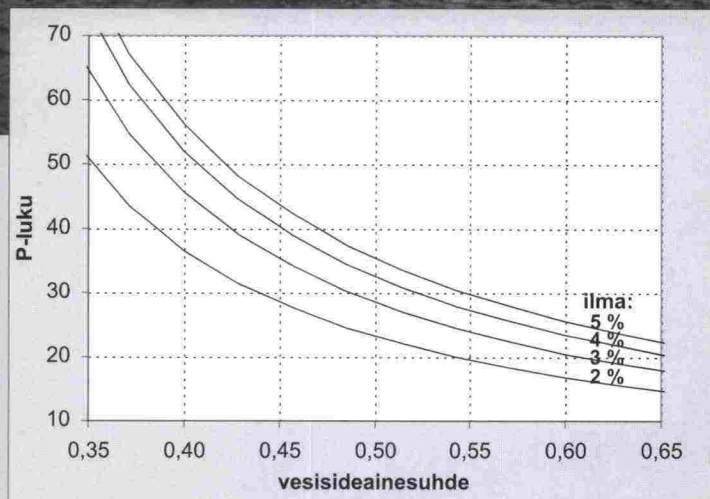
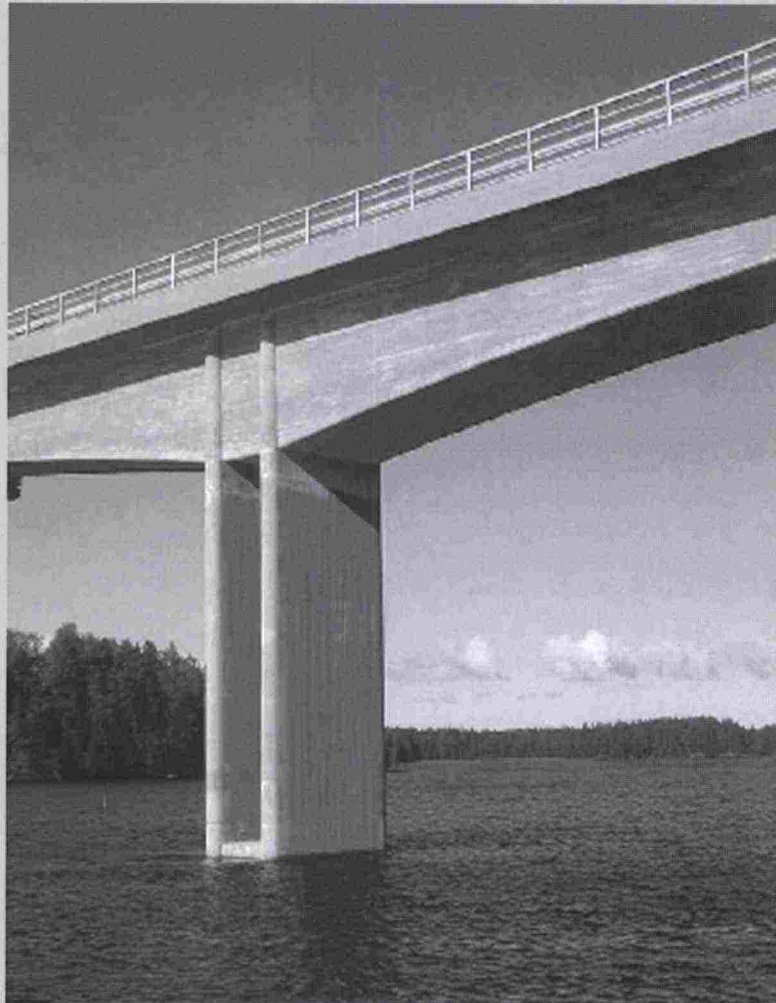




Tielaitos

Siltabetonien P-lukumenettely



Tielaitoksen
selvityksiä

46/2000

Helsinki 2000

TIEHALLINTO
Siltayksikkö

Tielaitoksen selvityksiä
46/2000

Siltabetonien P-lukumenettely

Tielaitos
TIEHALLINTO

Helsinki 2000

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-695-2
TIEL 3200632

Oy Edita Ab
Helsinki 2000

Julkaisua myy:
Tiehallinto, julkaisumyynti
telefax 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi



Tielaitos
TIEHALLINTO
Siltayksikkö
Opastinsilta 12 A
PL 33, 00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 22 150

TIIVISTELMÄ

Pakkasenkestävän siltabetonin valmistuksessa ja kelpoisuuden toteamisessa käytetään P-lukumenettelyä Tiehallinnon sillanrakennustöissä.

