskellä vesipitoisuus on vaihdellut eri sateen määrillä välillä 5,5 - 9,0 p-%. Kantavasta kerroksesta ei ole olemassa tästä kohteesta vesipitoisuushavaintoja. Vastaavasta koerakenteesta Temmeksessä (pinnassa myös 100 mm päällyste AB 50 mm + ABK 50 mm) kantavan kerroksen kalliomurskeessa mitatut tilavuusvesipitoisuudet ovat olleet 0 - 14 til-%, jakavassa 0 - 9 til-%, suodatinkerroksessa 14 til-% ja suodatinkerroksen alaosassa 40 til-% /Savolainen et al. 2001/. Näitä vastaavat painoprosentit kantavassa ovat 0 - 7 p-%, jakavassa 0 - 4,5 p-%, suodatinkerroksessa 7 p-% ja suodatinkerroksen alaosassa 20 p-% olettaen, että tilavuuspainot vastaavat Männikkövaaran tilannetta.



Kuva L3.18. Männikkövaaran koerakenteen kantavan kerroksen lasketut vesipitoisuudet (VE1) (painoprosentteja) eri sateen määrillä tien keskilinjalla.

Jatkotarkasteluissa sateen määränä on käytetty pääsääntöisesti 20 % sateesta. Tämä vastaa betoni- ja asfalttipintojen valumakerrointa 0.8 /Katu 90/.

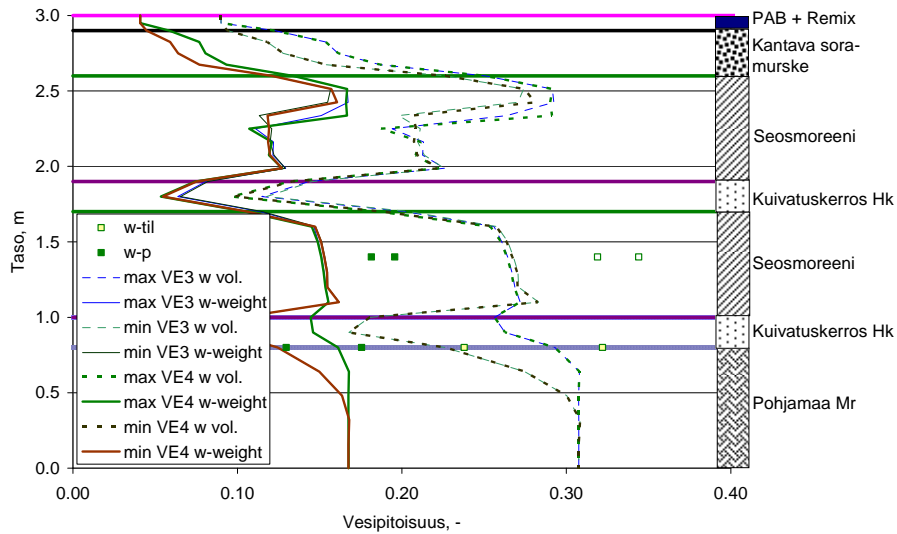
Kuvassa L3.19 on verrattu vaihtoehtojen VE1 ja VE2 laskettuja vesipitoisuuden tilavuus- ja painoprosenttiprofiileja tien keskilinjalla. Kuivatuskerros näyttää kuivattavan pohjamaata huomattavasti noin puolen metrin syvyyteen, mutta se ei juuri vaikuta yllä olevaan seosmoreenikerrokseen.



Kuva L3.19. Rakennevaihtoehtojen VE1 ja VE2 vesipitoisuusprofiilit keskilinjalla.

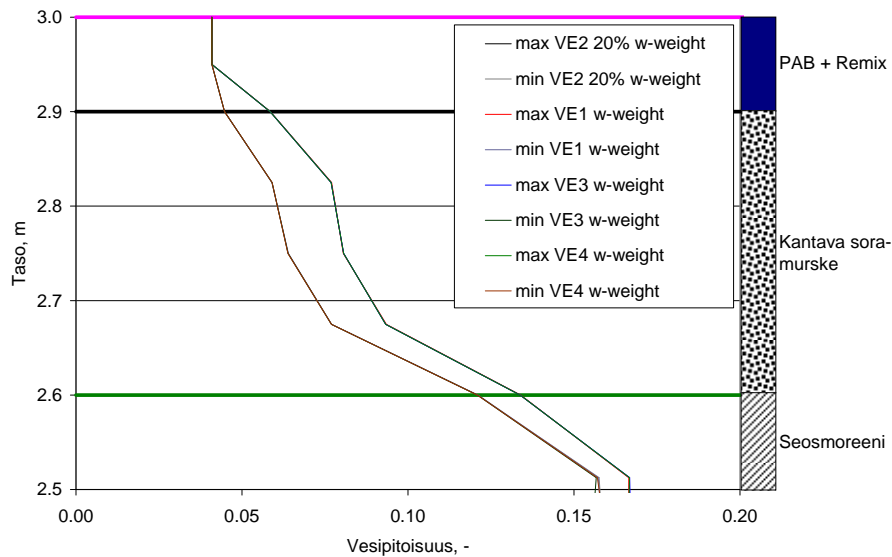
Kuvassa L3.20 on puolestaan vertailtu rakennevaihtoehtoja VE3 ja VE4, joissa kuivatuskerros on moreenikerroksen välissä. Välikerroksen lisäys pienentää alemman moreenikerroksen vesipitoisuutta 2 - 4 %-yksikköä ja ylemmän moreenikerroksen alaosan vesipitoisuutta 4 - 8 %-yksikköä. Ylemmän seosmoreenikerroksen yläosan vesipitoisuus ei kuitenkaan muutu vaikka välikerrosta ei olisikaan. Myös pohjamaan kosteuspitoisuus alenee hieman, noin 0,7 %-yksikköä. On kuitenkin huomattava, että kuivatuskerroksen alareuna on nyt 200 mm alem-

pana kuin vaihtoehdossa VE1. Hieman yllättävää on se, ettei välikuivatuskerroksen johtaminen ulos luiskasta (VE4) ei juuri paranna tilannetta rakenteeseen VE3 verrattuna.



Kuva L3.20. Rakennevaihtoehtojen VE3 ja VE4 vesipitoisuusprofiilit keskilinjalla.

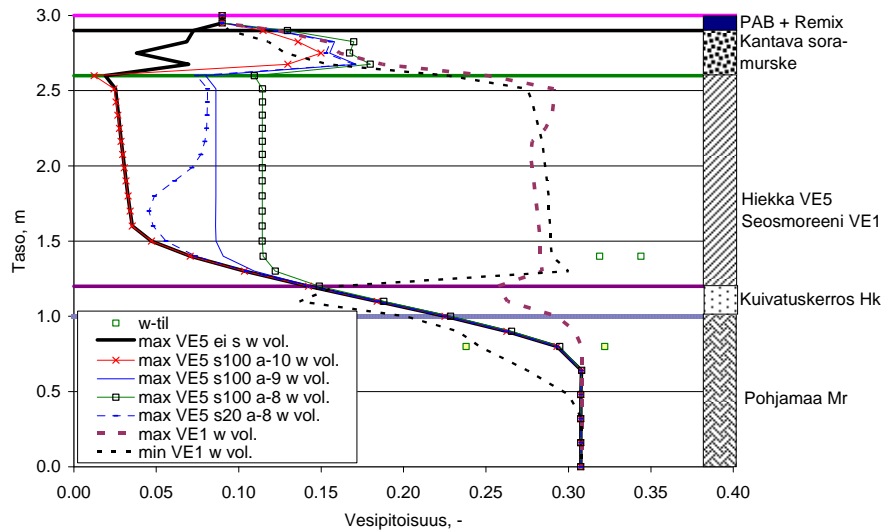
Kuvaan L3.21 on koottu kantavan kerroksen vesipitoisuudet tien keskilinjalla eri vaihtoehdoilla. Kantavan kerroksen vesipitoisuus **tien keskilinjalla** on käytännössä sama kaikilla vaihtoehdoilla.



Kuva L3.21. Kantavan kerroksen vesipitoisuudet tien keskilinjalla edellä tarkastelluissa eri tapauksissa.

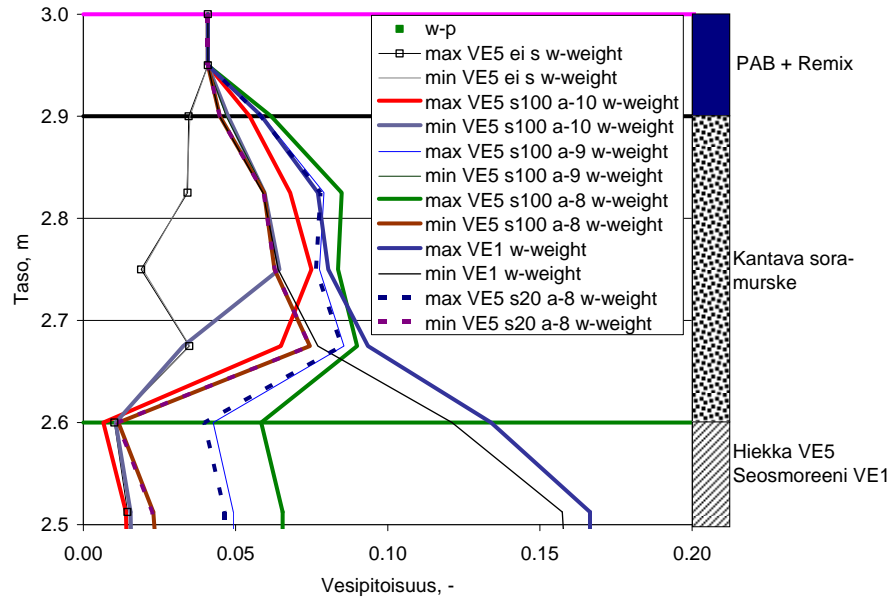
Kuvassa L3.22 on tarkasteltu tilannetta, jossa seosmoreenikerroksen materiaali on vaihdettu kuivatuskerroksen materiaaliksi (VE5). Tarkasteluissa tutkittiin seuraavia tilanteita: 1) ei sadetta, 2) sateen määrä 100 % asfalttipäällysteen vedenläpäisevyys on $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, 3) sateen määrä 100 % AB vedenläpäisevyys $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, sateen määrä 100 % AB:n vedenläpäisevyys $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (vastaa rakenteelle kuviteltua vedenläpäisevyyttä) ja 5) sateen määrä 20 %. Vertailun vuoksi kuvassa on vielä esitetty nykyisen rakenteen (VE1) kosteustila 100 % sateen määrällä.

Kun seosmoreeni on korvattu kuivatuskerroksen materiaalilla (VE5), tapaus, jossa sadetta ei ole lainkaan, vastaa tilannetta, jossa asfaltin läpäisevyys on $1 \cdot 10^{-10}$ m/s muualla kuin kantavassa kerroksessa. Asfaltin läpäisevyyden arvolla $1 \cdot 10^{-9}$ m/s kosteus kuivatuskerroksessa lisääntyy ja kasvaa edelleen noin 12 til-%:iin, kun läpäisevyys kasvaa arvoon $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Sateen määrällä 20 % kuivatuskerroksen vesipitoisuus on pienempi kuin vesipitoisuus 100 % sateen määrällä ja asfaltin läpäisevyydellä $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Seosmoreenikerroksessa vesipitoisuudet ovat huomattavasti korkeammalla tasolla. Kuvassa L3.22 on esitetty vain maksimivesipitoisuudet ”parhaiten kuivatetun” rakenteen (VE5) osalta.



Kuva L3.22. Rakenne, jossa seosmoreenikerros on korvattu kuivatuskerroksen materiaalilla (VE5). Tarkastelut, joissa ei ole sadetta (ei s) ja joissa sateen määrä on 100 % (s100) ja asfaltin läpäisevydet ovat $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, $1 \cdot 10^{-9}$ m/s ja $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (a-10, a-9, a-8) tai sateen määrä 20 % läpäisevyyden ollessa $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Vertailun vuoksi on esitetty myös nykyisen rakenteen lasketut minimi- ja maksimivesipitoisuudet.

Tarkempi erittely kantavan kerroksen vesipitoisuuksista vaihtoehdossa VE5 on esitetty kuvassa L3.23. Jos sadetta ei ole lainkaan, kantavan keskellä vesipitoisuus on noin 2 p-%. Jos sateen määrä on 100 % ja asfaltin läpäisevyys $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, kantavan kerroksen keskellä vesipitoisuus on 6 - 7 %. Asfaltin vedenläpäisevyyden kasvaessa arvoon $1 \cdot 10^{-9}$ m/s kantavan kerroksen keskellä vesipitoisuus on edelleen 6 - 7 %, mutta alempana materiaali on kosteampaa kuin tiiviimmällä asfaltilla. Asfaltin vedenläpäisevyyden kasvaessa edelleen arvoon $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, kantavan kerroksen keskellä vesipitoisuus nousee hieman ja on 6 - 8 %, mutta kerros on kokonaisuudessaan kosteampi kuin tiiviimmillä asfalteilla. Sateen määrään ollessa 20 %, kantavan kerroksen maksimi vesipitoisuus on keskimäärin prosenttiyksikön pienempi kuin 100 % sateella asfaltin läpäisevyyden ollessa $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Nykyinen rakenne (VE1) ei juuri poikkea paremmin kuivatetusta VE5 rakenteesta kuin ainoastaan kantavan kerroksen alaosassa tien keskikohdalla. Kantavan kerroksen keskellä VE5 rakenteen vesipitoisuus on 7,6 p-%, kun VE1 vesipitoisuus on 8,1 p-%.

