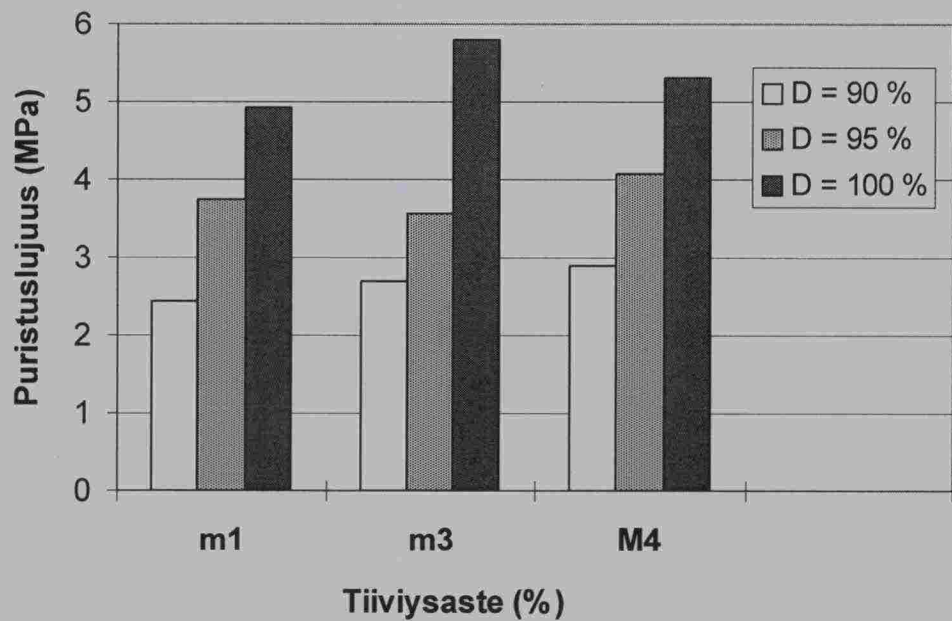


Tielaitos

Kirsi Ylpiessa

Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3

Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen



Tielaitoksen
selvityksiä

25/1998

Oulu 1998

TUOTANTO
Konsultointi

Tielaitoksen selvityksiä
25/1998

Kirsi Ylipiessa

Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3

**Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen
vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen**

Tielaitos
TUOTANTO, konsultointi

Oulu 1998

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-439-9
TIEL 3200516
Oy Edita Ab
Helsinki 1998

Julkaisun myynti:
Tielaitos, kirjasto
Telefax 0204 44 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi



Tielaitos
TUOTANTO
Opastinsilta 12 B
PL 157
00521 HELSINKI
Puh. vaihde 0204 44 150

Konsultointi
Oulun kehitysyksikkö
Vanhantullinkatu 2
PL 261
90101 OULU
Puh. vaihde 0204 44 158

YLIPIESSA, Kirsi: Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3. Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. Oulu 1998, Tielaitos, Konsultointi, Oulun kehitysyksikkö, Tielaitoksen selvityksiä 25/1998, ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-439-9, TIEL 3200516, 22 s. + liitt.

Aiheluokka 32, 53

Asiasanat: tierakenne, rakennekerrokset, sementtistabilointi

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin laboratoriotutkimuksin koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutusta sementillä sidotun materiaalin yksiaksiaaliseen puristuslujuuteen. Kokeet suoritettiin kolmella rakeisuudeltaan erilaisella materiaalilla. Yksi materiaaleista oli rakeisuudeltaan Sementtistabilointiohjeen / 2/ mukaisella ohjealueella. Toiset kaksi materiaalia olivat rakeisuudeltaan ohjealueen ylä- ja alapuolella. Sideainepitoisuudet valittiin ennakkokokeiden perusteella sellaisiksi, että ohjeen / 2/ mukaisesti valmistettujen koekappaleiden 7 vuorokauden puristuslujuus oli 5 MPa. Muuttujina tutkimuksessa olivat koekappaleiden tiivistystapa, tiivysaste, h/d-suhde sekä lujittumisen aikainen lämpötila ja kosteus.

Ohjeen / 2/ mukaisella ja sitä hienorakeisemmalla materiaalilla tiivistystavalla ei ollut suurta vaikutusta lujuuteen. Ohjealuetta karkearakeisemmalla materiaalilla kiertotiivistämällä saavutettiin selvästi käsintiivistystä suuremmat lujuudet.

Puristuslujuus kasvoi tiivysasteen kasvaessa kaikilla materiaaleilla lähes lineaarisesti siten, että lujuus tiivysasteessa 90 % oli noin puolet tiivysasteessa 100 % saavutetusta lujuudesta.

Koekappaleiden puristuslujuus heikkeni h/d-suhteen kasvaessa. Tuloksista lasketut korjauskertoimet poikkesivat ohjeen / 2/ mukaisista käytössä olevista kertoimista huomattavasti.

Alhainen lujittumislämpötila heikensi puristuslujuutta. Pääasiassa lujuudet kasvoivat lujittumislämpötilan noustessa. Poikkeuksena oli hienorakeinen materiaali, jolla puristuslujuuden kehitys eri lämpötiloissa oli riippuvainen myös tiivysasteesta.

Lujittumisen aikainen vedensaanti alensi puristuslujuutta ilmeisesti, koska veden ylimäärä näytteen huokosissa haittaa sidosten syntymistä runkoaiheen rakeiden välille. Lujuuskehityksen varmistamiseksi olisi veden pääsy stabiloituun kerrokseen estettävä.

Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3. Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. [Quality control of hydraulically bound materials, part 3. The effect of making and curing of specimens on the strength of cement bound material.], Oulu 1998, Tielaitos, Konsultointi, Oulun kehitysyksikkö, Tielaitoksen selvityksiä 25/1998, ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-439-9, TIEL 3200516, 22 s. + app.

Key words: road structure, structure layer, cement stabilization

ABSTRACT

This study investigated the effect of making and curing of specimens on the direct axial compressive strength of cement bound materials. Laboratory tests were used. The tests were done using three materials with different gradation. One of the materials were within the guide limits of the cement stabilization codes / 2/. The gradation of other two materials were below and above the guide limits. Binding agent contents were chosen according to pre-tests to produce a 7-day compressive strength of 5 MPa. Variables in the research were the compaction method of the specimens, degree of density, h/d-ratio and temperature and moisture conditions during the strengthening.

When the material was within the limits of the codes / 2/ or the amount of fines in it was bigger than that, the method of compaction had no significant effect on strength. For the material that was more coarse-grained than the guide limits recommended, greater strength values were obtained using gyratory shear compaction than manual compaction.

For all materials, compressive strength increased almost linearly when the degree of density increased so that strength in the degree of density of 90 % was approx. half of strength in the degree of density of 100 %.

Compressive strength of the specimens weakened as the h/d-ratio increased. Correction coefficients calculated from the results differed greatly from the coefficients according to the code / 2/.