Julkaisun ensimmäisessä osassa esitetään vaatimukset pakkasenkestävän siltabetonien valmistamiseksi, laadun varmistamiseksi ja kelpoisuuden toteamiseksi käytettäessä P-lukumenettelyä, joka perustuu tuoreen betonin ominaisuuksiin. Menettely mahdollistaa P-lukubetonin pakkasenkestävyyden määrittämisen betonin suhteitustietojen ja työaikaisten laadunvalvontakokeiden tulosten perusteella.

Julkaisun toisessa osassa esitetään tulokset tutkimuksesta, johon tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva P-lukumenettely perustuu. Tutkimuksessa käsiteltiin tilastomatematisesti 179 eri betonisuhteitukselle tehtyjen pakkasenkestävyysskoekokeiden tulokset. Kokonaisuudessaan tilastollinen aineisto sisälsi 282 koetta, kun otetaan huomioon eri jälkihoitoajat ja vanhennuskäsittelyt. Betoneiden lujuustaso vaihteli välillä 20-100 MPa, ilmamäärä 1-8 % ja sideainemäärä 200-600 kg/m³. Betoneissa oli käytetty eri sementtilaatuja. Silika-, masuunikuona- ja lentotuhkabetoneita sisältyi runsaasti tutkimusaineistoon.

Tilastollinen aineisto käsiteltiin kaksivaiheisesti regressio- ja korrelaatioanalyysijä käyttäen. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin eri pakkasenkestävyyttä kuvaavien kokeiden keskinäistä riippuvuutta korrelaatioanalyysin avulla. Tämän jälkeen tutkittiin selittävimmän pakkasenkestävyysskoekokeen tuloksen perusteella sen riippuvuutta eri suhteitusparametreistä etsimällä regressioanalyysin avulla suhteitusparametrien välille sellainen lineaarikombinaatio, joka voimakkaimmin selitti pakkasenkestävyysskoekokeen tuloksia.

Toisessa vaiheessa ensimmäisen vaiheen selittävimpiin lineaarikombinaatioon kuuluvien suhteitusparametrien välille etsittiin epälineaarista regressioanalyysiä käyttäen funktio, joka voimakkaimmin korreloi pakkasenkestävyysskoekokeen tuloksien kanssa. Kolmannessa vaiheessa toisessa vaiheessa saatua keskiarvofunktiota modifioitiin varmuustason kohottamiseksi ja tarkennettiin jälkihoitoa ja vanhennusprosesseja kuvaavilla kertoimilla.

Key words concrete, bridges, testing, durability, frost resistance

ABSTRACT

The so called P-rate method is followed in the production and in the acceptability of the frost resistant concrete in bridge construction works of the Finnish National Road Administration.

The requirements to be followed in production, in quality assurance, and in acceptability of the frost resistant concrete are presented in the first part of the publication. The P-rate method is based on the properties of fresh concrete, and the method enables to determine the frost resistance of concrete by calculation using the mix design parameters and the results of quality control.

The second part of the publication presents the results of the research on which the P-rate method is based. The P-rate method was developed by statistical analysis of the results of the frost resistance tests done for 179 different concrete mixes. A total number of concretes was 282 when different curing and aging procedures were considered. The compressive strength of concretes varied from 20 MPa to 100 MPa, the air-content up to 8 %, and the binder content from 200 to 600 kg/m³. The research material comprised several cement types, silica fume concretes, blastfurnace slag concretes and fly ash concretes.