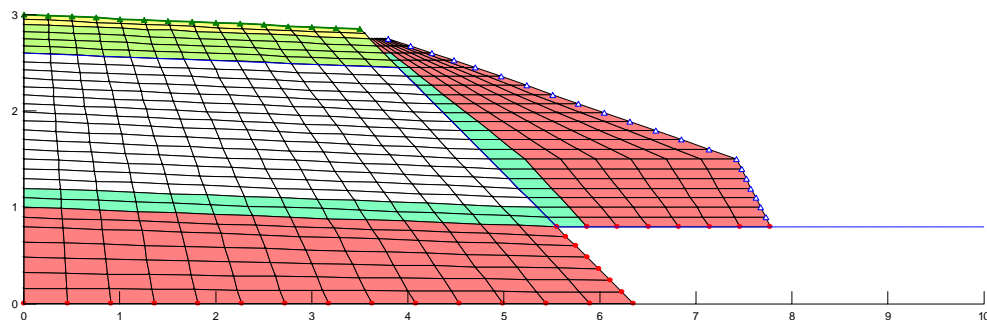


Kuva L3.23. Kantavan kerroksen vesipitoisuudet parhaiten kuivatetussa rakenteessa.

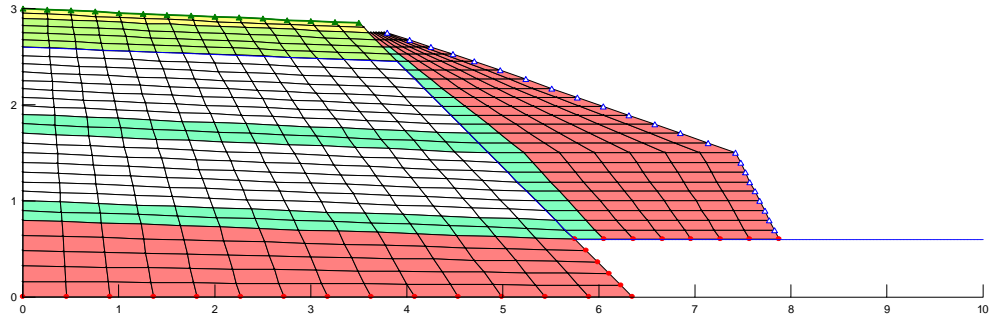
Kerrosrakenteen kehittämismahdollisuuksia

Edellä on käsitelty vesipitoisuusprofiileja ainoastaan tien keskilinjalla olevassa pystysuuntaisessa leikkauksessa. Tarkasteluissa seurattiin kuitenkin koko rakenteen käyttäytymistä. Tuloksista ilmeni, että vesipitoisuusjakautuma ei ole vakio tien leveydellä. Päälysteen läpi kulkeutuva vesi valuu läpäisevämmän kantavan/jakavan kerroksen pohjalla tiiviimpää seosmoreenin pintaa pitkin luiskaa kohti ja näissä tarkasteluissa seosmoreenia läpäisevämmässä luiskatäyttömateriaalissa seosmoreenin luiskanpintaa pitkin kohti seosmoreenin alla olevaa kuivatuskerrosta.

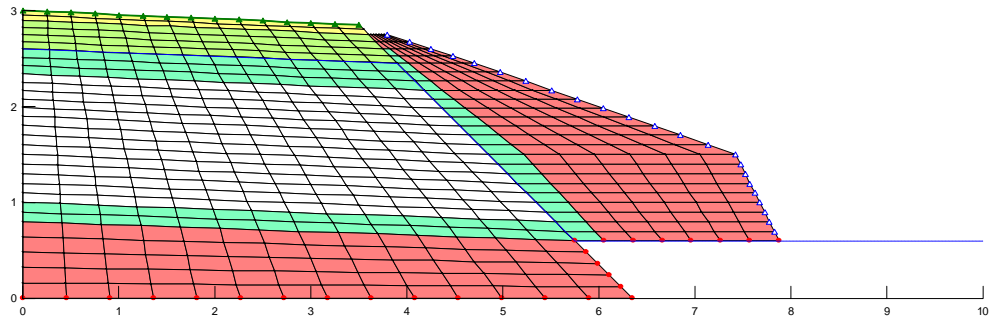
Mikäli luiskatäyttö olisi yhtä tiivistä tai tiiviimpää kuin seosmoreeni, vesi saattaa kerääntyä kantavan kerroksen alareunaan luiskan lähellä. Jotta voitiin varmistua veden nopeasta poistumisesta rakenteista, sijoitettiin kuivatuskerros myös luiskan seosmoreenin ja luiskatäytteen väliin (VE6, kuva L3.24). Sivukuivatuskerrosta tarkasteltiin myös tapauksessa, jossa seosmoreenin väliin lisättiin kuivatuskerros (VE7, kuva L3.25). Parannuksena kokeiltiin myös kuivatuskerroksen (paksuus 26 cm) lisäystä kantavan kerroksen alle (VE8, kuva L3.26), näiden yhdistelmää (VE9, kuva L3.27) ja moreenikerrosten välissä ja alla olevien kuivatuskerrosten paksuntamista 100 mm:llä 300 mm:iin (VE10, kuva L3.28).



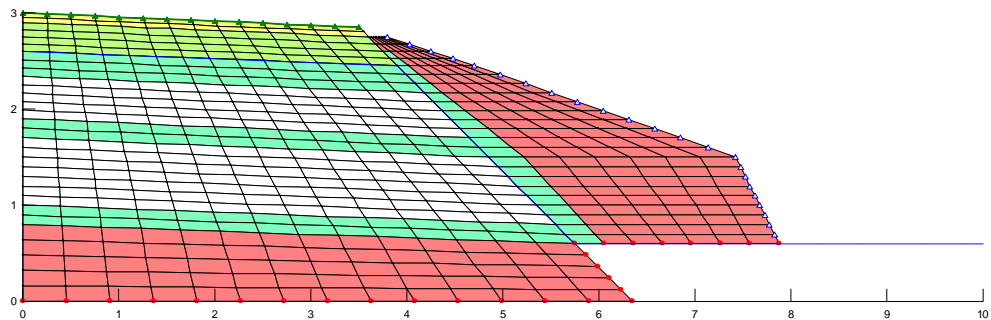
Kuva L3.24. VE6: rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerros.



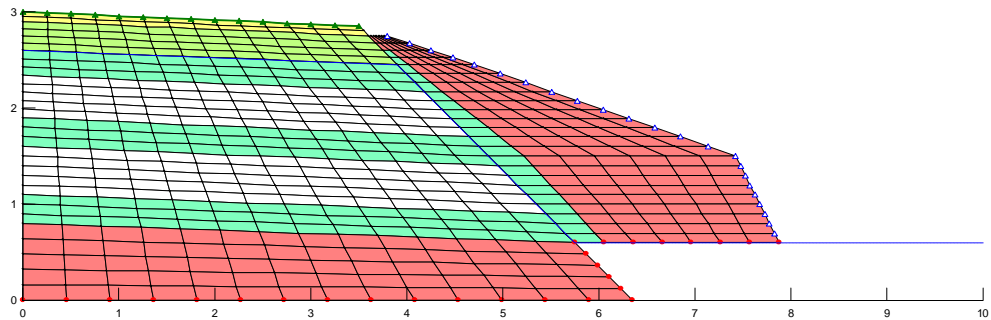
Kuva L3.25. VE7: rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ohella välikuivatuskerros.



Kuva L3.26. VE8: rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen lisäksi kuivatuskerros kantavan alle.



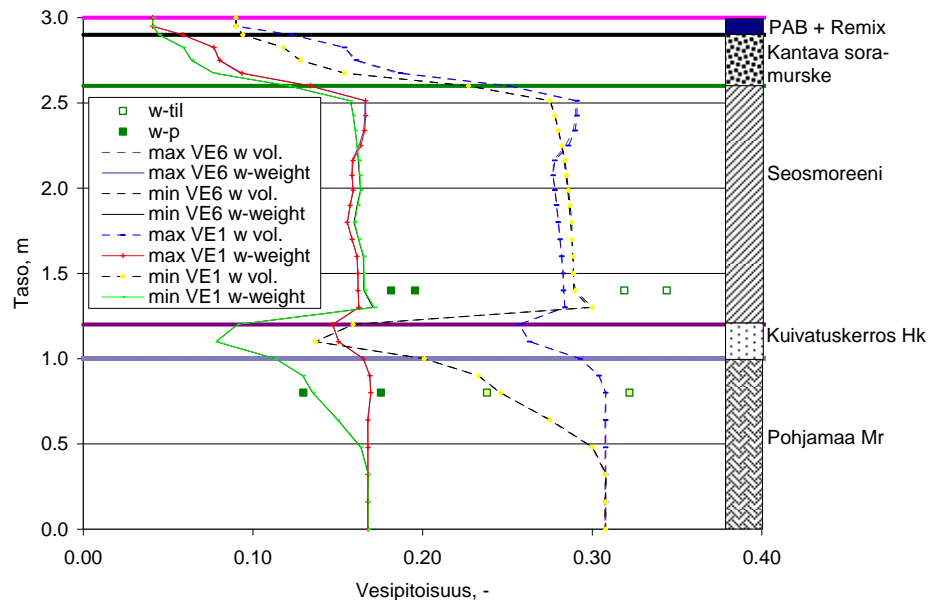
Kuva L3.27. VE9: rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ja välikuivatuskerroksen ohella suodatinkerros kantavan/jakavan alle.



Kuva L3.28. VE10: rakenteeseen lisätty sivukuivatuskerroksen ohella suodatinkerros kantavan/jakavan alle ja välikuivatuskerros sekä seosmoreenin alla olevat kuivatuskerrokset on paksunnettu 300 mm:iin.

Kehitettyjen rakenteiden laskennallinen vertailu

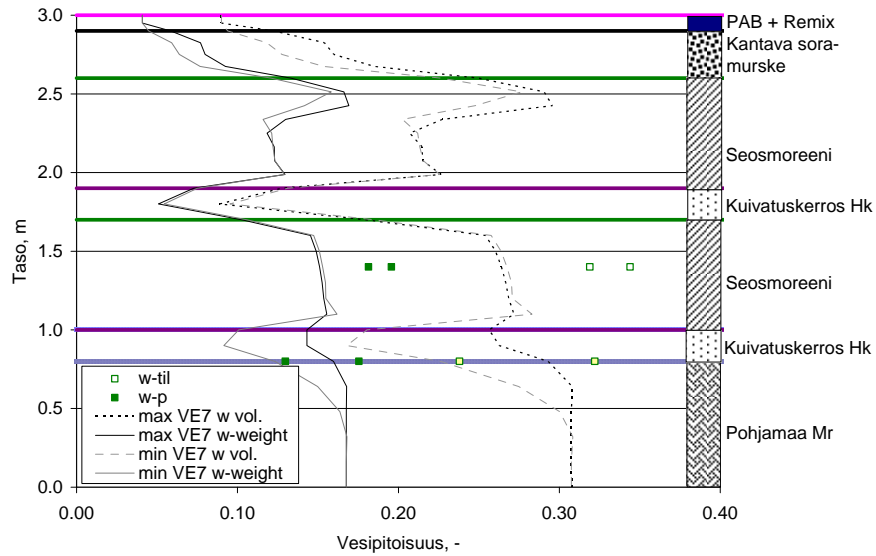
Sekä nykyisen rakenteen (VE1) ja sivukuivatuskerrosvaihtoehdon (VE6) vesipitoisuusprofileja on verrattu kuvassa L3.29. Hieman yllättäen sivukuivatuskerros ei juuri parantanut (siis kuivattanut) rakennetta verrattuna nykyiseen rakenteeseen tien keskilinjalla.



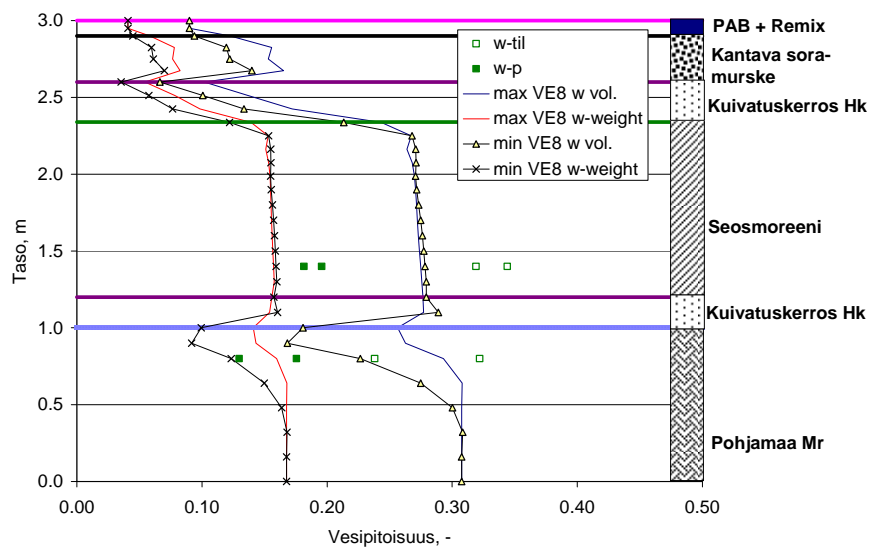
Kuva L3.29. VE1 ja VE6 (sivukuivatuskerros) vesipitoisuusprofiilit tien keskilinjalla.

Kuvassa L3.30 on tarkasteltu rakenteen VE7 (sivukuivatuskerros + keskikuivatuskerros) vesipitoisuusprofiilia keskilinjalla. Keskikuivatuskerroksella ei käytännössä ollut suurta vaikutusta verrattuna tien keskilinjalla nykyiseen rakenteeseen (VE1) verrattuna, vaikka ylemmän moreenikerroksen tilavuusvesipitoisuus paikallisesti putosikin enimmillään 4 %-yksikköä.