Low strength temperature decreased compressive strength. The strength values mainly increased when the strength temperature increased. An exception to this was the fine grained material for which the development of compressive strength in different temperatures depended also on the degree of density.

Water supply during the strengthening decreased compressive strength, apparently because the excess water in sample pores hinders the formation of bonds between the grains in the aggregate. To insure the development of strength the water flow should be prevented.

ALKUSANAT

Oulun kehitysyksikkö käynnisti hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistusta käsittelevän tutkimuksen osana kerrosrakenteiden laadunvarmistuksen kehittämistä vuonna 1996.

Tutkimus aloitettiin sementillä sidottujen materiaalien jäätymsulamisikäkäyttämistä koskevalla tutkimuksella. Syynä tutkimuksen aloittamiseen olivat tielaitoksen sementtistabilointiohjeissa todetut puutteet. Ohjeistosta puuttuu mm. laadunvarmistusohjeet siitä, miten tierakenteen jäätymsulamisilmiöstä aiheutuvat hydraulisesti sidottujen kerrosten vaurioitumisriskit tulisi ehkäistä. Lisäksi ohjeistosta puuttuu kokonaan heikkolaatuaisille materiaaleille tarkoitetut laatuksiteerit, joiden tarve korostuu entisestään sidottujen rakenteiden ja heikkolaatuisten materiaalien käytön lisääntyessä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten toistuvat jäätymsulamissyklit vaikuttavat eri tyyppisten sementillä sidottujen materiaalien routakestävyyteen, lujuuteen ja muodonmuutosominaisuuksiin sekä sidotun kantavan kerroksen pitkäaikaikäkäyttämiseen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää laboratorioolosuhteissa tehtävien koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen merkitys sementillä sidotun materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Tutkimuksen tuloksena laaditaan suosituksia sementillä sidottujen materiaalien jäätymsulamisikäkäyttämisen laatuksiteereistä sekä niiden edellyttämistä laboratoriotutkimuksista ja laadunvalvonnasta.

Tutkimuksen on tilannut tielaitoksen tie- ja liikennetekniikan yksikkö (Htl) ja rahoittanut tielaitos ja Finnsementti Oy. Tutkimus on tehty diplomityönä Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Tehdyn diplomityön aineistosta on laadittu kolme erillistä raporttia, jotka on julkaistu tielaitoksen julkaisusarjassa. Raportit on kirjoittanut diplomityöntekijä tekn. yo Kirsi Ylpiessä. Nyt käsilläoleva raportti on julkaisusarjan kolmas osa, jossa käsitellään koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutusta sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. Muut osaraportit ovat:

- Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys
- Sementillä sidottujen materiaalien jäätymsulamiskestävyys

Työn ohjauksesta ja valvonnasta on vastannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet TkT Kauko Kujala Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa, DI Kurt Lundström Finnsementti Oy:stä sekä DI Seppo Salmenkaita ja Ins. Heikki Vesa tielaitoksen konsultoinnin Oulun kehitysyksiköstä.

Oulussa kesäkuussa 1998

Konsultointi

Oulun kehitysyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 TUTKIMUSMATERIAALIT	10
2.1 Runkoaineet	10
2.2 Sideaine	10
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	11
3.1 Ennakkokokeet	11
3.2 Koekappaleiden valmistus	12
4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	14
4.1 Tiivistystavan vaikutus	14
4.2 Tiiviiden vaikutus	14
4.3 H/d-suhteen vaikutus	15
4.4 Lujittumisen aikaisen lämpötilan vaikutus	16
4.5 Lujittumisen aikaisen kosteustilan vaikutus	18
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	20
6 KIRJALLISUUS	21
7 LIITTEET	22

1 JOHDANTO

Tienpidon painopisteen siirtyessä yhä enemmän tieverkon kunnan ylläpitoon, korostuu tiessä olevien materiaalien uudelleenkäyttö yhdessä paikallisten materiaalien kanssa. Myös kestävän kehityksen periaatteet ohjaavat materiaalien käyttöä. Perinteisten hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttö vähenee, niiden käytölle asetetaan rajoituksia ja samalla niiden saatavuus vaikeutuu. Korvaavien, nykyiset laatukriteerit alittavien, materiaalien käyttö tulee tästä syystä lisääntymään. Merkittäväksi vaihtoehdoksi materiaalien hankinnassa tulee rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä saatavien materiaalien käyttö. Laadun parantamiseksi materiaali joudutaan usein käsittelemään joko mekaanisesti tai sitomalla se jonkin sideaineen avulla.

Uusien materiaalien käyttö edellyttää ajantasalla olevia laatukriteerejä ja niihin liittyviä tutkimusmenetelmiä. Sidotun rakennekerroksen suunnittelussa ei riitä nykyisin Suomessa käytettävä yksinomaan puristuslujuuteen perustuva mitoituskriteeri, vaan huomioon on otettava myös ilmasto-olosuhteiden aiheuttamat rasitustekijät.

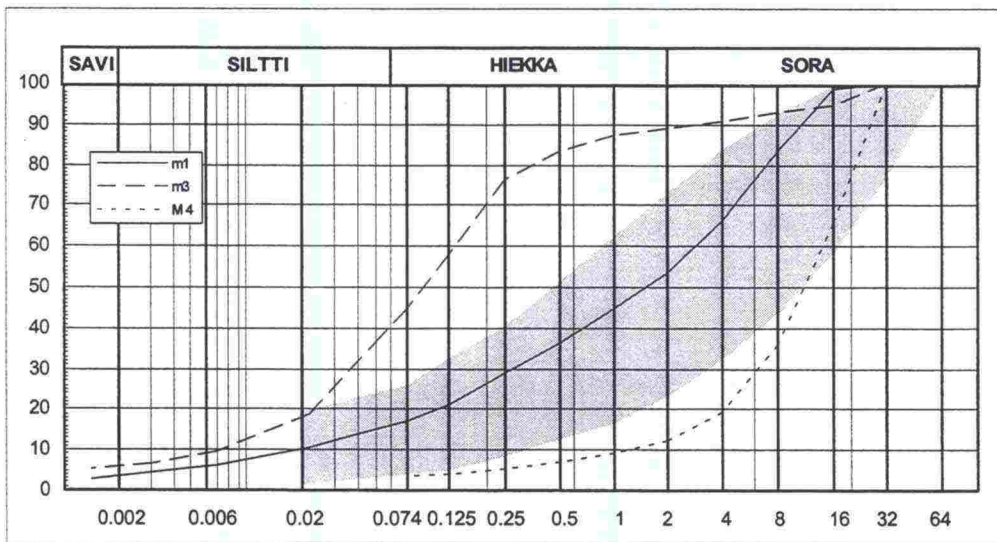
Suomen ilmasto-olosuhteissa materiaalit altistuvat tierakenteessa vuosittain toistuville jäätymissulamissykleille. Jäätymissulamiskokeita on käytetty viime vuosina ainoastaan muutamissa tutkimuksissa ja materiaaleina tällöin ovat olleet pääasiassa morenimurskeet. Jäätymissulamiskokeiden ensisijaisena tarkoituksena on ollut selvittää hydraulisilla sideaineilla sidotun rakenteen kykyä vastustaa rapautumista. Pakkasrasituksen todellista vaikutusta tierakenteessa määritykset kuvaavat enintään tyydyttävästi. Koestusmenetelmiä ja olosuhteita tulisi kehittää myös siten, että ne kuvaisivat lujittumisen aikaisen olosuhdetekijöiden, kuten esim. lämpötilavaihtelujen vaikutusta varhaislujuuteen sekä rakenteen pitkäaikaista lujuus- ja muodonmuutoskäyttäytymistä. Kokeiden tulisi olla sekä pakkasrasituksen laadullisia vaikutuksia kuvaavia helposti suoritettavia nopeita indeksikokeita että ilmiön kvantitatiivista vaikutusta arvioivia nopeutettuja mallikokeita.