In the first stage of statistical analysis the dependence of different frost resistance tests of each other was examined by correlation analysis. After this, the linear combination between the most determinant results of the frost resistance test and the mix design parameters of concretes was searched using regression analysis. Then the function was developed between the most determinant mix design parameters and the results of frost resistance tests by non-linear regression analysis. After this the obtained average function was modified to increase the reliability of the method and the specific coefficients were attached into the final function of P-rate concrete in order to describe the effects of ageing and curing time.

ALKUSANAT

Julkaisussa esitetään Tiehallinnon käytössä oleva tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva pakkasenkestävyyslukumenettely. Julkaisu jakautuu kahteen osaan.

Osa I sisältää laatuvaatimukset, laadunvalvonnan ja kelpoisuuden toteamisen menettelytavat pakkasenkestävän betonin valmistamiseksi, kun käytetään tuoreen betonin P-lukukaavaa. Menettely on julkaistu SYL 3:ssa vuosina 1992 ja 1996 .

Osassa II esitetään perusteet tuoreen betonin P-lukukaavalle. Se perustuu julkaisuun "Tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva P-lukumalli", jota tehtiin vuonna 1989 VTT:n Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa ja vuonna 1990 Teknillisen korkeakoulun betonitekniikan laboratoriossa. Tutkimus oli osa Siltojen uusien materiaalien kehitysprojektia, jonka rahoittivat Tiehallinto, Ratahallintokeskus ja Helsingin kaupungin rakennusvirasto.

Raportin laadintaa on ohjannut DI Ossi Räsänen (Tiehallinto) ja raportin on kirjoittanut tekn.tri Seppo Matala (Matala Consulting).

Helsingissä marraskuussa 2000

Tiehallinto
Siltayksikkö

SISÄLTÖ

I P-LUKUMENETTELY

1 YLEISTÄ	9
2 LAATUVAATIMUKSET	9
3 VALMISTUS JA SUHTEITUSVAATIMUKSET	9
4 LAADUNVALVONTA	11
4.1 Yleistä	11
4.2 Ennakkokokeet	12
4.3 P-luvun määrittäminen suhteitustietojen ja mitatun ilmamäärän perusteella	12
4.4 Ilmamäärän mittaaminen	14
5 KELPOISUUDEN TOTEAMINEN	14
6 DOKUMENTOINTI	14

II TUOREEN BETONIN OMINAISUUKSIIN PERUSTUVA P-LUKUMALLI

1 JOHDANTO	15
2 TUTKIMUSMATERIAALI	16
2.1 Tutkimusmateriaalin kokoaminen	16
2.2 Tutkimusmateriaali	16
2.2.1 Sideainekoostumus ja -määrä, seosaineet ja vesisideainesuhde	16
2.2.2 Tuoreen betonin ominaisuudet ja lujuustaso	19
2.2.3 Pakkaskestävyyskokeet	20
3 TUTKIMUSMENETELMÄ	21
4 TUTKIMUSTULOKSET	21
4.1 Pakkaskestävyyskokeiden tulosten keskinäinen riippuvuus	21
4.1.1 Suojahuokoskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä	22
4.1.2 Kapillaarisen vedelläimeytyskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä	24
4.1.3 Jäädäytyslatuskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä	26
4.1.4 Pakkassuolakokeen riippuvuus muista koemenetelmistä	27
4.1.5 Ilmahuokoskokeen ja dilaatiokokeen välinen riippuvuus	29
4.2 Mallin luonti	30
4.2.1 Pakkassuolakokeen tulosta selittävät suhteitusparametrit	30
4.2.2 Perusmallin sovitus	34

4.2.3	Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli	34
4.2.4	Vesisideainesuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli	39
4.2.5	Redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli	40
4.2.6	Jälkihoidon ja vanhennusprosessien vaikutus pakkasenkestävyyteen	42
5 TULOSTEN TARKASTELU		49
<hr/>		
5.1	Pakkasenkestävyyskokeiden vertailu	49
5.2	Mallien tarkastelu	50
5.2.1	Redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli	50
5.2.2	Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli	52
5.3	Mallin valinta	54
6 KIRJALLISUUSLUETTELO		55
<hr/>		