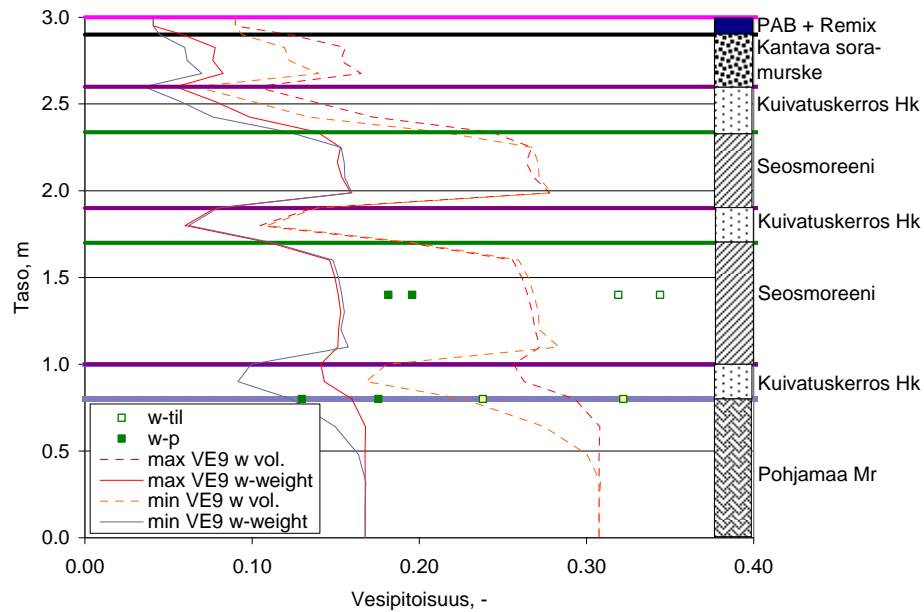
Tarkasteltaessa edelleen vaihtoehtoja VE8 ja VE9, joihin on vielä lisätty kuivatuskerros kantavan kerroksen alle, ei vesipitoisuusprofileissa tien keskilinjalla tapahtunut suurta muutosta. VE8:n vesipitoisuusprofiilit on esitetty kuvassa L3.31 ja VE9:n kuvassa L3.32. Seosmoreenikerrosten välissä ja alla olevien kuivatuskerrosten paksuntaminenkaan (VE10) ei vaikuttanut tilanteeseen tien keskilinjalla (kuva L3.33).



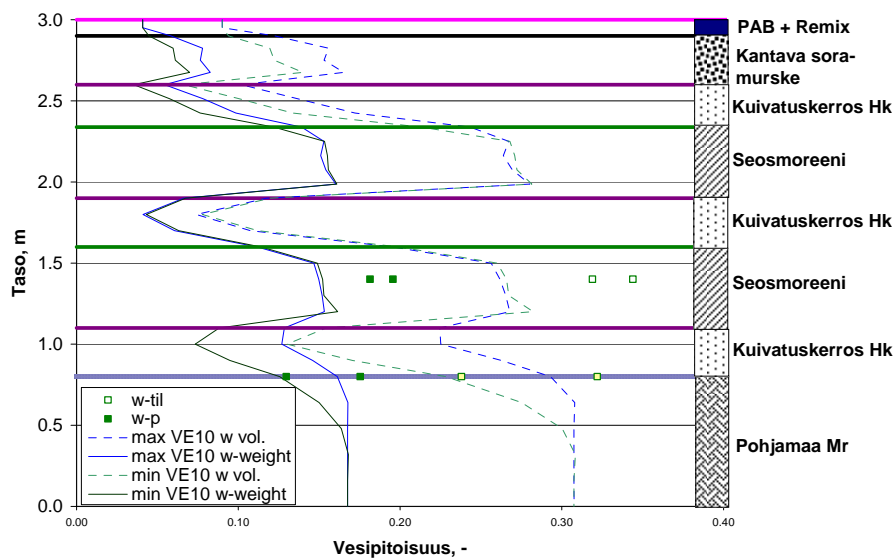
Kuva L3.30. Vesipitoisuusprofiilit tien keskilinjalla VE7 (sivukuivatuskerros + välikerros).



Kuva L3.31. Vesipitoisuusprofiilit tien keskilinjalla VE8 (sivukuivatuskerros + kuivatuskerros kantavan alla).

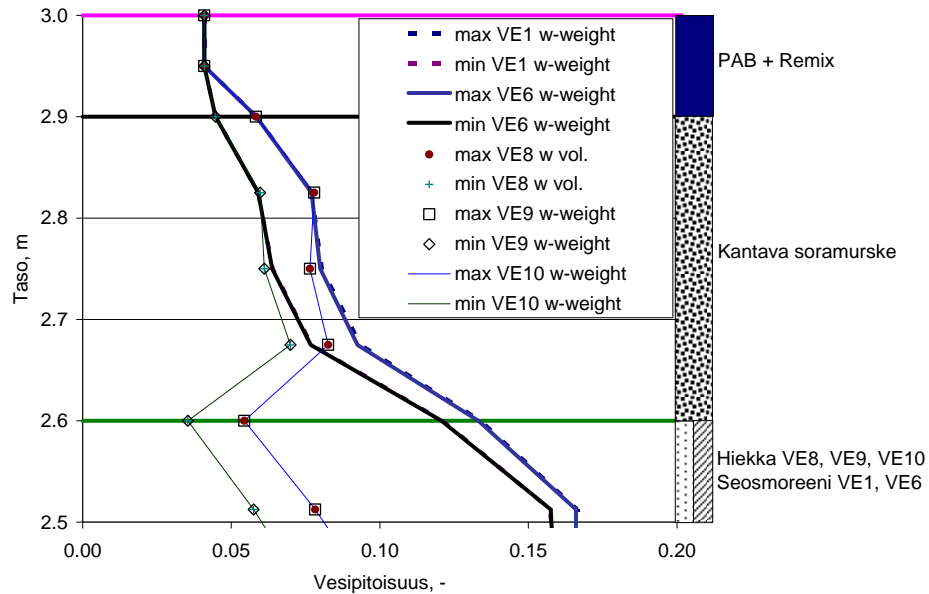


Kuva L3.32. Vesipitoisuusprofiilit tien keskilinjalla VE9 (VE7 + kuivatuskerros kantavan alla).



Kuva L3.33. Vesipitoisuusprofiilit tien keskilinjalla VE10 (paksunnettu kerros).

Kantavan (ja jakavan) kerroksen vesipitoisuuksia tien keskilinjalla tarkastellaan ainoastaan rakenteilla, jossa suodatinkerros oli kantavan/jakavan kerroksen alla (kuva L3.33, VE8, VE9 ja VE10). Nyt vesipitoisuuksissa tapahtui selvää muutosta nykyiseen rakenteeseen (VE1) nähden. Kantavan/jakavan alaosassa vesipitoisuus oli kuivatetuissa rakenteissa huomattavasti alhaisempi. Lisäksi se tasasi kantavan kerroksen vesipitoisuuden määrän 6 - 8 p-%:iin. Alempien kuivatuskerrosten paksuntaminen (VE10) ei kuitenkaan enää parantanut tilannetta.



Kuva L3.34. Kantava/jakavankerroksen vesipitoisuus rakenteilla VE1, VE8, VE9 ja VE10.

Vinon kuivatuskerroksen lisäys luiskaan ei siis juuri vaikuta moreenien vesipitoisuusprofiileihin tien keskiosalla. Keskikuivatuskerroksen lisäys yhdessä vinon luiskassa olevan kuivatuskerroksen ohella parantaa tilannetta jonkin verran etenkin ylemmän moreenikerroksen osalta. Suodatinkerroksen lisäys kantavan/jakavan alle auttaa eniten kantavan osalta keskikuivatuskerroksen ollessa mukana. Väli- ja alakuivatuskerrosten paksuntaminen 200 mm:stä 300 mm:iin ei juuri vaikuta tilanteeseen ottaen huomioon, että kuivatuskerroksen materiaalin kapillaarisuus on noin 100 mm.

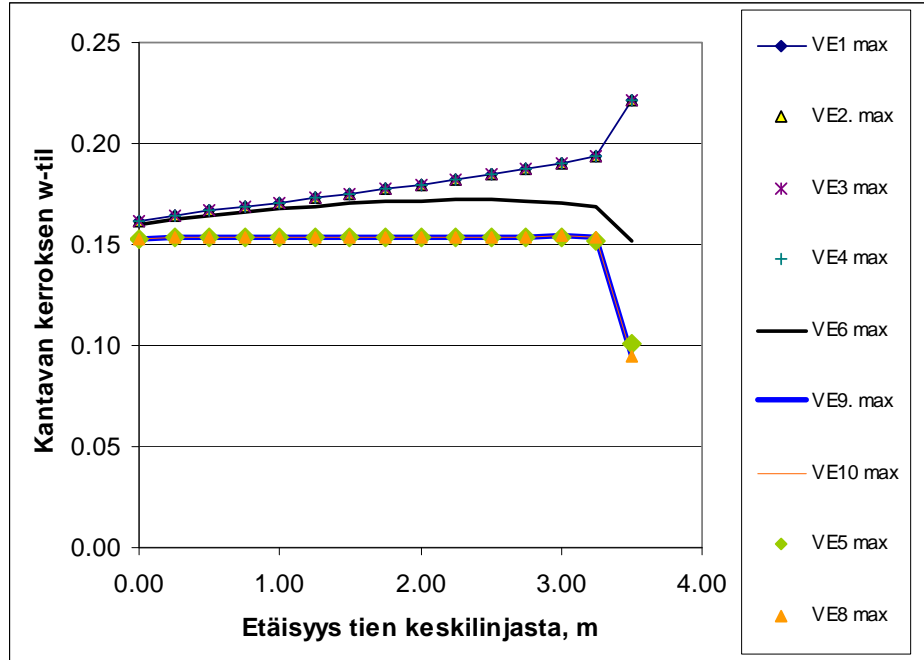
Kantavan kerroksen vesipitoisuus tien poikkisuunnassa

Tarkasteltaessa kantavan kerroksen vesipitoisuutta kantavan kerroksen keskellä tien poikkisuunnassa (kuva L3.35) eri rakennevaihtoehdoissa havaitaan kolme ryhmää. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat alussa tarkastellut perusrakenteet eli nykyinen rakenne (VE1), rakenne, jossa kuivatuskerrosta ei ole lainkaan seosmoreenina alla (VE2), rakenne, jossa kuivatuskerros on lisätty seosmoreenikerrosten väliin (VE3) ja rakenne (VE4), jossa tämä kuivatuskerros on johdettu luiskasta luiskatäyteen läpi ulos. Kaikissa näissä vesipitoisuus nousee tasaisesti tien keskilinjalta luiskaa kohti. Käytännössä tilavuusvesipitoisuus on lähellä luiskaa 3 - 4 til-%-yksikköä suurempi kuin tien keskilinjalla.

Toisen ryhmän muodostaa VE6 (nykyinen rakenne & vinokuivatuskerros). Tällä rakenteella vesipitoisuus lähtee nousuun tien keskilinjalta, mutta saavuttaa maksimin jonkin verran ennen luiskaa, ja alenee tästä luiskaa edelleen lähestyttäessä. Sivukuivatuskerros pienentää vesipitoisuuden maksimia suurimmillaan vähän yli 2 til-% tien reuna-alueella edellisiin rakenteisiin nähden.

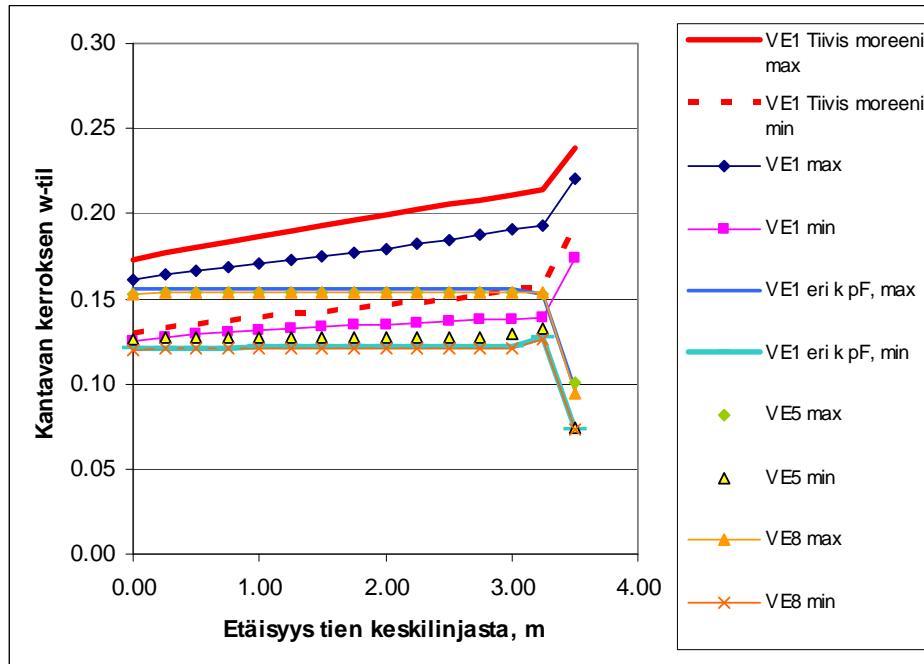
Kolmannen ryhmän muodostavat rakenteet (VE8, VE9, VE10 ja VE5), joissa on suodatinkerros kantavan/jakavan kerroksen alla. Näillä saavutetaan tasainen, noin maksimissa n. 15 til-% suuruinen vesipitoisuus koko kantavan kerroksen leveydeltä. Merkittävää on myös, että vesipitoisuus on samaa suuruusluokkaa pelkästään suodatinkerroksen ja moreenin alla olevan kuivatuskerroksen sisältävällä

rakenteella (VE8), kuin suodatinkerroksen sekä moreenikerrosten välissä ja alla olevan kuivatuskerroksen sisältävän rakenteen (VE9), vaikka nämä olisivat 300 mm paksuisiakin (VE10). Kantavan vesipitoisuus olisi myös sama vaikka seosmoreenia ei olisi rakenteessa lainkaan (VE5). Minimivesipitoisuuden osalta jakautuman muoto vastaa maksimivesipitoisuutta eri rakenteilla.