2 TUTKIMUSMATERIAALIT

2.1 Runkoaineet

Tutkimuksessa käytettiin kolmea erityyppistä runkoainetta: moreenimursketta (MrM) Pihtiputaan Lahdenpohjasta, silttistä hiekkamoreenia (siHkMr) Pulkkilan Uljuasta ja kalliomursketta (KaM) Sievin Korianmäeltä. Runkoaineet olivat samat kuin tämän tutkimuksen osassa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys / 3/ käytetyt runkoaineet m1 (MrM), m3 (siHkMr) ja M4 (KaM). Materiaalit valittiin ko. tutkimuksessa / 3/ suoritettujen kokeiden perusteella.

Tutkimusmateriaalien rakeisuuskäyrät on esitetty alla (Kuva 1). Tielaitoksen Sementtistabilointiohjeen / 2/ mukainen rakeisuusohjealue on esitetty kuvassa harmaalla. Muut materiaaleille määritetyt luokitusominaisuudet on esitetty em. selvityksessä / 3/.



Kuva 1: Tutkimusmateriaalien m1, m3 ja M4 rakeisuuskäyrät.

Moreenin m1 rakeisuuskäyrä noudattaa Sementtistabilointiohjeen / 2/ maabetonin kiviaineksen ohjealuetta. Moreenin m3 rakeisuuskäyrä kulkee ohjealueen yläpuolella ja murskeen M4 rakeisuuskäyrä roikkuu ohjealueen alapuolella.

2.2 Sideaine

Sideaineena oli Finnsementti Oy:n yleissementti CEM II A 42,5.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Ennakkokokeet

Sideainepitoisuudet määritettiin Sementillä sidottujen materiaalien jäätymsulamiskestävyys -tutkimuksen / 3/ yhteydessä. Määrytykset suoritettiin Sementtistabilointiohjeen / 2/ mukaisesti siten, että ko. sideainepitoisuudella saavutettu puristuslujuus oli 5 MPa 7 vuorokauden ikäisenä. Materiaali M4 oli kuitenkin niin karkeaa, ettei ohjeen / 2/ mukaista optimivesipitoisuutta pystytty määrittämään, joten sen ennakkokokeissa varioitiin sementtipitoisuuden lisäksi myös vesipitoisuutta.

Massojen sideainemäärä laskettiin runkoaineen kuivapainosta. Vesipitoisuus laskettiin runkoaineen ja sementin yhteisestä kuivapainosta ja se oli sama kuin puhtaan runkoaineen optimivesipitoisuus. Materiaalilla M4 ei optimivesipitoisuutta pystytty määrittämään, joten em. tutkimuksessa / 3/ oli päädytty käyttämään kalliomurskeille vesipitoisuutta 4,5 %. Tätä vesipitoisuutta ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa voitu käyttää, koska kiertotiivistimellä tiivistettäessä vesi norui ulos näytteestä. Jäätymsulamiskestävyys -tutkimuksessa / 3/ koekappaleet valmistettiin käsin muottiin, joka oli IC-sylinteriä tiiviimpi, ja näinollen vesi pysyi muotissa vaikka se ei ollutkaan kokonaisuudessaan sitoutunut massaan.

Ennakkokokeissa käytetty tiiviysaste oli 100 %, joka laskettiin runkoaineen maksimikuivatilavuuspainosta. Koekappaleet tiivistettiin kiertotiivistimellä (ICT) halkaisijaltaan 100 mm (m1 ja m3) ja 150 mm (M4) muottiin. Koekappaleiden h/d-suhde ennakkokokeissa oli 1. Maksimirakoko materiaaleilla m1 ja m3 oli 16 mm ja materiaalilla M4 32 mm. Puristusnopeutena yksiaksiaalissa puristuskokeessa oli 2,5 kN/s.

Ennakkokokeiden perusteella tutkimukseen valittiin massat, joiden yksiaksiaalinen puristuslujuus 7 vuorokauden iässä oli 5 MPa. Tutkittavien massojen sideaine- ja vesipitoisuudet sekä runkoaineiden maksimikuivatilavuuspainot on esitetty alla (Taulukko 1). Materiaalin M4 vesipitoisuus aproksimoitiin ennakkokokeiden tulosten perusteella kohdasta, jossa materiaalin puristuslujuus sideainepitoisuudella 3,0 % oli 5 MPa. Suoritetut ennakkokokeet ja niiden tulokset on esitetty tarkemmin selvityksessä / 3/.

Taulukko 1: Ennakkokokeiden perusteella tutkimukseen valitut massat (yksiaksiaalinen puristuslujuus 7 vuorokauden iässä 5 MPa).

Runkoaine	Sideaine (%)	Vesipitoisuus (%)	Maksimikuivatilavuuspaino (kN/m ³)
m1	2,5	6,1	21,88
m3	7,0	7,8	19,65
M4	3,0	3,6	20,70

3.2 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleet valmistettiin ennakkokokeiden mukaisista vähintään kahdella rinnakkaisnäytteellä. Pääasiassa koekappaleiden valmistus tapahtui IC-testerillä ($d = 100$ mm tai 150 mm). Käsin tiivistettävät kappaleet tiivistettiin viidessä samanvahvuudessa kerroksessa. Koekappaleiden tiivyyttä, korkeus/halkaisija-suhdetta (h/d -suhde), tiivistysmenetelmää ja lujittumisen aikaisia olosuhteita varioitiin materiaaleilla m1 ja m3 taulukon 2 mukaisesti ja materiaalilla M4 taulukon 3 mukaisesti. Eri lämpötiloissa lujittuvilla koekappaleilla kenttäolosuhteita pyrittiin simuloimaan siten, että koekappaleet valmistettiin ko. lämpötilassa olevista materiaaleista niin, että vain tiivistysvaihe suoritettiin huoneenlämpötilassa. Välittömästi tiivistyksen jälkeen koekappaleet siirrettiin lujittumaan ko. lämpötilaan. Lujittumisaika oli 7 vuorokautta.