I P-LUKUMENETTELY

1 YLEISTÄ

Sillan eri osilta vaadittavat pakkasenkestävyysluokat on määritetty ja merkitty sillan rakennussuunnitelmaan Betonirakenneohjeen /1/ mukaisesti. Betonin pakkasenkestävyysvaatimus esitetään suunnitelmassa pakkasenkestävyyslukuna P. Rakenteet jaotellaan pakkasenkestävyysluokkiin P20, P30, P50 ja P70. Betonin pakkasenkestävyys on sitä parempi mitä suurempi pakkasenkestävyysluku on. Betonin pakkasenkestävyyttä säätelevät sen huokosrakenne ja ulkoiset rasitustekijät. Pakkaskestävyyden kannalta hyvän huokosrakenteen muodostumiseen vaikuttavat eniten vesisideainesusuhde, sideaineen laatu, ilmahuokosmäärä ja sen jakautuma sekä betonin jälkihoito.

Pakkasenkestävän betonin valmistuksessa käytetään Tiehallinnon hyväksymiä menettelytapoja. Julkaisun tässä osassa esitetään tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva menetelmä ja sen käytön edellyttämät betonin laatuvaatimukset, ennakkokokeet, betonin laadunvalvonta ja kelpoisuuden toteaminen.

2 LAATUVAATIMUKSET

Pakkasenkestävän betonin on täytettävä rakennussuunnitelmassa esitetyt puristuslujuus- ja pakkasenkestävyysvaatimukset. Lisäksi pakkasenkestävä betoni on suhteitettava jäljempänä annettujen vaatimusten mukaisesti sementtilaatujen, sementtimäärien, seosaineiden, lisäaineiden, runkoaineen hienoainemäärän ja vähimmäisilmamäärän suhteen. Betoni tulee jälkihoitaa siten, että jälkihoitomenetelmällä saavutetaan vähintään 7 vuorokauden kosteajälkihoitoa vastaava taso.

3 VALMISTUS JA SUHTEITUSVAATIMUKSET

Rakennussuunnitelman ja jäljempänä esitettyjen suhteitusohjeiden sallimissa rajoissa voidaan valita sellainen sideaineen, vesisideainesuhteen, ilmamäärän ja jälkihoidon yhdistelmä, että betonin mitattu ilmamäärä ja pakkasenkestävyysluku täyttävät asetetut vaatimukset.

Ilmamäärälle asetetaan kuitenkin minimivaatimus (taulukko I.1). Taulukon I.1 arvot ovat 16 mm tai sitä suuremmalle runkoaineen maksimiraekoolle. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. Raekoon 8 mm vähimmäisilmamäärä saadaan lisäämällä taulukon lukuarvoihin P20-luokassa 1%, P30-luokassa 2% ja sekä P50- että P70-luokissa 3%.

Tiehallinto hyväksyy rakennussementtien oletetut portlandsementti- ja seosaineosuudet ja antaa ohjeet sideaineiden yhteiskäytölle ja hyväksyy poikkeamisen jäljempänä esitetyistä suhteitusvaatimuksista. Sideaineella tarkoitetaan rakennussementtiä ja betoniin valmistuksen yhteydessä mahdollisesti lisättäviä seosaineita kuten lentotuhkaa, masuunikuonajauhetta ja silikaa. Sideaineen kokonaismäärä on rakennussementin ja seosaineiden yhteismäärä.

Taulukko I.1: Betonimassan vähimmäisilmamäärävaatimukset, kun runkoaineen maksimiraekoko ≥ 16 mm.