Kuva L3.35. Kantavan/jakavan kerroksen maksimi vesipitoisuus tien poikkisuunnassa eri kuivatusrakenteet sisältävillä rakenteilla.

Kuvassa L3.36 on vielä esitetty kantavan kerroksen vesipitoisuus eri rakenteilla, kun seosmoreenikerroksen vesipitoisuutta on vaihdeltu. Tiivis moreeni esittää rakennetta, jossa on käytetty seosmoreenia alun perin valituilla ominaisuuksilla. Nämä ominaisuudet pohjautuivat seosmoreenin maksimikuivatilavuuspainon suuruiseen tilavuuspainoon 19 kN/m^3 , huokoisuuteen 28,3 % ja vedenläpäisevyyteen $3,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Tiivis moreenikerros (ilman sivukuivatuskerrosta) nostaa kantavan kerroksen maksimi vesipitoisuutta n. 2 til-%-yksikköä. Nykyisellä rakenteella päästään myös sivukuivatuksen ja kantavan/ jakavan kerroksen alla olevan suodatinkerroksen sisältävää rakennetta vastaavalle tasolle, jos seosmoreeni on rakeisuudeltaan hieman karkeampaa (karkeutettua). Seosmoreenin vedenläpäisevyys on tällöin $4,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ja vedenimuominaisuudet myös erilaiset muuttuneesta rakeisuudesta johtuen. Seosmoreenin vaihdetut ominaisuudet on esitetty taulukoissa L3.1 ja L3.2.



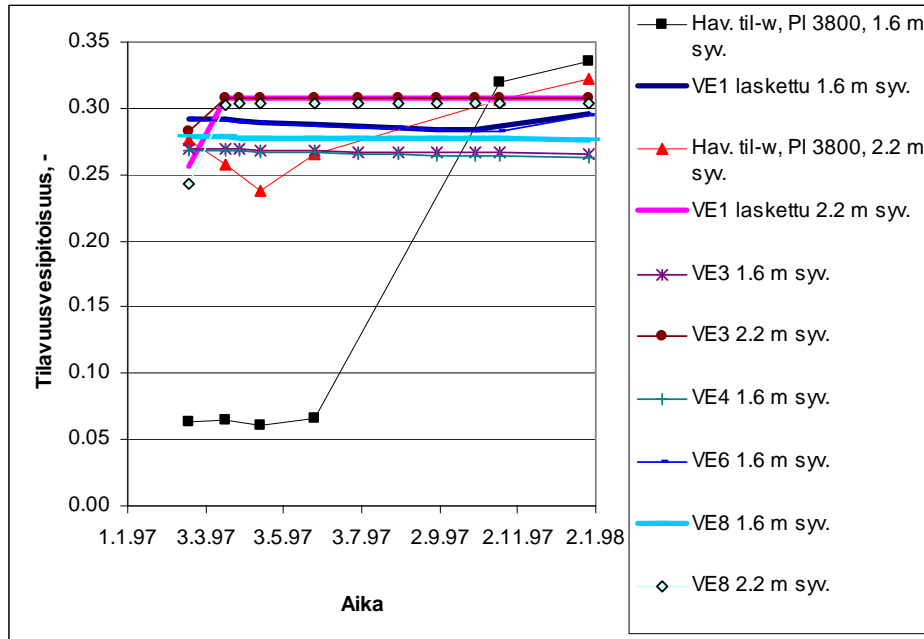
Kuva L3.36. Kantavan/jakavan kerroksen maksimi vesipitoisuus tien poikkisuunnassa eri moreenin vedenläpäisevyyksille ja kuivatusratkaisuille.

Vesipitoisuuden vaihtelut ajan suhteen

Eri rakenteiden laskettuja ja mitattuja tilavuusvesipitoisuuksia on vertailtu 1,5 metrin päässä keskilinjasta kuvassa L3.37 ajan suhteen vuonna 1997 seosmoreenissa (syvyys 1,6 m) ja pohjamaassa (syvyys 2,2 m). Mitatuista tilavuusvesipitoisuuksista on havaittavissa kerroksen jäätymistä etenkin seosmoreenissa olevassa havaintopisteessä kesäkuuhun asti. Loppuvuonna on tehty vain kaksi ”kunnollista” havaintoa. Seosmoreenissa laskettu tilavuusvesipitoisuus kehittyi näiden ”kunnollisten havaintojen” kanssa loppuvuodesta samansuuntaisesti, mutta havaittu tilavuusvesipitoisuus on lähes 4 til-% yksikköä laskennallista suurempi.

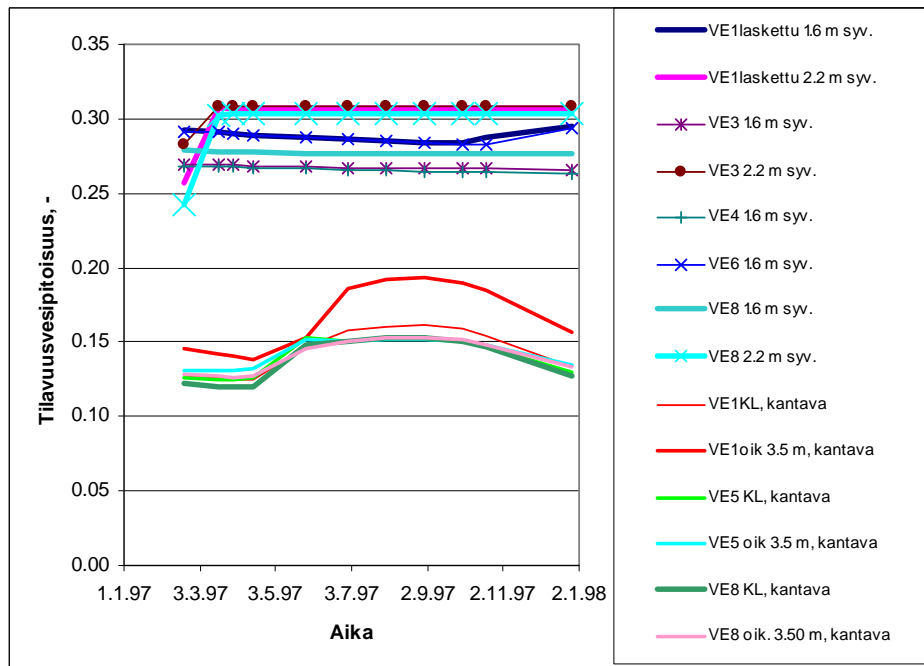
Pohjamaassa olevan havaintopisteen kevään mittaustulokset eivät ole luotettavia, vaikka ne ovatkin periaatteessa järkevää suuruusluokkaa. Tarkastelupiste on todennäköisesti ollut jäässä ainakin osittain, tai jäätymisestä aiheutuvilla prosesseilla (veden imeytyminen jäätymisrintamaan) on voinut olla vaikutusta vesipitoisuuteen. Roudan syvyys 18.2.1997 on ollut 2,07 m tien pinnasta, 18.3.1997 2,36 m ja 15.4.1997 2,52 m. Kahdessa viimeisessä mittauksessa routaraja on siis ollut mittaustason alapuolella. Laskentaohjelma ei huomioi rakenteessa tai maapohjassa tapahtuvaa jäätymistä. Alku- ja loppuvuonna havaittujen ja laskettujen tulosten vastaavuus on kaikesta huolimatta ollut verraten hyvä.

Kuvasta voidaan havaita, että suodatinkerroksen lisäksi kantavan/jakavan alle (vaihtoehdoissa VE8, VE9 ja VE10) ja sivukuivatuskerroksen lisäksi (VE6) seosmoreenin vesipitoisuuden tasoon voidaan jonkin verran vaikuttaa, mutta pohjamaassa vedenpinnan muutokset ja alimman kuivatuskerroksen kuivatustaso hallitsevat vesipitoisuutta. Välakuivatuskerrosten käyttö pienentää vesipitoisuutta seosmoreenipisteessä muita ratkaisuja enemmän.



Kuva L3.37. Havaitut ja eri rakenteilla lasketut tilavuusvesipitoisuudet.

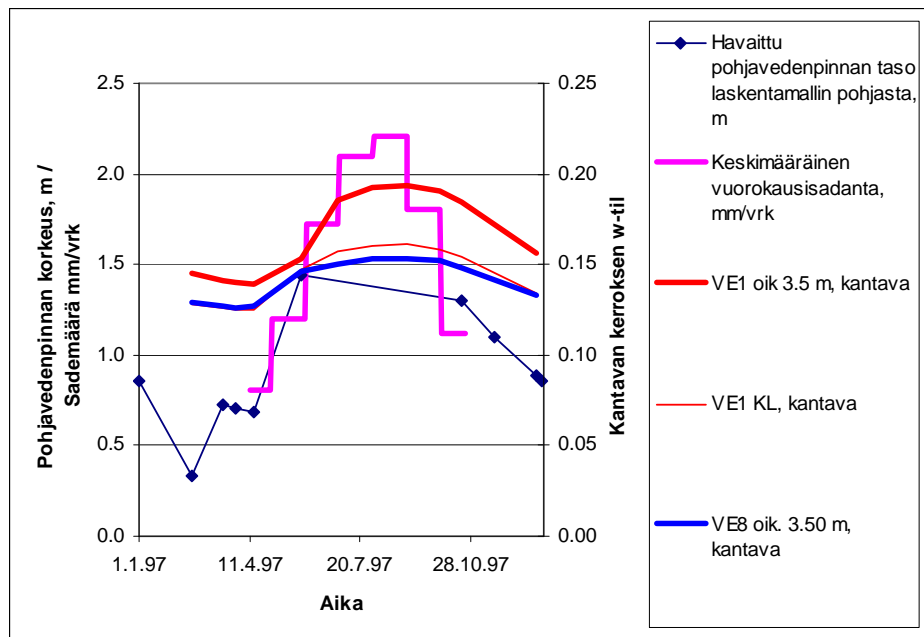
Kuvassa L3.38 on esitetty vastaava vesipitoisuuden vaihtelu vuodenkierron aikana eri rakenteilla kantavassa kerroksessa. Nykyisen rakenteen (VE1) kantavan kerroksen vesipitoisuuden vaihtelee maksimissaan välillä 14 - 19 %. Parhaiten kuivatetulla rakenteella (VE8) suodatinkerros kantavan alla ja seosmoreenin alla yhdessä sivukuivatuskerroksen kanssa) tilavuusvesipitoisuus vaihtelee välillä 12 - 15 %. Parempaan tulokseen ei kantavan kerroksen suhteen päästä valituilla ominaisuuksilla, vaikka seosmoreeni oli korvattu kuivatuskerroksen hiekalla.



Kuva L3.38. Mittauspisteissä ja kantavan kerroksen puolivälissä havaitut ja vastaavissa pisteissä lasketut tilavuusvesipitoisuudet.

Kuvassa L3.39 kantavan kerroksen vesipitoisuus on esitetty yhdessä kohteessa tehtyjen pohjavedenpinnan havaintojen ja laskelmissa käytetyn sateen kanssa.

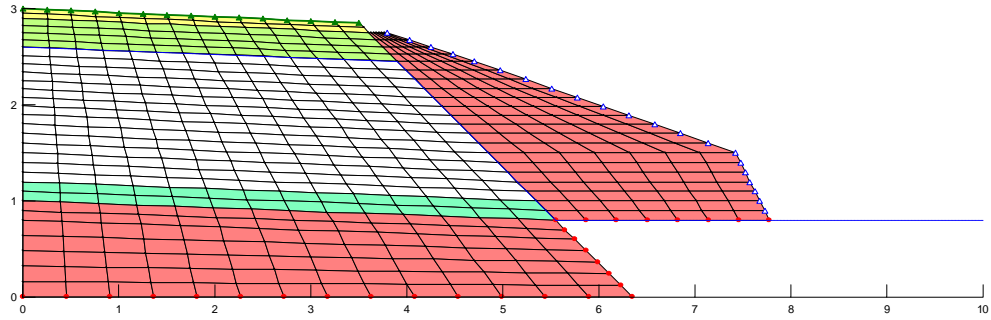
Vesipitoisuudet kantavassa kerroksessa nousevat sateen alkaessa vaikuttaa ja kääntyvät laskuun, kun kuukausittainen sademäärä alkaa pienetä.



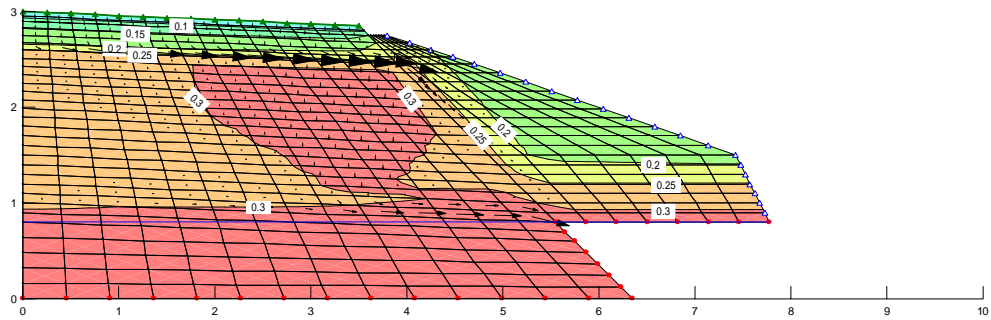
Kuva L3.39. Pohjavesihavainnot vuonna 1997 verrattuna laskelmien sadantaan ja kantavan kerroksen laskettuihin tilavuusvesipitoisuuksiin rakenteilla VE1 ja VE8 ajan suhteen.