Taulukko 2: Koekappaleiden valmistusta ja lujittumisen aikaisia olosuhteita kuvaava matriisi materiaaleille m1 ja m3 ($d = 100$ mm).

Lujittumisen aikainen kosteustila	Lujittumisen aikainen lämpötila T (°C)	h/d-suhde		
		Tiiviyssaste D = 90 %	Tiiviyssaste D = 95 %	Tiiviyssaste D = 100 %
Ilman suht. kosteus > 95 %	5	1,2 ^{**}	1,2	1,2 ^{**}
	12	1,2 ^{**}	1,2	1,2 ^{**}
	22	1,2	1,0 & 1,2* & 1,6	1,2
Ilman suht. kosteus > 95 % + kapillaarinen veden-saanti	22		1,2	
Ilman suht. kosteus > 95 % (6 vrk) + veteen upotettuna (1 vrk)	22		1,2	

* h/d-suhteella 1,2 valmistettiin koekappaleet myös käsin tiivistämällä

** vain materiaalista m3

Taulukko 3: Koekappaleiden valmistusta ja lujittumisen aikaisia olosuhteita kuvaava matriisi materiaalille M4 ($d = 150$ mm).

Lujittumisen aikainen kosteustila	Lujittumisen aikainen lämpötila T (°C)	h/d-suhde		
		Tiiviyssaste D = 90 %	Tiiviyssaste D = 95 %	Tiiviyssaste D = 100 %
Ilman suht. kosteus > 95 %	5		1,0	
	12		1,0	
	22	1,0	1,0* & 1,2	1,0
Ilman suht. kosteus > 95 % + kapillaarinen veden-saanti	22		1,0	
Ilman suht. kosteus > 95 % (6 vrk) + vesiupotus (1 vrk)	22		1,0	

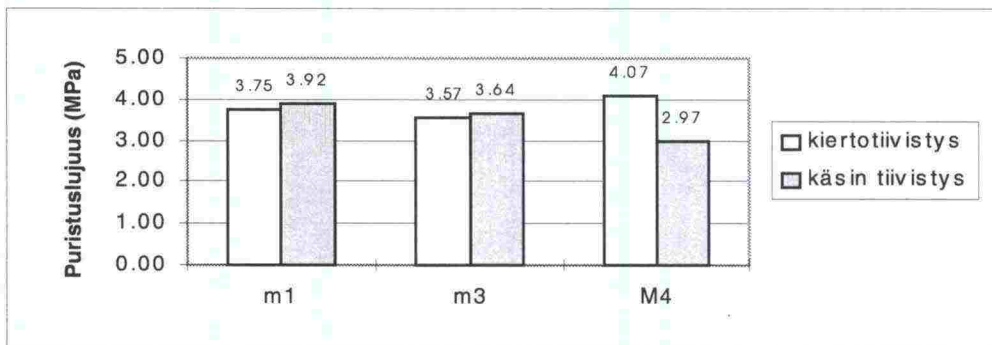
* h/d-suhteella 1,2 valmistettiin koekappaleet myös käsin tiivistämällä

Ennen koestamista murskekappaleiden päät tasattiin ohuella pikatasoitekerroksella. Moreenikappaleiden päät olivat niin sileät, ettei tasoitus ollut tarpeen. Niillä puristusvoima jaettiin tasaisesti asettamalla koekappaleiden molempiin päihin kovalevystä leikatut kappaleet, jotka peittivät koko poikkileikkausalan. Koekappaleet puristettiin Oulun yliopiston rakennetekniikan laboratoriossa ja tielaitoksen Oulun tiepiirin laboratoriossa nopeudella 2,5 kN/s. Koestuksen jälkeen eri kosteustiloissa säilytetyistä koekappaleista määritettiin vesipitoisuudet (vähintään 2 rinnakkaismääritystä).

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

4.1 Tiivistystavan vaikutus

Puristettujen koekappaleiden h/d-suhde oli materiaaleilla m1 ja m3 1,2 ja materiaalilla M4 1,0. Tiiviyssaste oli 95 % runkoaineen parannetusta Proctor-tiiviydestä. Yksiakiaalisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 2. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.



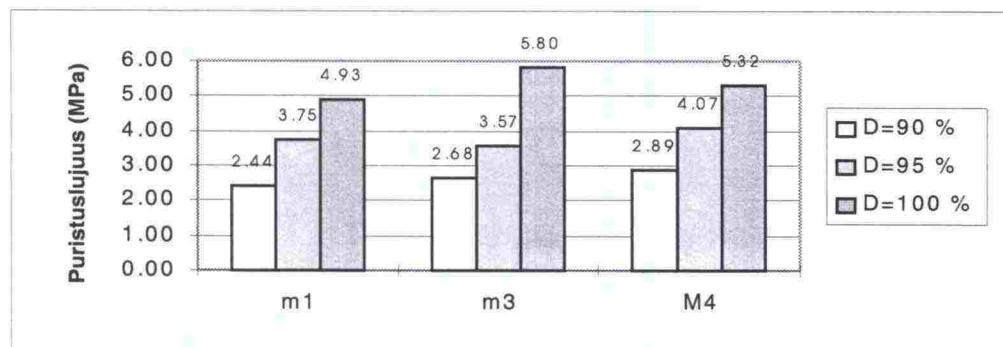
Kuva 2: Kiertotiivistimellä ja käsintivistettyjen koekappaleiden yksiakiaaliset puristuslujuudet.

Moreeneilla eri tiivistysmenetelmien välillä ei koekappaleiden lujuuksissa ollut juurikaan eroa. Niillä käsintivistettyjen koekappaleiden lujuus oli vain hieman kiertotiivistimellä tiivistettyjen koekappaleiden lujuutta suurempi. Materiaalilla M4 tulos oli päinvastainen ja kiertotiivistimellä tiivistettyjen koekappaleiden lujuus oli noin 1,4-kertainen käsintivistettyjen koekappaleiden lujuuteen verrattuna. Eräs syy eroihin voi olla runkoaineen lajittuminen käsintivistetyssä iskutiivistyksessä. Tulokset vaihtelivat 2,0...28,9 % keskiarvon molemmin puolin. Suurin vaihtelu oli materiaalin m3 kiertotiivistimellä tiivistetyillä koekappaleilla ja pienin materiaalin m1 käsintivistetyillä koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista.

4.2 Tiiviyden vaikutus

Puristettujen koekappaleiden h/d-suhde oli materiaaleilla m1 ja m3 1,2 ja materiaalilla M4 1,0. Tiiviyssasteet olivat 90, 95 ja 100 % runkoaineen parannetusta Proctor-tiiviydestä. Yksiakiaalisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 3. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.