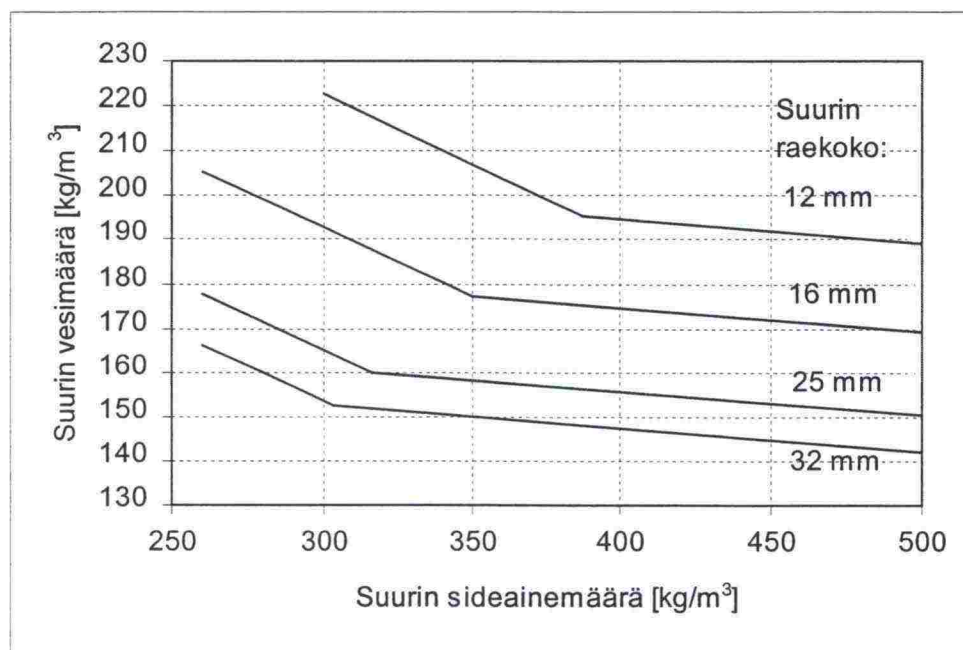
Vesisideainesuhde	Ilmamäärän vähimmäisarvo eri pakkasenkestävyysluokissa			
	P20	P30	P50	P70
0,60	5 %	5 %	-	-
0,50	3 %	4 %	6 %	-
0,40	2 %	3 %	4 %	(7 %) ⁽¹⁾
0,32	2 %	2 %	2 %	3 %
<0,32	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.

1) Vain interpolointia varten

Betoni suhteitetaan siten, että vaadittu pakkasenkestävyysluku ja ilmamäärä saavutetaan. Tämä todetaan ennakkokokein. Suhteituksessa noudatetaan seuraavia ohjeita:

- Betonissa käytetään sideainetta vähintään 300 kg/m^3 . Kokonaissideainemäärän on oltava vähintään 350 kg/m^3 , jos käytetään masuunikuonasementtiä tai jos erillisjauhetun masuunikuonan lisäys portlandsementtiin ylittää 35 % sideaineen kokonaismäärästä.
- Silikajauheen määrä sideaineen kokonaismäärästä saa olla enintään 5 %. Jos vesisideainesuhde alittaa arvon 0,35, saa silikajauheen määrä olla kuitenkin enintään 7 % sideaineen kokonaismäärästä. Silikajauhetta voidaan käyttää vain portlandsementin yhteydessä.
- Erikseen lisättävän lehtotuhkan tai siihen verrattavan muun tuhkalaadun määrä saa olla enintään 25 % sideaineen kokonaismäärästä ja sitä voidaan käyttää vain portlandsementin yhteydessä.
- Erillisjauhetun masuunikuonan enimmäismäärä ei saa ylittää 50 % sideaineen määrästä ja sitä voidaan käyttää vain portlandsementin yhteydessä.
- Erillisjauhetun masuunikuonan, masuunikuonasementin, silikajauheen, lentotuhkan tai muun vastaavan tuhkalaadun yhteiskäyttö ei ole sallittu ilman Tiehallinnon hyväksyntää. Myöskään erilaisten rakennussementtien yhteiskäyttö ei ole sallittua.
- Kokonaishienoainesmäärän tulee täyttää toinen seuraavista vaatimuksista:
 - A) Kokonaishienoainesmäärä (sideaine + alle 0,25 mm kiviaines) saa olla korkeintaan 500 kg/m^3 , kun vesisideainesuhde on $\geq 0,45$ ja enintään 550 kg/m^3 , kun vesisideainesuhde on $\leq 0,35$. Väliarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti.