Tilavuusvesipitoisuusjakautumat rakenteissa

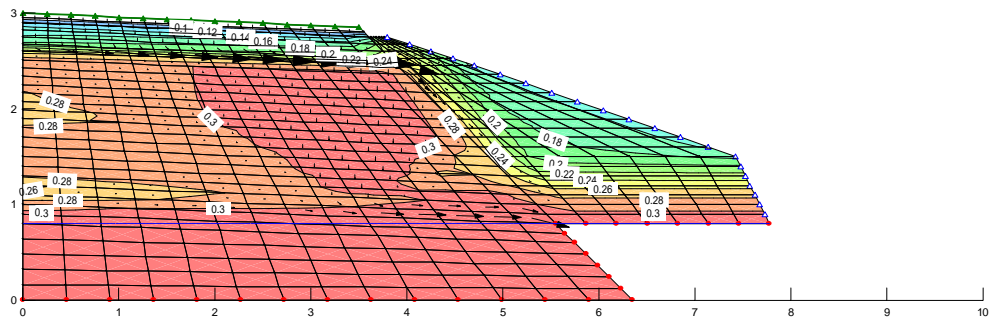
Kuvissa L3.40 - L3.43 on esitetty muutamien rakenteiden tilavuusvesipitoisuusjakautumat tasa-arvokäyrinä. Kuvista voidaan havaita, että sivukuivatuskerros yhdessä kantavan kerroksen alle tehtävän suodatinkerroksen kanssa tasoittaa seosmoreenin vesipitoisuusjakautumaa ja pienentää vesipitoisuutta. Välikuivatuskerroksen lisääminen vaikuttaa seosmoreenin vesipitoisuutta pienentäen vielä noin puolet sivukuivatuskerroksen ja kantavan kerroksen alapuolisen suodatinkerroksen vaikutuksesta.



VE1: Rakenteen kerrokset.

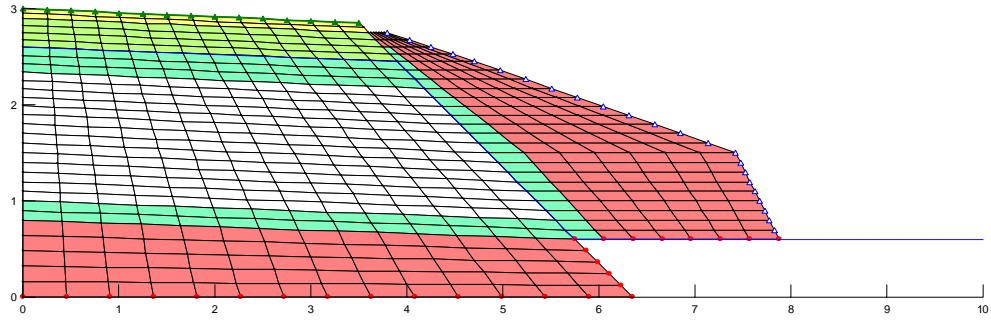


VE1: Tilavuusvesipitoisuudet 0,0 - 0,35 käyräväli 0,05.

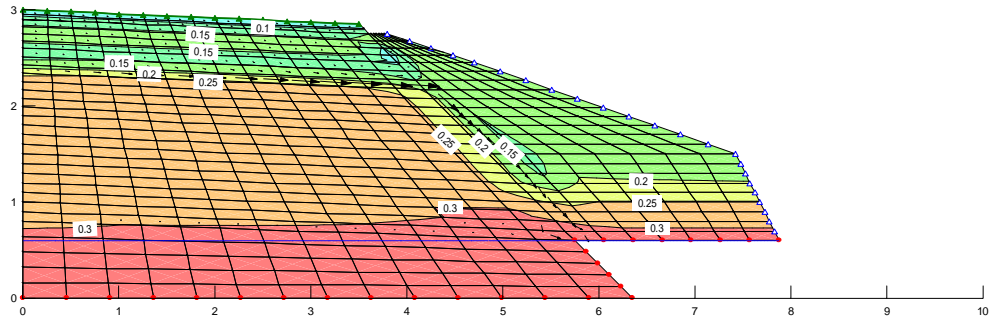


VE1: Tilavuusvesipitoisuudet 0,10 - 0,32 käyräväli 0,02.

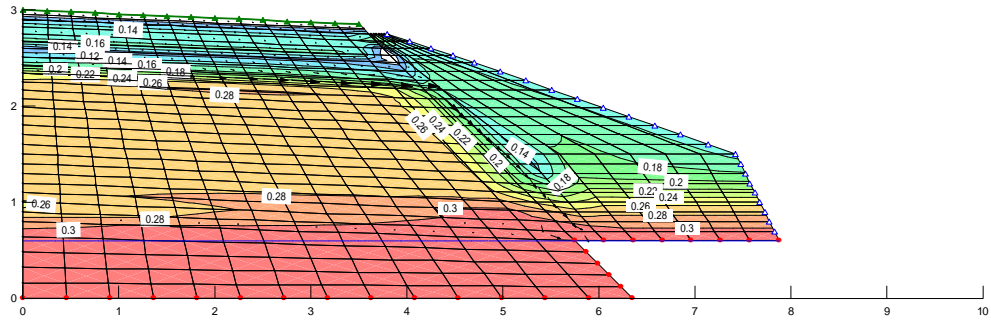
Kuva L3.40. Nykyisen rakenteen (VE1) rakennekerrokset ja tilavuusvesipitoisuusjakautumat.



VE8: Rakenteen kerrokset.

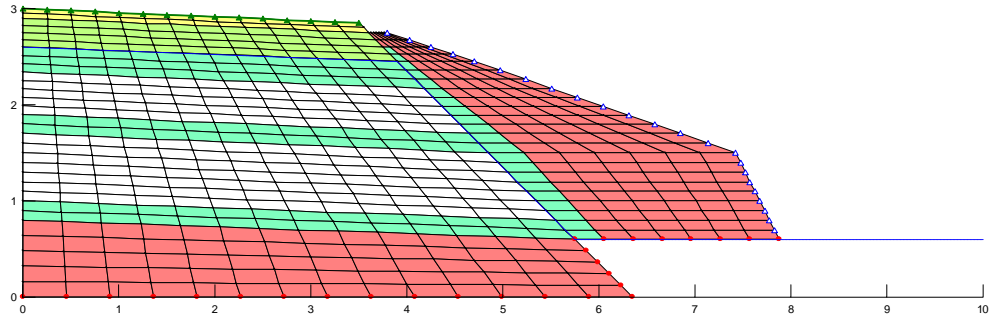


VE8: Tilavuusvesipitoisuudet 0,0 - 0,35 käyräväli 0,05.

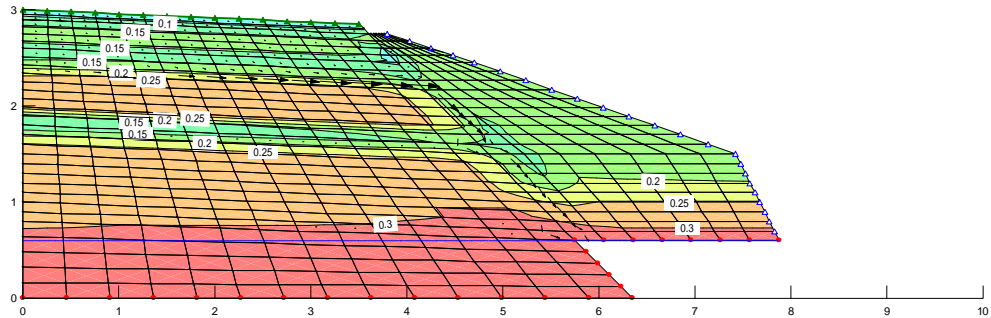


VE8: Tilavuusvesipitoisuudet 0,10 - 0,32 käyräväli 0,02.

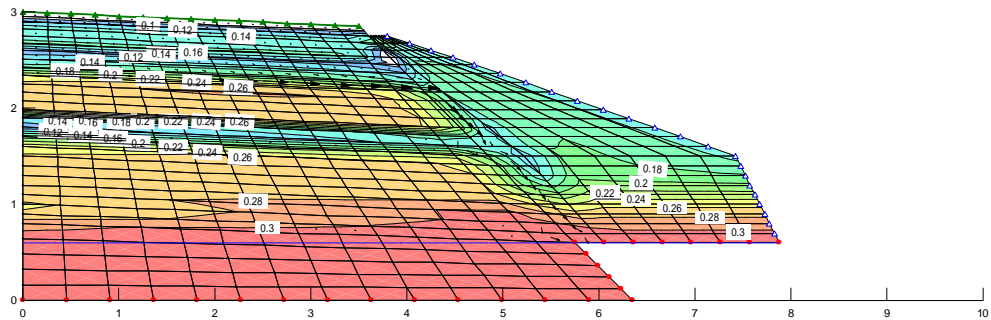
Kuva L3.41. Parhaiten kuivatetun rakenteen (VE8) rakennekerrokset sekä tilavuusvesipitoisuusjakautumat.



VE9: Rakenteen kerrokset.

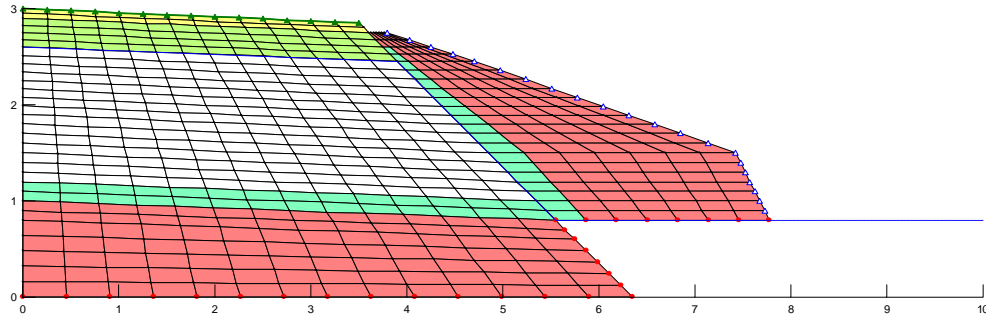


VE9: Tilavuusvesipitoisuudet 0,0 - 0,35 käyräväli 0,05.

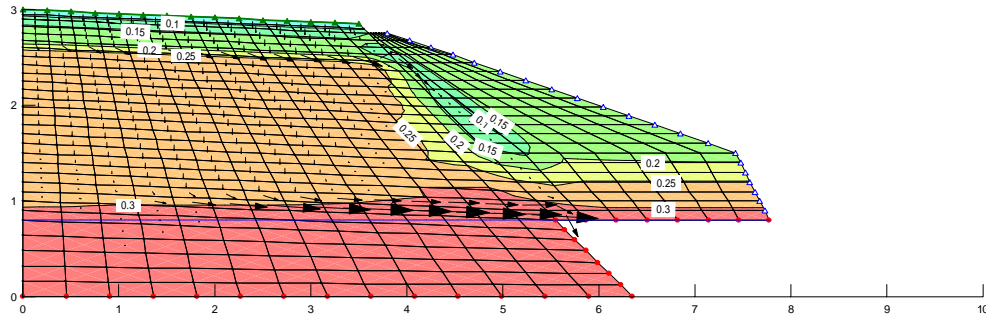


VE9: Tilavuusvesipitoisuudet 0,10 - 0,32 käyräväli 0,02.

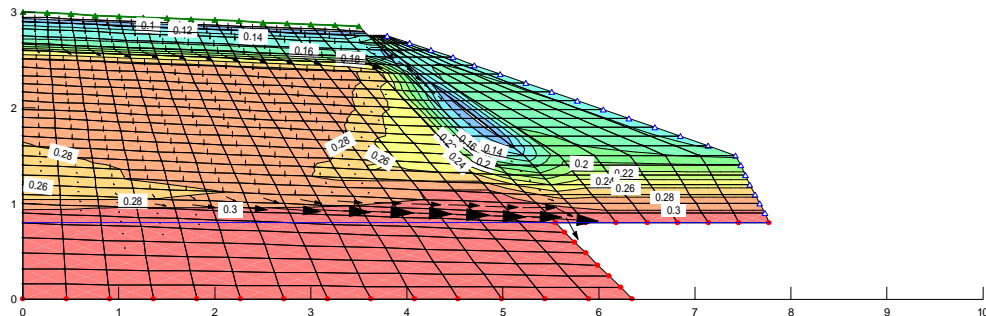
*Kuva L3.42. Parhaiten kuivatettu rakenne VE9, jossa mukana on myös välikuiva-
tuskerros, ja tilavuusvesipitoisuusjakautumat.*



VE6 mod: Rakenteen kerrokset.



VE6 mod: Tilavuusvesipitoisuudet 0,0 - 0,35 käyräväli 0,05.



VE6 mod: Tilavuusvesipitoisuudet 0,10 - 0,32 käyräväli 0,02.

Kuva L3.43. Kuvitteellisen läpäisevämmän (karkeutetun) seosmoreenin sisältävän rakenne sekä tilavuusvesipitoisuusjakautumat. Rakenne sama kuin VE6, mutta moreeni karkeampaa.

Viitteet:

Ahonen, M., Holappa, T., Huttunen, E., Kivikoski, H., 2003, Mt 941 Männikkövaara, Kohderaportti TPPT 42, TPPT-tutkimusohjelma. Espoo. 55 s.