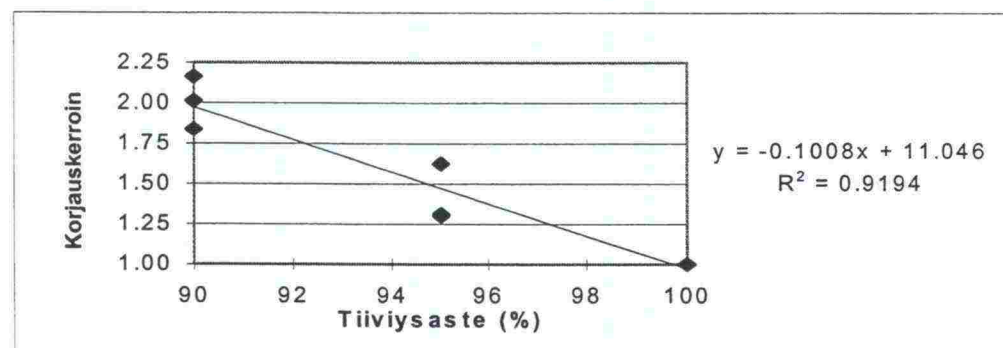
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU



Kuva 3: Koekappaleiden yksiakiaaliset puristuslujuudet tiiviyksasteen funktiona.

Materiaaleilla m1 ja M4 lujuuden kasvu tiiviyksasteen funktiona oli lähes lineaarista. Molemmilla materiaaleilla tiiviyksasteen kasvattaminen 90 %:sta 100 %:in nosti lujuuden noin kaksinkertaiseksi. Materiaali m3 käyttäytyi muista hieman poikkeavasti. Sillä tiiviyksasteella 95 % saatiin muita materiaaleja suhteellisesti alhaisempi lujuus verrattaessa lujuustuloksia tiiviyksasteessa 100 % saavutettuun lujuuteen. Koekappaleiden puristuslujuudet vaihtelivat 1,0...28,9 % keskiarvon molemmiin puolin. Suurin vaihtelu oli materiaalin m3 95 % tiiviyksasteeseen tiivistetyillä koekappaleilla ja pienin materiaalin m1 100 % tiiviyksasteeseen tiivistetyillä koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista.

Eri tiiviyksasteille määritettiin materiaalikohtaisesti korjauskertoimen vertaamalla tiiviyksasteeseen 100 % tiivistettyjen koekappaleiden keskimääräistä lujuutta ko. tiiviyksasteen keskimääräiseen puristuslujuuteen. Tulosten perusteella (9 pistettä) laskettiin korjauskertoimen ja tiiviyksasteen välistä riippuvuutta kuvaava lineaarinen yhtälö sekä yhtälön selitysaste (Kuva 4). Korrelaatio-suoran mukaan puristuslujuus tiiviyksasteessa 90 % on noin puolet maksimitiiviyksasteessä saavutetusta lujuudesta.

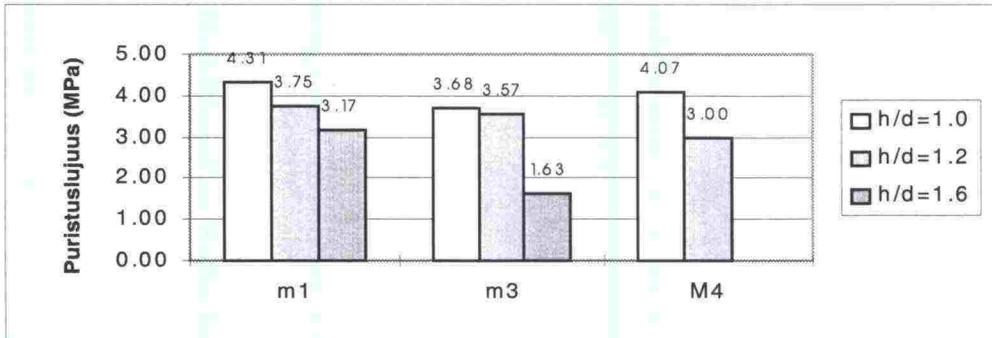


Kuva 4: Puristuslujuuden korjauskertoimen tiiviyksasteen funktiona.

4.3 H/d-suhteen vaikutus

Puristettujen koekappaleiden h/d-suhteet olivat materiaaleilla m1 ja m3 1,0, 1,2 ja 1,6 ja materiaalilla M4 1,0 ja 1,2. Tiiviyksaste oli 95 % runkoaineen pa-

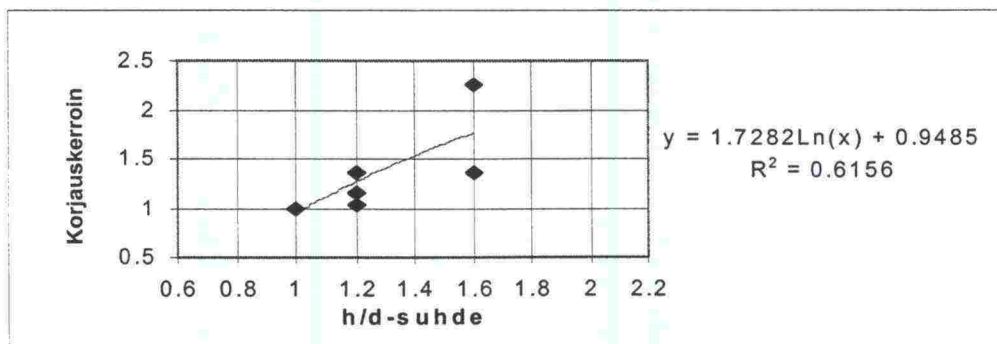
rannetusta Proctor-tiivyydestä. Yksiaksaalisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 5. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.



Kuva 5: Koekappaleiden yksiaksaaliset puristuslujuudet h/d-suhteen funktiona.

Lujuudet alenivat h/d-suhteen kasvaessa. Tulokset vaihtelivat 3,2...38,9 % keskiarvon molemmin puolin. Suurin vaihtelu oli materiaalin m3 h/d-suhteella 1,0 valmistetuilla koekappaleilla ja pienin materiaalin m1 h/d-suhteella 1,6 valmistetuilla koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista.