- B) Kokonaishienoainesmäärän määrittämisessä kiviaineksen osuutta ei tarvitse ottaa huomioon, jos suhteituksen kokonaisvesimäärä ei ylitä kuvan I.1 mukaista enimmäisvesimäärää. Väliarvot suurimman raekoon välifraktiolle voidaan interpoloida suoraviivaisesti.



Kuva I.1. Suhteituksen suurimman kokonaisvesimäärän ja sideainemäärän välinen riippuvuus, kun runkoaineen maksimiraekoot ovat 32, 25, 16 ja 12 mm.

- Betoni suhteitetaan esim. hidastetta käyttäen siten, että se voidaan tarvittaessa jälkitäryttää.
- Betonin valmistuksessa on käytettävä huokostinta, jos betonille on asetettu ilmamäärävaatimus.

Muilta osin noudatetaan Tiehallinnon betonille ja sen osa-aineille sekä betonimassan valmistamiselle asettamia vaatimuksia.

4 LAADUNVALVONTA

4.1 Yleistä

Pakkasenkestävän betonin valmistuksen laatua valvotaan RakMK B4:n /3/ kohdan 5 mukaisesti.

Ennakkokokeet tehdään tämän julkaisun kohdan 4.2 mukaisesti.

Betonimassan vaaditut ominaisuudet selvitetään työn aikana mittaamalla ilmamäärä (ks. taulukko I.1) ja laskemalla P-luku suhteitustietojen ja jälkihoitoajan perusteella (kaava I.1, kohta 4.3).

P-lukubetonin laadun varmistamisessa ilmamäärä ja ilman pysyvyys ovat oleelliset. Tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuvassa P-lukukaavassa ilmamäärä mitataan kohdassa 4.4 kuvatulla painemenetelmällä kuormista

1 - 5 jokaisesta kuormasta ja tämän jälkeen joka kymmenennestä kuormasta. Mittauksia tehdään yhteensä vähintään 6 kpl. Mittaukset tehdään mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa ennen massan sijoittamista muottiin, esim. betonipumpun letkun päästä.

Ilmamäärämittausten tulosten keskiarvon on täytettävä asetettu vaatimus. Keskiarvoon lasketaan kaikki, myös alittavat mittaustulokset. Yksi kolmesta peräkkäisestä mittaustuloksesta saa alittaa vaatimuksen enintään 20 %. Jos jokin mittaustulos alittaa vaatimuksen yli 20 %, mitataan ilmamäärä tämän jälkeen kyseisestä kuormasta vielä kaksi kertaa. Jos molemmat tulokset täyttävät vaatimuksen, katsotaan kyseinen kuorma kelvolliseksi.

4.2 Ennakkokokeet

Ennakkokokeilla varmistetaan betonimassan vaaditut ominaisuudet ja käytettävien lisäaineiden yhteensopivuus sekä lisäaineiden annostelujärjestys ja annostelutapa.

Ennakkokokeilla tutkitaan betonin puristuslujuus, tiheys, ilmamäärä ja ne tekijät, joiden avulla pakkasenkestävyys lasketaan. Runkoaineen kosteus-pitoisuus määritetään ennakkokoemassaan käytetyistä kaikista lajiteista vähintään kahtena erillismäärytyksenä todellisen vesisideainesuhteen laske-miseksi. Ilmamäärä mitataan heti sekoituksen jälkeen ja tunnin kuluttua se-koituksesta. Huokosteen annostus tarkistetaan vielä välittömästi ennen se-koitusta. Tarvittaessa tutkitaan myös ilmamäärän pysyvyyttä betonin kulje-tuksen ja betonoinnin aikana.

Ennakkokokeiden yhteydessä selvitetään hidasteen ja nesteytteen vaikutus-aika betonointiolosuhteissa. Tarvittaessa tutkitaan myös lisäaineiden vaiku-tuksia eri lämpötiloissa.