Katu 90., 1991, Kadunrakennuksen tekniset ohjeet. Katu 90. Suomen kunnallisteknisen yhdistyksen julkaisu 11. Jyväskylä. 273 s.

Kolisoja, P., 1993a, Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993, TIEL 3200163. Helsinki. 147 s.

Kolisoja, P., 1993b, Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Esiselvityksen laboratoriokokeet. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993, TIEL 3200164. Helsinki, 1993. 71 s.

Kolisoja, P., 1997, Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publications 223. Tampere. 188 p. + 13 app.

Korkiala-Tanttu L., Laaksonen R. and Törnqvist J., Kevään ja ylikuorman vaikutus ohutpäällysteisen tien vaurioitumiseen, HVS-Nordic tutkimus, Tiehallinnon selvityksiä 11/2003, 51 s. + liitt. <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200801.pdf>

Korkiala-Tanttu, 2008, Calculation method for permanent deformations of unbound pavement material, Espoo 2008, VTT Publications 683, Draft of PhD Thesis 14.8.2008, 95 p. + app. 2 p.

Laukkanen, Kyösti ja Leivo, Markku, 1995, Bitumi-sementti-massakomposiittien soveltuvuus tien päällysrakenteeseen. TPPT Väli­raportti nro M5.

Mikkola, K., 1996, Maantien 941 parantaminen välillä Männikkövaara - Posion kunnanraja. TPPT-kohde. Insinööri­työ, Rovaniemen teknillinen oppilaitos. 49 s. + liitteet.

Rakennustieto, 2006, InfraRYL 2006, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja alueet, Helsinki, 621 s.

Savolainen M., Ryynänen T., Belt J. ja Ehrola E., 2001, Temmeksen koetien tutkimukset 1996 - 2001, Tiehallinnon selvityksiä 69/2001, Tiehallinto, Helsinki, 33 s.

Wimna L.G., 2001, Accelerated load testing of pavements, HVS-Nordic tests in Sweden 1999, VTI rapport 477A-2001. Linköping, p. 93

LIITE 4. Analytical Hierarchy Process (AHP): periaatteet ja kysely

Johdanto

Analyttinen hierarkiaprosessi (Analytic Hierarchy Process, AHP) on monikriteerinen päätöksentekomenettely, jonka esitti T.L. Saaty 1970 -luvun lopussa /Saaty 1980/. Analyttinen hierarkiaprosessi on suosittu menetelmä monimutkaisen ongelman hajottamiseksi osiinsa ja (kriteerien) päätösvaihtoehtojen keskinäistä paremmuutta kuvaavien lukuarvojen johtamiseksi, lähinnä lähtötietojen helpon saatavuuden takia. AHP voi perustua melko yksinkertaiseen kyselyyn tai haastatteluun tai se voidaan tehdä tietokoneavusteisesti.

AHP:n ydin on pareittaisten vertailujen menetelmä, missä tarkastellaan kerrallaan kahta (kriteeriä) vaihtoehtoa. Päättäjät valitsee näistä tärkeämmän ja kuvaa vaihtoehtojen eron voimakkuutta kokonaislukuasteikolla 1 - 9. Näiden pareittaisten vertailujen avulla kullekin kriteerille (vaihtoehdolle) lasketaan painoarvo. Pareittaisten vertailujen johdonmukaisuutta seurataan konsistenssi-indeksin avulla.

Painojen laskeminen AHP:ssa

Päättäjät tarkastelee kerrallaan kahta vaihtoehtoa ja valitsee taulukosta 1 luvun, joka kuvaa kahden vertailtavan vaihtoehdon (kriteerin) voimakkuutta.

Taulukko 1. Pareittaisten vertailujen asteikko. Vertailumatriisin Alkioksi a_{ij} asetetaan luku, jonka sanallinen kuvaus vastaa päättäjän preferenssin voimakkuutta /Jaakola 2003/.

1	vertailtavat elementit tasaveroiset tarkasteltavan ominaisuuden suhteen
3	toinen hieman dominoiva tarkasteltavan ominaisuuden suhteen
5	toinen selvästi dominoiva
7	toinen erittäin selvästi dominoiva
9	toinen absoluuttisesti dominoiva
2, 4, 6, 8	välisarvoja voidaan käyttää haluttaessa kompromissia
1/9, ..., 1/2	edellisten käänteislukuja käytetään osoittamaan päinvastaista suhdetta

a_{ij} on painokerroin: missä i on rivin indeksi ja j on sarakkeen indeksi

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Tekemällä kaikki vertailut saadaan täysi vertailumatriisi A , joka on $n \times n$ käänteislukumatriisi ja, joka toteuttaa ehdot

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \text{ja} \quad a_{ii} = 1 \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\},$$

missä n on vertailtavien elementtien lukumäärä.

Jos päättäjän pareittaiset vertailut olisivat täysin johdonmukaiset eli konsistentit, olisi myös seuraava yhtälö voimassa, mutta menetelmä ei edellytä tämän ehdon täyttämistä.

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \quad \forall i, j, k \in \{1, \dots, n\}$$

Kun matriisi A on täytetty, saadaan tuntemattoman painovektorin w arvio yhtälöstä

$$Aw = \lambda_{\max} w,$$

missä λ_{\max} on A :n suurin ominaisarvo. Vektorin w painot normeerataan jakamalla ne summallaan, jonka jälkeen niiden summa on 1. Vertailtavien elementtien painovektori on siis A :n suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori. Tästä syystä pareittaisten vertailujen menetelmää kutsutaan myös ominaisvektorimenetelmäksi.

Poikkeamaa $\lambda_{\max} - n$ käytetään vertailujen epä johdonmukaisuuden indikaattorina. Konsistenssi-indeksi CI (consistency index) määritellään

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}.$$

Eri kokoisten matriisien CI :t eivät ole keskenään vertailukelpoiset, joten varsinaisena epä johdonmukaisuuden mittana käytetään konsistenssisuhdetta CR (consistency ratio)

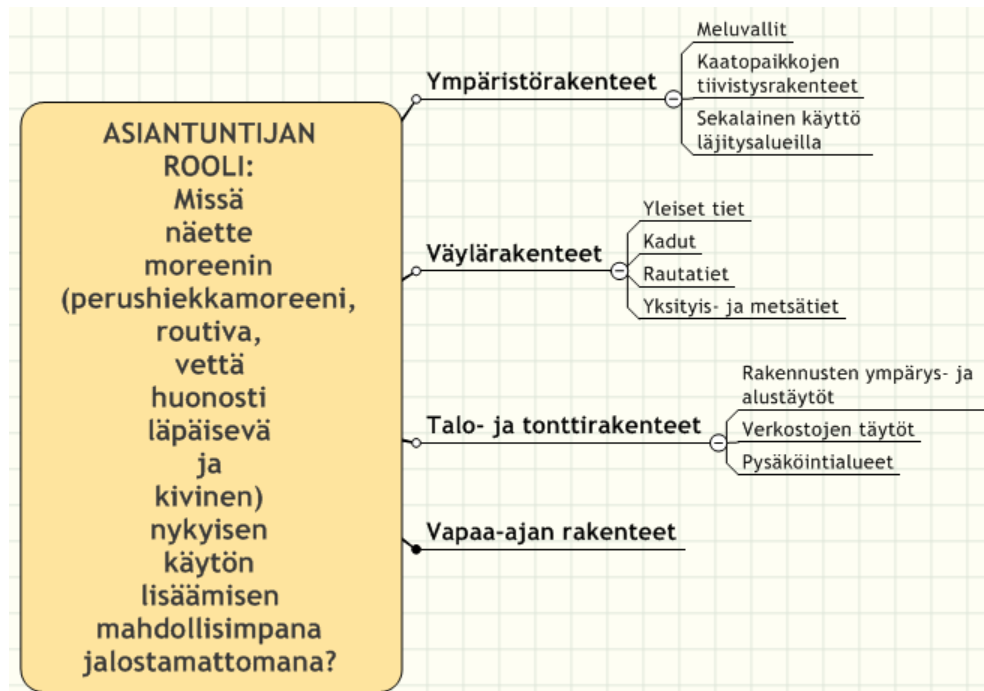
$$CR = \frac{CI}{RI},$$

missä satunnaisindeksi RI (random index) on satunnaisesti generoitujen käänteislukumatriisien CI :n keskiarvo. Suosituksen mukaan CR :n arvon tulisi olla $CR \leq 0,1$.

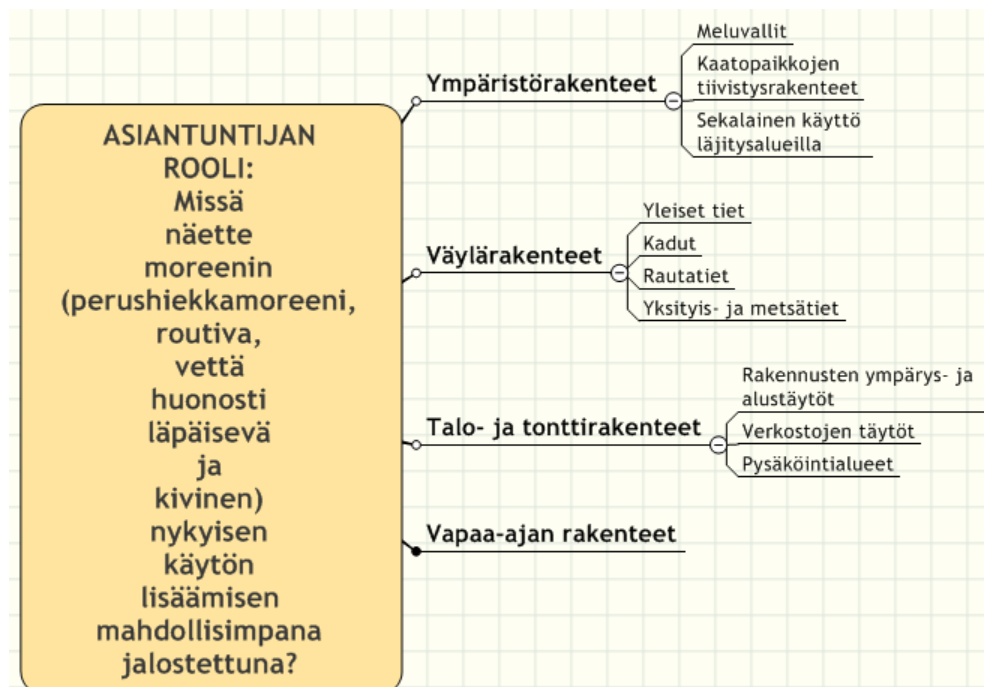
HUUMA-kysely

Workshopissa 16.5.2008 kyseltiin ohjaus- ja projektiryhmän osallistujilta moreenin käytön lisäämismahdollisuuksiin ja jalostetun moreenin ominaisuuksien arvottamiseen. Heille esitettiin kysymyksiä sekä jalostamattoman moreenin käytön lisäämismahdollisuuksista että jalostetun moreenin käytön lisäämismahdollisuuksista. Näihin kysymyksiin vastaukset annettiin asiantuntijan roolissa. Lisäksi

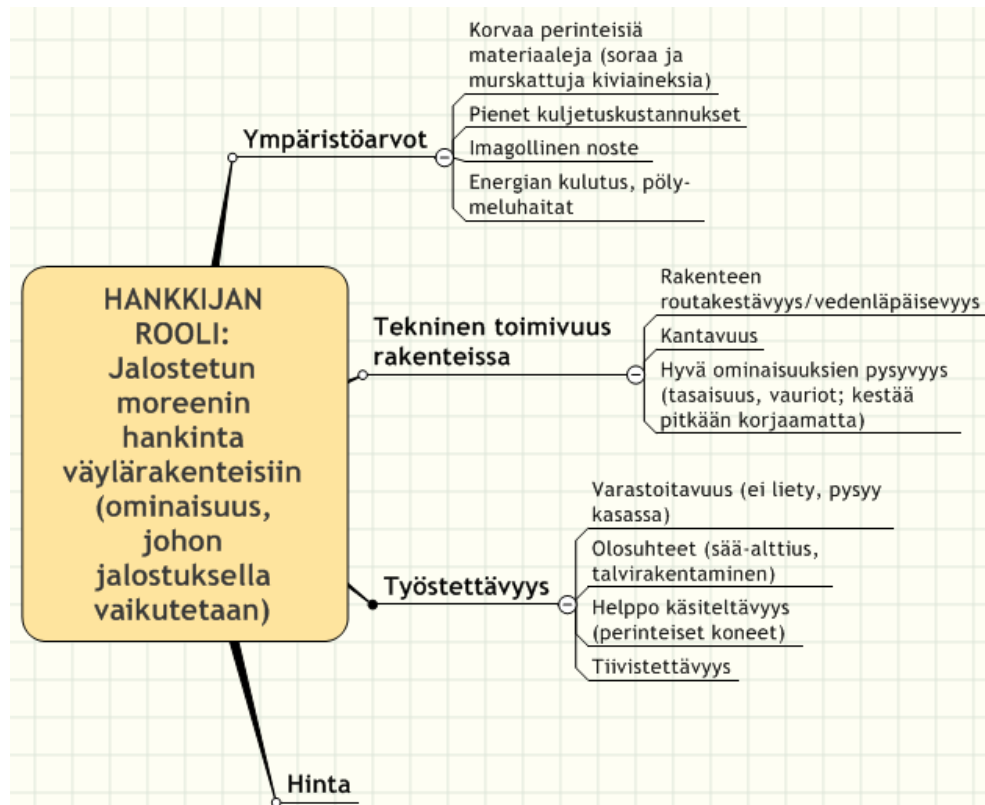
kysyttiin jalostetun moreenin ominaisuuksien arvottamisesta. Tähän kysymykseen vastattiin hankkijan roolissa. Kyselyssä käytetyt kysymykset on esitetty kuvissa L4.1, L4.2 ja L4.3.