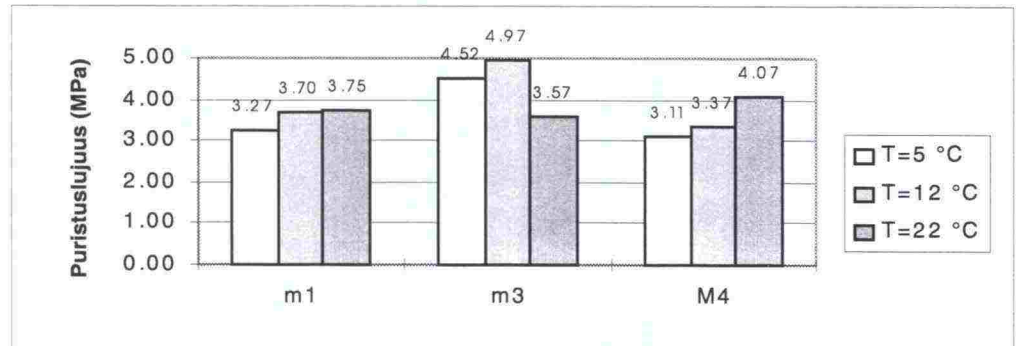
Eri h/d-suhteille määritettiin materiaalikohtaisesti korjauskertoimen vertaamalla h/d-suhteella 1,0 valmistettujen koekappaleiden puristuslujuuden keskiarvoa ko. h/d-suhteen puristuslujuuden keskiarvoon. Saadut korjauskertoimet olivat huomattavasti suurempia kuin Sementtistabilointiohjeen / 2/ mukaiset korjauskertoimet ja näyttäisi siltä, että h/d-suhteella on oletettua suurempi vaikutus puristuslujuuteen. Tulosten perusteella (8 pistettä) laskettiin korjauskertoimen ja h/d-suhteen välistä riippuvuutta kuvaava logaritminen yhtälö sekä yhtälön selitysaste (Kuva 6).



Kuva 6: Puristuslujuuden korjauskertoimen h/d-suhteen funktiona.

4.4 Lujittumisen aikaisen lämpötilan vaikutus

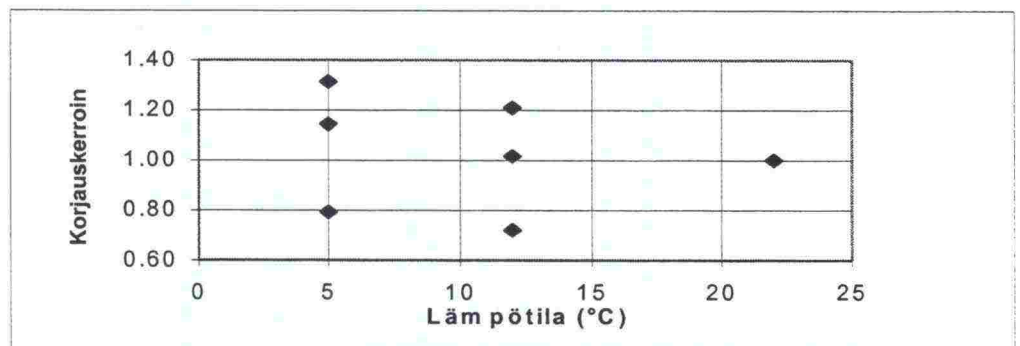
Puristettujen koekappaleiden h/d-suhde oli materiaaleilla m1 ja m3 1,2 ja materiaalilla M4 1,0. Tiivysaste oli 95 % runkoaineen parannetusta Proctor-tiivyydestä. Yksiaksaalisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 7. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.



Kuva 7: Koekappaleiden yksiakseliset puristuslujuudet lämpötilan funktiona.

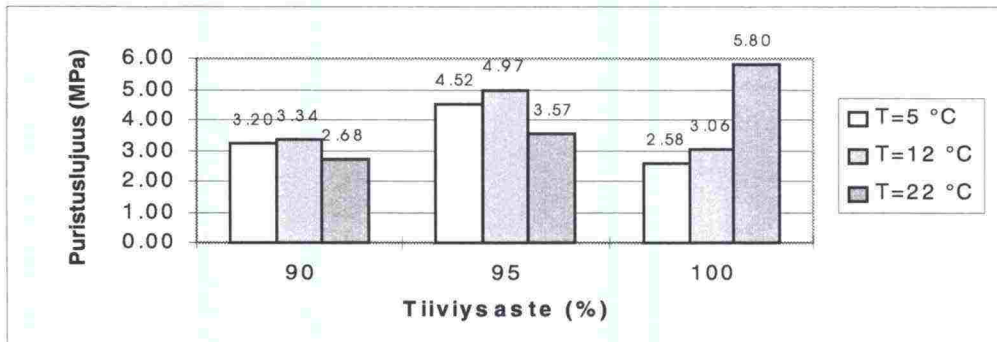
Pääasiassa lujuudet kasvoivat lämpötilan noustessa. Materiaali m3 poikkesi käyttäytymiseltään muista materiaaleista, koska sen lujuus pieneni lämpötilan noustessa 12 °C:sta 22 °C:en. Tulokset vaihtelivat 0,2...28,9 % keskiarvon molemmiin puolin. Suurin vaihtelu oli materiaalin m3 lämpötilassa +22 °C lujittuneilla koekappaleilla ja pienin materiaalin m3 lämpötilassa +5 °C lujittuneilla koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista.

Eri lujittumislämpötiloille määritettiin materiaaliakohtaisesti korjauskerroin vertaamalla lämpötilassa +22 °C lujittuneiden koekappaleiden keskimääräistä puristuslujuustulosta ko. lujittumislämpötilan keskimääräiseen puristuslujuuteen. Tulosten perusteella korjauskertoimen ja lämpötilan välistä riippuvuutta ei voitu määrittää (Kuva 8).



Kuva 8: Puristuslujuuden korjauskerroin lämpötilan funktiona.

Koska tulokset materiaalilla m3 poikkesivat muista ja koska materiaalin m3 puristuslujuuden oli aiemmin havaittu muuta enemmän riippuvan tiiviyssasteesta, määritettiin ko. materiaalilla puristuslujuuden riippuvuus lämpötilasta myös tiiviyssasteilla 90 ja 100 % runkoaineen parannetusta Proctor-tiiviydestä. Koekappaleiden h/d-suhde oli 1,2. Yksiakselisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 9. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.

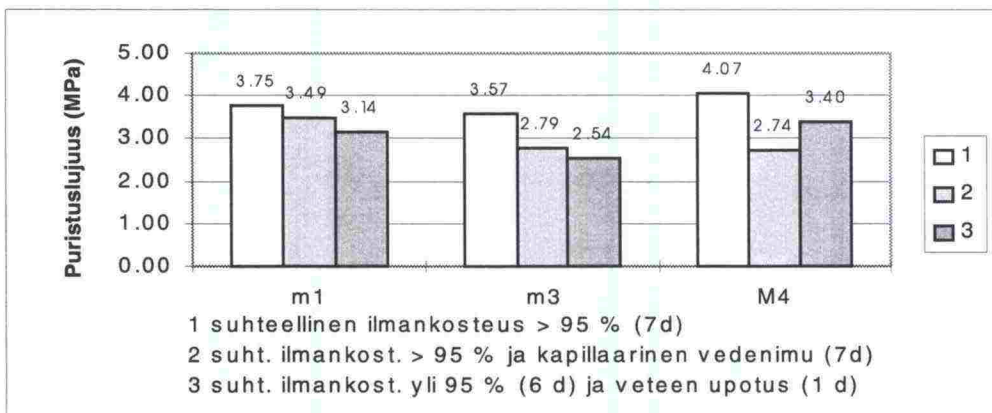


Kuva 9: Koekappaleiden yksiakseliset puristuslujuudet lämpötilan funktiona eri tiiviyysasteissa materiaalilla m3.

Kaikilla tiiviyysasteilla lujuudet kasvoivat lämpötilan noustessa 5 °C:sta 12 °C:en, mutta lämpötilan noustessa 12 °C:sta 22 °C:en lujuus kasvoi vasta tiiviyysasteella 100 %. Tulokset vaihtelivat 0,2...28,9 % keskiarvon molemmin puolin. Suurin vaihtelu oli tiiviyysasteessa 95 % lämpötilassa +22 °C lujittuneilla koekappaleilla ja pienin tiiviyysasteessa 95 % lämpötilassa +5 °C lujittuneilla koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista. Saadut tulokset ovat hyvin ristiriitaisia ja niiden perusteella näyttäisi siltä, että stabiloitaessa runsaasti hienoainesta sisältäviä materiaaleja alhaisissa lämpötiloissa, suurin lujuus saavutettaisiin tiiviyysasteessa noin 95 %. Vasta lämpötilan ollessa noin 20 °C kannattaisi massa tiivistää tiiviyysasteeseen yli 95 % lujuuden kasvattamiseksi.

4.5 Lujittumisen aikaisen kosteustilan vaikutus

Puristettujen koekappaleiden h/d-suhde oli materiaaleilla m1 ja m3 1,2 ja materiaalilla M4 1,0. Tiiviyysaste oli 95 % runkoaineen parannetusta Proctor-tiivyydestä. Yksiakselisen puristuslujuuden keskiarvot on esitetty kuvassa 10. Koekappalekohtaiset lujuudet on esitetty liitteellä 1.



Kuva 10: Koekappaleiden yksiakseliset puristuslujuudet kosteustilan funktiona.

Kaikilla materiaaleilla suurin lujuus saavutettiin kosteusolosuhteissa 1 säilytetyillä koekappaleilla. Sekä kapillaarinen vedensaanti että veteen upotus

TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

heikensivät lujuuksia kaikilla materiaaleilla. Tulokset vaihtelivat 0,0...28,9 % keskiarvon molemmin puolin. Suurin vaihtelu oli materiaalilla m3 kosteusolosuhteissa 1 lujittuneilla koekappaleilla ja pienin materiaalilla M4 kosteusolosuhteissa 3 lujittuneilla koekappaleilla. Suuret vaihtelut johtuivat siitä, että tulokset on laskettu kahdella eri puristimella saavutetuista tuloksista.

Olosuhteissa 1-3 lujittuneista koekappaleista määritettiin puristuskokeen jälkeen vesipitoisuus (Taulukko 4). Kun otetaan huomioon sementin sitoutumiseen kulunut vesimäärä, voidaan koekappaleiden katsoa absorboineen vettä kaikissa tutkituissa kosteusolosuhteissa. Koska materiaalin M4 vesipitoisuus kokeen jälkeen on olosuhteissa 1 ollut lähes sama kuin olosuhteissa 2, voidaan todeta, että ko. materiaalilla kapillaari-ilmiö ei toimi.

Taulukko 4: Kosteusolosuhteissa 1-3 lujittuneiden koekappaleiden vesipitoisuudet valmistushetkellä ja puristuksen jälkeen.

Materiaali	Vesipitoisuus alussa, w_a (%)	Vesipitoisuus lopussa, w_l (%)			$w_l - w_a$ (%) ⁽¹⁾		
		1	2	3	1	2	3
m1	6,1	5,1	6,3	6,9	-1,0	0,2	0,8
m3	7,8	6,9	11,3	12,3	-0,9	3,5	4,5
M4	3,6	2,8	2,7	4,2	-0,8	-0,9	0,6

⁽¹⁾ Sementin sitoutumiseen kuluneen veden määrää voidaan arvioida ohjeen / 1/ mukaan AASHO-luokituksen mukaisilla maalajeilla seuraavasti:

A-1, A-3	1,5 %
A-2	2,5 %
A-4, A-5	3,0 %
A-6, A-7	3,5 %

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Sementtistabiloinnin onnistuminen edellyttää huolellista laadunvarmistusta. Suomessa ennakkokokeena käytetään yksiaksiaalista puristuskoetta, jonka tuloksiin vaikuttavat ratkaisevasti koekappaleen ominaisuudet sekä lujittumisen aikaiset olosuhteet. Jotta tuloksia voitaisiin luotettavasti arvioida, tulee em. tekijöiden vaikutus lujuuteen olla tiedossa.

Kokeet suoritettiin kolmella rakeisuudeltaan erilaisella materiaalilla. Yksi materiaaleista oli rakeisuudeltaan Sementtistabilointiohjeen / 2/ mukaisella ohjealueella. Toiset kaksi materiaalia olivat rakeisuudeltaan ohjealueen ylä- ja alapuolella. Sideainepitoisuudet valittiin ennakkokokeiden perusteella sellaisiksi, että ohjeen / 2/ mukaisesti valmistettujen koekappaleiden 7 vuorokauden puristuslujuus oli 5 MPa. Muuttujina tutkimuksessa olivat koekappaleiden tiivistystapa, tiivysaste, h/d-suhde sekä lujittumisen aikainen lämpötila ja kosteus-tila.

Ohjeen / 2/ mukaisella ja sitä hienorakeisemmalla materiaalilla tiivistystavalla ei ollut suurta vaikutusta lujuuteen. Ohjealuetta karkearakeisemmalla materiaalilla kiertotiivistämällä saavutettiin selvästi käsintiivistystä suuremmat lujuudet.

Tiivysasteen kasvaessa puristuslujuus kasvoi ohjeen / 2/ mukaisella ja ohjetta karkearakeisemmalla materiaalilla lähes lineaarisesti. Myös hienorakeisen materiaalin lujuus kasvoi tiivysasteen kasvaessa, mutta lujuus tiivysasteessa 95 % oli lujuuteen tiivysasteessa 100 % verrattuna suhteessa pienempi kuin muilla materiaaleilla. Tulosten perusteella puristuslujuudelle tiivysasteen funktiona sovitetun lineaarisen korjauskäyrän selitysaste oli kohtalainen. Korjauskäyrän mukaan lujuus tiivysasteessa 90 % oli noin puolet tiivysasteessa 100 % saavutetusta lujuudesta.

Koekappaleiden puristuslujuus heikkeni h/d-suhteen kasvaessa. Tuloksista lasketut korjauskertoimet poikkesivat ohjeen / 2/ mukaisista käytössä olevista kertoimista huomattavasti. Näyttäisi siltä, että h/d-suhteella on oletettua suurempi vaikutus puristuslujuuteen. H/d-suhteen vaikutuksen eliminoiduksi voitaisiin sementtistabiloinnin laadunvarmistusohjeissa korjauskertoimien sijasta suositella käytettäväksi yhtenäistä h/d-suhdetta (esim. 1,0).