Kuva L4.1. Kysymys A: Moreenin käytön lisäämismahdollisuudet jalostamattomana.



Kuva L4.2. Kysymys B: Moreenin käytön lisäämismahdollisuudet jalostettuna.

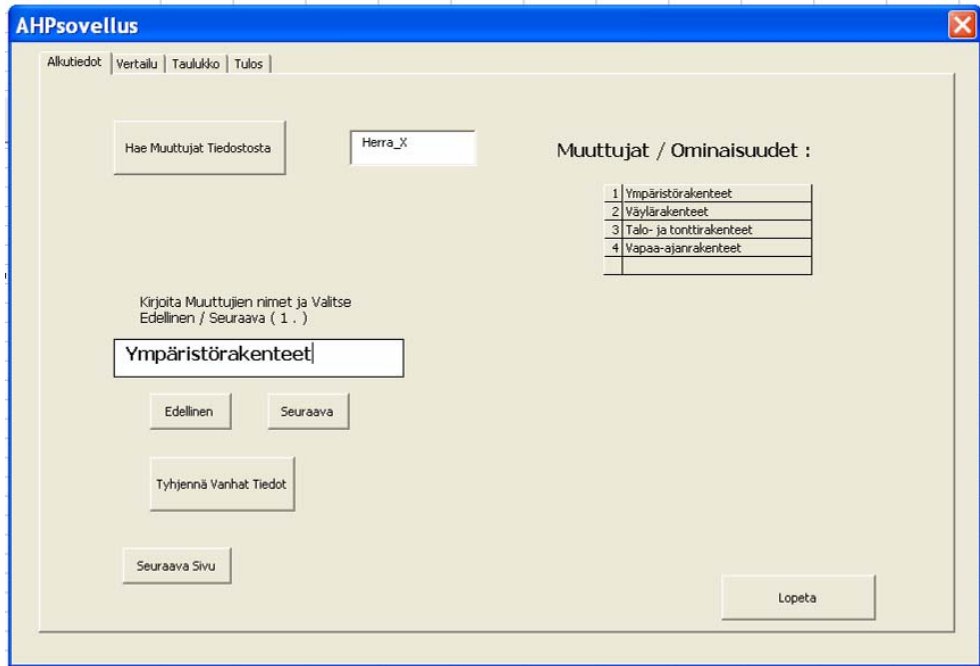


Kuva L4.3. Kysymys C: Jalostetun moreenin tärkeimmät ominaisuudet.

Kysely toteutettiin AHP-tekniikalla kyselyä varten laaditulla tietokoneohjelmalla. Tutkimuksessa käytettiin Excelillä ja Visual Basicillä toteutettua kyselyohjelmaa. Yksinkertaistettuna kyselyyn vastaaminen tarkoittaa eri tekijöiden suhteellista arvottamista keskenään toisiaan vastaan. Vaihtoehtojen vertailu tapahtuu aina kahta kriteeriä pareittain vertailemalla. Esimerkiksi kuvan L4.1 ylimmällä tasolla vastaaja arvioi, onko käytön lisäys mahdollisempaa ja kuinka paljon ensin ympäristörakenteissa vai väylärakenteissa (katso myös jäljempänä kuva L4.5), sitten ympäristörakenteissa vai talo- ja tonttirakenteissa ja lopuksi ympäristörakenteissa vai vapaa-ajanrakenteissa. Tämän jälkeen väylärakenteet arvioidaan vastaavasti muita jäljellä olevia vastaan ja lopulta talo- ja tonttirakenteet vapaa-ajanrakenteita vastaan. Samalla lailla käydään läpi kakkostasot eli aikaisempien kohtien alakohdat.

Ennen kysymyksiin vastaamista vastaajien kanssa käytiin kysymykset läpi ja pidettiin lyhyet alustukset moreenien jalostustekniikoista, hyötykäytön esteistä ja jalostamisen ympäristövaikutuksista. Kysymyksiin vastattiin kysymyskohtaisesti ohjatusti siten, että ko. kysymys oli kaiken aikaa vastaajien nähtävänä. Myös vastaamisessa käytettävän työkalun käyttö käytiin läpi siten, että vastaamisen väärinymmärtämisen mahdollisuus oli mahdollisimman pieni.

Esimerkkinä kysymysten ohjelasivujen näkymisestä vastaajalle AHP-sovellusohjelmassa on kuvissa L4.4 – L4.7 esitetty kysymys A, jossa rakenteita verrataan toisiinsa.



AHPsovellus

Alkutiedot | Vertailu | Taulukko | Tulos

Hae Muuttujat Tiedostosta: Herra_X

Muuttujat / Ominaisuudet :

1	Ympäristörakenteet
2	Väylärakenteet
3	Talo- ja tonttirakenteet
4	Vapaa-ajanrakenteet

Kirjoita Muuttujien nimet ja Valitse Edellinen / Seuraava (1 .)

Ympäristörakenteet

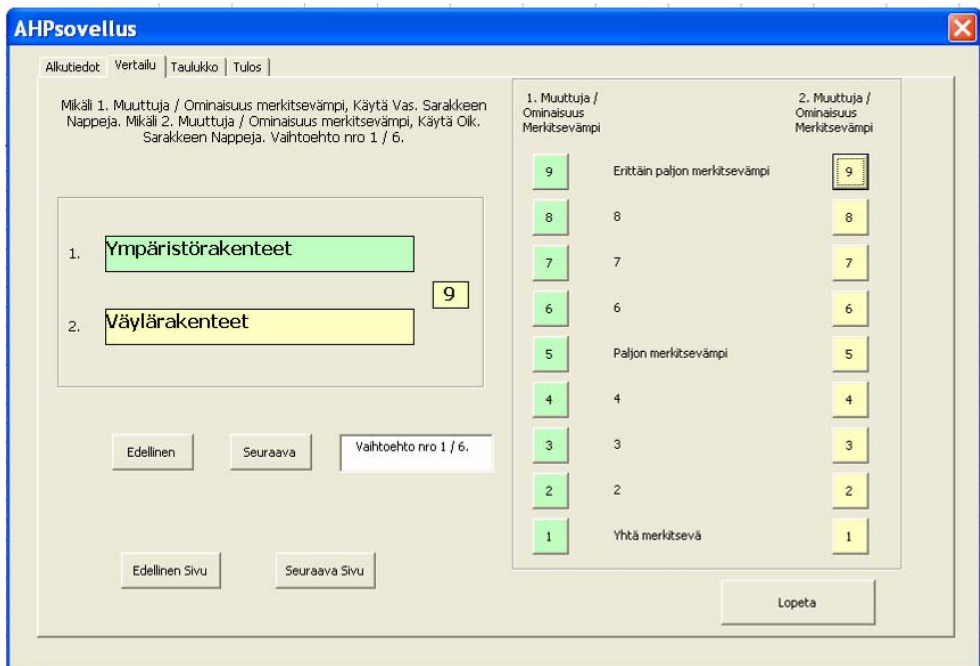
Edellinen | Seuraava

Tyhjennä Vanhat Tiedot

Seuraava Sivu

Lopeta

Kuva L4.4. AHP-sovelluksen aloitussivu.



AHPsovellus

Alkutiedot | Vertailu | Taulukko | Tulos

Mikäli 1. Muuttuja / Ominaisuus merkittävämpi, Käytä Vas. Sarakkeen Nappeja. Mikäli 2. Muuttuja / Ominaisuus merkittävämpi, Käytä Oik. Sarakkeen Nappeja. Vaihtoehto nro 1 / 6.

1. Ympäristörakenteet 9

2. Väylärakenteet 9

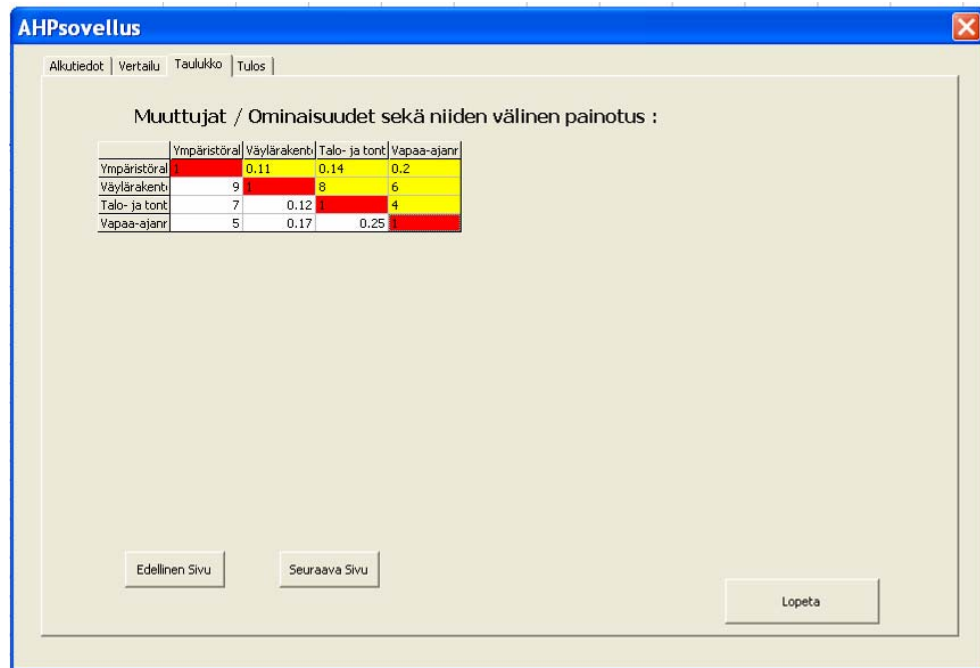
Edellinen | Seuraava | Vaihtoehto nro 1 / 6.

Edellinen Sivu | Seuraava Sivu

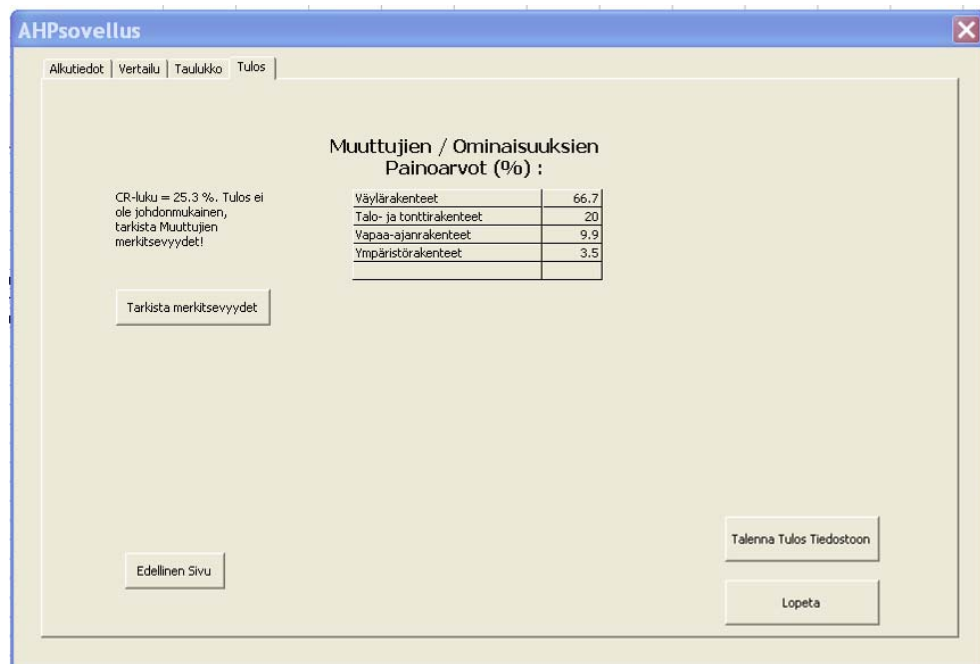
Lopeta

1. Muuttuja / Ominaisuus Merkittävämpi		2. Muuttuja / Ominaisuus Merkittävämpi
9	Erittäin paljon merkittävämpi	9
8	8	8
7	7	7
6	6	6
5	Paljon merkittävämpi	5
4	4	4
3	3	3
2	2	2
1	Yhtä merkittävä	1

Kuva L4.5. Pareittaisten vaihtoehtojen vertailu.



Kuva L4.6. Muuttujien välinen painotus.



Kuva L4.7. Muuttujien painoarvot.

Viitteet:

Jaakola, K., 2003, Ominaisarvojen jakauma balansoidulla asteikolla AHP:ssa. Sovelletun matematiikan erikoistyö. TKK, 2003.

Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGrawhill, New York.

LIITE 5. Moreenin jalostamiseen soveltuva kalusto

Välppä

Välppä on perusmuodossa yksinkertainen tankoseula, jolla tyypillisesti erotetaan soranotto paikalla sorasta suuret kivet pois. Moreenin jalostuksessa sitä voidaan käyttää vastaavasti kivien erottamiseen. Maa-aineksesta on tarpeen kuitenkin poistaa isot lohkat, joita kaivuvaiheessa, jotta välppä ei vaurioidu, kun maa-aines kaadetaan kauhasta tankojen päälle. Välppämällä erotettu kivi- ja lohkat aines voidaan jalostaa erikseen kivimurskeeksi.

Tavanomaisessa vapaaseen pudotukseen perustuvassa välppässä saattaa olla ongelmana olla moreenin sitoutuminen melko tiiviiksi kappaleiksi ja kivien pintaan, jolloin pieni osa hienoaineksesta seuloutuu kivien mukana. Välppän tehoa ja erottelykykyä voidaan parantaa täryttämällä välppää.



Kuva 1. Siirrettävä välppä (vas. ja kesk., lähde www.vimelco.com) sekä täryllä ja kuljettimella varustettu tela-alustainen välppäyksikkö.