Alhainen lujittumislämpötila heikensi puristuslujuutta. Pääasiassa lujuudet kasvoivat lujittumislämpötilan noustessa. Poikkeuksena oli hienorakeinen materiaali, jolla puristuslujuuden kehitys eri lämpötiloissa oli riippuvainen myös tiivysasteesta.

Lujittumisen aikainen vedensaanti alensi puristuslujuutta ilmeisesti, koska veden ylimäärä näytteen huokosissa haittaa sidosten syntymistä runkoai- neen rakeiden välille. Lujuuskehityksen varmistamiseksi olisi veden pääsy stabiloituun kerrokseen estettävä.

6 KIRJALLISUUS

- / 1/ Maabetoni, Laboratoriokäsikirja. Sementtiyhdistys 1960. 113 s.
- / 2/ Sementtistabilointiohje. Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Tiehallitus. Helsinki 1992. 45 s., 5 liitettä. TIEL 2222614. ISBN 951-47-6848-5.
- / 3/ Ylipiessa, K. Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2. Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. Tielaitoksen selvityksiä 24/1998. Tielaitos, Konsultointi, Oulun kehitysyksikkö. Oulu 1998. 74 s., 7 liitettä. TIEL 3200515. ISBN 951-726-438-0.

7 LIITTEET

LIITE 1 Yksiakselisten puristuskokeiden tulokset

YKSIAKSIAALISTEN PURISTUSKOKEIDEN TULOKSET

Taulukko 1: Materiaalin m1 lujuudet.

h/d- suhde	tiivuus (%)	kosteustila *	lämpötila (°C)	puristuslujuus σ_{7d} (MPa)	ka σ_{7d} (MPa)	vaihtelu keski- arvosta (%)
1,2	95 **	1	22	3,83	3,92	2,0
				4,00		
1,2	90	1	22	2,57	2,44	5,3
				2,32		
1,6	95	1	22	3,07	3,17	3,2
				3,27		
1,2	95	1	5	3,20	3,27	2,4
				3,35		
1,2	95	1	12	3,68	3,70	0,8
				3,73		
1,2	95	1	22	3,69	3,75	4,5
				3,53		
				3,99		
				3,80		
1,2	95	2	22	3,44	3,49	1,4
				3,54		
1,2	95	3	22	3,44	3,14	10,2
				2,62		
				3,39		
				3,12		
1,0	95	1	22	4,48	4,31	3,9
				4,14		
1,2	100	1	22	4,98	4,93	1,0
				4,88		

* Kosteustilat on merkitty seuraavin symbolein

- 1 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (7 d)
- 2 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % + kapillaarinen vedensaanti (7 d)
- 3 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (6 d) + veteen upotettuna (1 d)

** Käsin tiivistys

Taulukko 2: Materiaalin m3 lujuudet

h/d- suhde	tiiveys (%)	kosteustila [*]	lämpötila (°C)	puristuslujuus σ_{7d} (MPa)	ka σ_{7d} (MPa)	vaihtelu keski- arvosta (%)
1,2	95 ^{**}	1	22	4,16		
				3,35		
				3,40	3,64	10,2
1,2	90	1	22	1,91		
				2,08		
				3,55	3,68	26,1
1,6	95	1	22	1,44		
				1,82	1,63	11,7
1,2	90	1	5	3,20		
				-	3,20	-
1,2	95	1	5	4,52		
				4,51	4,52	0,2
1,2	100	1	5	2,63		
				2,54	2,58	1,9
1,2	90	1	12	3,36		
				3,32	3,34	0,6
1,2	95	1	12	4,99		
				4,94	4,97	0,4
1,2	100	1	12	3,03		
				3,09	3,06	1,0
1,2	95	1	22	2,69		
				2,41		
				4,45		
				4,74	3,57	28,9
1,2	95	2	22	2,02		
				3,18		
				3,16	2,79	19,4
1,2	95	3	22	2,56		
				2,52	2,54	0,8
1,0	95	1	22	2,06		
				2,46		
				5,20		
				5,01	3,68	38,9
1,2	100	1	22	5,16		
				5,13		
				6,62		
				6,29	5,80	11,6

* Kosteustilat on merkitty seuraavin symbolein

- 1 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (7 d)
- 2 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % + kapillaarinen vedensaanti (7 d)
- 3 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (6 d) + veteen upotettuna (1 d)

** Käsin tiivistys

Taulukko 3: Materiaalin M4 lujuudet.

h/d- suhde	tiiveys (%)	kosteustila*	lämpötila (°C)	puristuslujuus σ_{7d} (MPa)	ka σ_{7d} (MPa)	vaihtelu keski- arvosta (%)
1,0	95**	1	22	2,89	2,97	2,7
				3,06		
1,0	90	1	22	3,28	2,89	13,8
				2,49		
1,0	95	1	5	3,06	3,11	1,9
				3,17		
1,0	95	1	12	3,11	3,37	7,4
				3,62		
1,0	95	1	22	4,70	4,07	9,3
				3,96		
				3,96		
				3,68		
1,0	95	2	22	2,83	2,74	2,9
				2,66		
1,0	95	3	22	3,40	3,40	0,0
				3,40		
1,2	95	1	22	2,89	3,00	3,7
				3,11		
1,0	100	1	22	5,09	5,32	4,3
				5,55		

* Kosteustilat on merkitty seuraavin symbolein

- 1 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (7 d)
- 2 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % + kapillaarinen vedensaanti (7 d)
- 3 ilman suhteellinen kosteus yli 95 % (6 d) + veteen upotettuna (1 d)

** Käsin tiivistys

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
29/1996 Tien rakennekerros materiaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 38/1996 Rakeneratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- 78/1996 Moreenin rakeistaminen pellettoimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
- 4/1997 Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
- 5/1997 Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
- 11/1997 Betonipäällysten seuranta vt 4 Kempele-Kiviniemi. Kuntoraportti TIEL 3200458
- 23/1997 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200470
- 30/1997 Teiden pohjavesisuojausissa käytettävien maatiivisteiden vedenläpäisevyyden määrittäminen. TIEL 3200476
- 35/1997 Palaturpeen käyttö tierakenteessa. TIEL 3200481
- 23/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1: Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys. TIEL 3200514
- 24/1998 hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. TIEL 3200515
- 25/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3: Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. TIEL 3200516
- 29/1998 Sementtistabiloidut materiaalit, loppuraportti. TIEL 3200521
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)*
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
- 79/1996 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446
- 18/1997 Syvästabiloinnin mitoitusohje. TIEL 3200465
- 28/1997 Tien kevennysrakenteet. TIEL 3200475