Tasoseula

Tasoseula on tyypillisin maa- ja kiviaineksen erotteluun tarkoitettu seulatyypin (kuva 2). Seulayksikkö voi sisältää useampia seulalaatikoita, joiden pohjassa käytetään erityyppisiä varsinaisia seuloja. Kuljettimet siirtävät erotellut jakeet omiin kasoihin tai jatkokäsittelyyn. Seulayksikössä voi olla pyörialusta, jolloin se on siirrettävissä helposti eri työmaille tai tela-alusta, jolloin se on nopeasti siirrettävissä työmaa-alueella. Seulayksikkö voi olla myös integroituna murskaimeen.



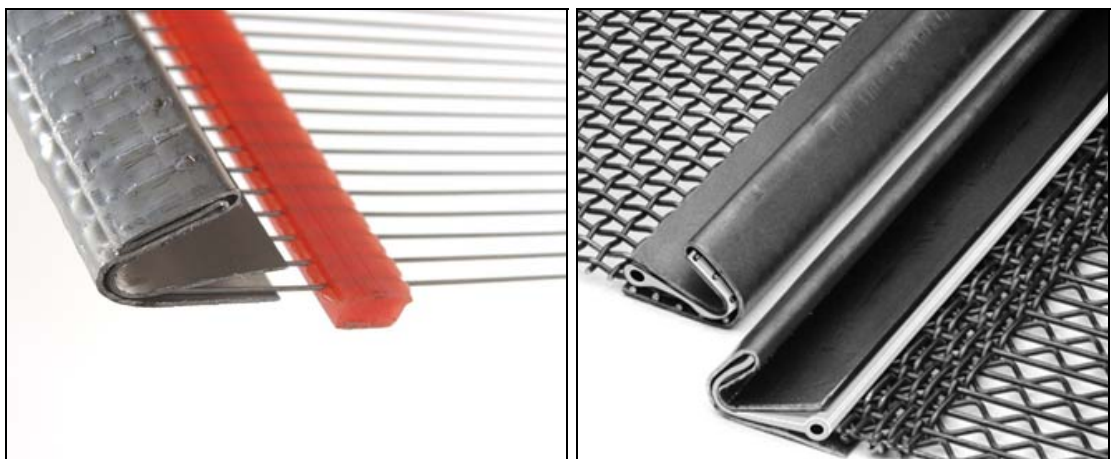
Kuva 2. Yleiskuva tasoseulasta (lähde www.terexfinlay.com).

Moreenin seulonnassa tasoseulan ensimmäiseksi seulaksi voisi parhaiten soveltua sormityyppinen seula, jolla erotetaan kivet aineksesta (kuva 3). Sormiseula on riittävän avoin, jotta hienoaines siirtyy tehokkaammin seuraavalle seulalle ja toisaalta portaittainen eteneminen sormistossa löyhdyttää ja siten erottelee tehokkaammin tiivistä moreenia.



Kuva 3. Sormiseula ensimmäiseen vaiheeseen seulana.

Varsinaiseen hienoaineksen erottamiseen moreenista parhaiten toimivaksi on arvioitu tankoseula, jonka pitkänomaiset raot vähentävät seulan tukkeutumista. Hienommissa tankoseuloissa käytetään itsekantavien tankojen asemasta pianolankoja, joilla voidaan toteuttaa tiheitä seuloja (kuva 4). Toinen vaihtoehto tavanomaiselle verkkoseulalle on yhdistelmäverkko (kuvassa 4 oikealla), jossa on vinoneliöverkon lisäksi pianolankatyypinen osa. Eri lankapaksuuksista, lankojen suunnista ja jännityksistä johtuen seula ei tukkeudu helposti, kun se muodostaa täytettäessä eri joustavan ja eri taajuuksilla värähtelevän seulatason.



Kuva 4. Esimerkit tiheistä pianolanka- ja verkkoseulamateriaaleista (lähde: www.sovatec.it).

Tähtiseula ja seulakauhat

Seulayksikköön voi sisältyä myös tähtiseula, jossa seulaverkon sijasta seulalaatikon pohja muodostuu rinnakkaisissa akseleissa limittäin pyörivistä teristä (kuva 5). Terät liikuttavat seulottavaa materiaalia ja niiden väleistä seulottu aines putoaa

kuljettimelle tai seuraavalle seulalle. Terien kokoa ja välystä muuttamalla säädetään seulottavan aineksen raekokoa.

Tähtiseula voisi soveltua moreenin seulontaan, koska seula ei tukkeennu helposti. Toisaalta isokokoinen kiviaines on poistettava aineksesta ennen seulontaa, jotta terät eivät vahingoitu tai kulu tarpeettoman nopeasti.



Kuva 5. Esimerkki tähtiseulasta (lähde: www.remu.fi).

Tähtiseulan periaatteella toimii myös ns. seulakauha, joka voidaan asentaa suoraan kaivinkoneeseen (kuva 6). Seulonta tapahtuu kauhallinen kerrallaan siten, että karkea aines jää seulaan ja voidaan tyhjentää erilliseen kasaan. Seulan terillä säädetään tuotoksen raekokoa. Seulakauhoja käytetään myös pintamaiden käsittelyssä ja siinä olevien ainesten murskauksessa.

Seulakauhaa voidaan käyttää myös kivien poistamiseen moreenipohjamaasta ja toisaalta sekoittamaan moreeniainekseen muuta ainesta, jotta saataisiin käyttötarkoitukseen soveltuvaa jalostettua ainesta. Seulakauhan avulla tehty sekoitus olisi tasalaatuisempaa kuin pelkällä kaivinkoneen kauhalla työkohteessa tehty maainesten sekoitus.



Kuva 6. Esimerkit seulakauhoista (lähteet: www.allu.net ja www.hytco.fi)



Kuva 7. Karatyyppinen seulakauha (lähde: www.backers.de).

Muu seulonta

Rumpuseula (kuva 8) soveltuisi periaatteessa moreenin seuloon, koska rumpun pyöriä liike rikkoo tiiviin moreenin sisältämiä hienoainekappaleita, jolloin saataisiin suurempi osa hienoaineksesta erotettua pois. Rumpuseulan käyttö edellyttää kuitenkin kivien esiseulontaa, koska seulontarumpu ei kestä suuria kiviä ja kivet lisäävät seulan kulumista. Rumpuseulat on lähtökohtaisesti tarkoitettu kevyempien maa-ainesten seuloon.



Kuva 8. Rumpuseula (lähde: www.terexfinlay.com)

Hienoaineksen tarkka ja kattava erottaminen maa-aineksesta edellyttää vesiseulontaa, jota Suomessa tehdään erittäin vähän jo olosuhdesyistä. Moreenin vesiseulontaa ei pidetä tarkoituksenmukaisena eikä kilpailukykyisenä Suomessa.

Vesiseulonnassa hienoaine pestään pois maa-aineksesta ja prosessin tuloksena hienoin aine muodostaa lietteen, joka on johdettava saostusaltaaseen tai liete on muuten poistettava vedestä (kuva 9). Saostusaltaan toteutus vaatii tilaa ja sopivan toimintaympäristön. Saostusaltaan vaihtoehdoksi vesiseulontalaitteiden toimittajilla on tuoteratkaisuja lietteen jatkuvaan erottamiseen.



Kuva 9. Vesiseulontayksikkö (vas.) ja poistoveden lietteen erotuskalustoa (lähde: www.terexfinlay.com).

Murskaus

Yksi moreenin jalostusmenetelmä on sen murskaus vastaavalla tavalla kuin soraa murskataan, jolloin murskaimen läpi menee kivien lisäksi muu maa-aines (kuva 10). Maa-aineksen läpikuljettaminen vähentää murskaimen tuotosta ja siten nostaa kustannuksia. Moreenin murskauksesta saattaa aiheutua myös murskaimen tukkeutumisongelmia riippuen maa-aineksen kosteudesta.



Kuva 10. Soran murskausta (lähde: Metso Minerals).

Maa-ainesten sekoitus

Moreenia voidaan jalostaa myös lisäämällä siihen muuta, yleensä karkeampaa, ainesta. Lisätty aine tulee sekoitettua moreenin kanssa ja tämä voidaan periaatteessa tehdä työkohteessa kaivinkoneen kauhalla. Tuloksesta saadaan tasaisempi, jos sekoituksessa voidaan käyttää esim. seulakauhaa, mutta sen soveltuvuuteen vaikuttaa moreenin rakeisuus sekä onko moreeni esiseulottu tai onko moreenin irrotus perusmaasta tehokkaampaa tavanomaisella kuokkakauhalla.

Yksi mahdollisuus sekoituksessa voisi olla maamassojen stabilointiin tarkoitetun sekoitusyksikön käyttö (kuva 11). Kaivinkoneeseen liitetyn sekoittimen kestävyys ja soveltuvuus tähän tarkoitukseen tulee kuitenkin arvioida erikseen. Myös yksikön rakenne tulisi sovittaa työskentelyyn pintamaan kanssa, jossa ei tarvita yhtä pitkää puomia kuin syvästabiloinnissa eikä sideaineen syöttöä.

Suuren maamassojen sekoittamiseen soveltuva menetelmä voisi olla maa-ainesten sekoittaminen aumassa tähän tarkoitettuun auman kääntäjällä (kuva 11). Pääasiassa kompostiaumojen kääntämiseen tarkoitettujen aumankääntäjien kapasiteetti raskaampien maa-aineiden käsittelyyn on kuitenkin varmistettava.



Kuva 11. Stabilointiin tarkoitettu sekoitinyksikkö (vas.) ja aumankääntäjä (lähde: www.allu.net).

LIITE 6. Vertailurakenteiden kustannusvertailu

Suorite	Kustannus €/yks	yksikkö	Tierakennevaihtoehdot										
			A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	A.6	B.1	B.2	B.3	B.4	C
AB, paksuus 50 mm	7.80	m ²	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
päällysteen kuljetusmatka		km	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
kantavan kerros KaM 0...32	31.20	rtrm3	166	166	166	166	166	166	166	166	166	166	166
kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Jakavakerros KaM 0...65 (tai 0...60)	28.60	rtrm3	272	272	272	272	272	272					272
Jakava, kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15					15
Jakava kerros, lievästi routiva moreeni	6.00	rtrm3							498	498	498	498	
Suodatikerros, Hk	24.00	rtrm3	404	404	404	404	404	404	208	208	208	208	404
Suodatikerros kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Jakavan kerroksen moreeni jalos- taminen, kivien seulonta paikalla	4.00	m ³							498	498	498	498	
Pohjan homogenisointi kivien poisto noin 1 metrin syvyyteen	2.60	m ³		1250	1250	1250	1250	1250					
Homogenisoidun pinnan tiivistäminen	0.50	m ²		1250	1250	1250	1250	1250					
Karkean materiaalin lisäys + sekoittaminen pohjamoreeniin (lisäys 8%)	4.00	m ³			100								
Karkean materiaalin lisäys + sekoittaminen pohjamoreeniin (lisäys 8%)	17.50	m ³				100							
kuljetusmatka		km				10							
Sementti YSE (4 %)	0.13	kg					75000				45000		
Masuunihiekka (4%)	0.04	kg						75000					
sideaineen kuljetusmatka		km					30	60			30		
HDPE 1 mm muovikalvo	5.00	m ²								1220			
Kuitukangas (paino 1200g/m ²)	5.20	m ²								2440			
sideaineen sekoittaminen jakavaan kerrokseen Allu tms. sekoitusjyr- sin	2.00	m ³									500		
Teräsverkko B500H-5/6-200/150 jakavan ja kantavan väliin + asennus	4.80	m ²										950	
Salaojaputki, halkaisija 100 mm	4.00	jm											200
Salaojakaiivot 40 m välein, korkeus noin 1000mm	330.00	kpl											5
Salaojasora putken ympärillä	50.00	rtrm3											100
	YHT (eur):		28,114	31,989	32,389	33,739	41,739	34,989	20,611	39,399	27,461	25,171	35,564
Kuljetuskustannusten osuus	YHT (eur)		4,682	4,682	4,682	5,223	5,051	5,354	2,309	2,309	2,533	2,309	4,723

 Homogenisointi lisämaksu **3,875.0**

	Kustannus	yksikkö	Kevytliikenne			Piharakenne		
			E.1	E.2	E.3	D.1	D.2	D.3
AB, paksuus 50 mm	7.80	m ²	300	300	300	1000	1000	1000
päällysteen kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15
kantavan kerroksen KaM 0...32	31.20	rtrm3	53	53	53	250	250	250
kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15
Jakavakerros KaM 0...65 (tai 0...60)	28.60	rtrm3	132			300		
Jakava, kuljetusmatka		km	15			15		
Jakava kerros, lievästi routiva moreeni	6.00	rtrm3		215	215		400	400
Suodatikerros, Hk	24.00	rtrm3	136	240	240	300	400	400
Suodatikerros, kuljetusmatka		km	15	15	15	15	15	15
Jakavan kerroksen moreeni jalostaminen, kivien seulonta paikalla	4.00	m ³		215	215		400	400
Pohjan täyttömaa routimaton täyttömaa	12.30	rtrm3	1040			1000		
Täyttömaa kuljetusmatka		km	15			15		
Pohjan täyttömaa lievästi routiva moreeni paikalta	4.00	rtrm3		1040	1040		1000	1000
Täyttömaan moreenin jalostaminen, kivien seulonta paikalla	2.00	m ³		1040	1040		1000	1000
Teräsverkko B500H-5/6-200/150 jakavan ja kantavan väliin + asennus	4.80	m ²			410			1000
	YHT (eur):		24,096	18,412	20,380	44,948	36,468	41,268
Kuljetuskustannusten osuus yhteensä (eur):			7,128	1,632	1,632	9,947	3,785	3,785