Jos huokosjolle on asetettu rakennussuunnitelmassa vaatimukset, tulee ennakkokokeet tehdä Tiehallinnon edellyttämässä laajuudessa.

4.3 P-luvun määrittäminen suhteitustietojen ja mitatun ilmamää-rän perusteella

P-luku määritetään suhteitustietojen ja työmaalla mitattujen ilmamäärien perusteella kaavan I.1 avulla.

$$P = \frac{46 \cdot k_{jh} \cdot k_{VA}}{10 \cdot (WAS)^{1,25} \sqrt{a} - 1} \quad (I.1)$$

jossa k_{jh} on jälkihoitokerroin (kaava I.2)
 t_{jh} on jälkihoitoaika (vrk)
 k_{VA} on vanhennuskerroin (kaava I.3)
 WAS on redusoitu vesi-ilmasideainesuhde (kaava I.4)
 a on ilmamäärä (%).

$$k_{jh} = 0,85 + 0,17 \cdot \text{LOG}_{10}(t_{jh}) \quad (I.2)$$

$$k_{VA} = 1 - 0,045 \cdot s - 0,008 \cdot k - 0,001 \cdot l \quad (1.3)$$

jossa s on silikan, k masuunikuonan ja l lentotuhkan osuus sideaineesta (%). Redusoitu vesi-ilmasideainesuhde WAS lasketaan kaavasta

$$WAS = \frac{Q_{vesi} + 10 \cdot (a - 2)}{Q_{sem} + 2,5 \cdot Q_{ssil} + 0,8 \cdot Q_{kuona} + 0,3 \cdot Q_{lt}} \quad (1.4)$$

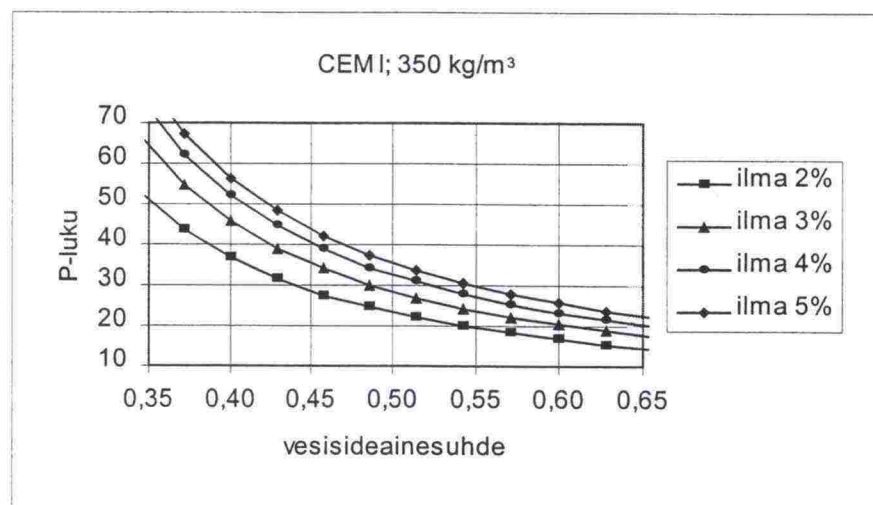
jossa

- Q_{vesi} on vesimäärä (kg/m^3)
- Q_{sem} on portlandsementin määrä (kg/m^3)
- Q_{sil} on silikajauheen määrä (kg/m^3)
- Q_{kuona} on masuunikuonan määrä (kg/m^3)
- Q_{lt} on lentotuhkan määrä (kg/m^3)
- a on ilmamäärä (%).

P-lukubetonin valmistukseen Tiehallinto hyväksyy ilman erillisselvitystä taulukon I.2 mukaiset standardissa SFS-EN 179-1 /2/ esitetyt rakennussementit ja P-luvun laskennassa käytettävät seosainepitoisuudet.

Taulukko I.2. Standardin SFS-EN 179-1 rakennussementtityyppien otaksutut seosainepitoisuudet P-lukua laskettaessa.

Sementtityyppi	Portlandsementtiä	Seosainetta sideaineesta
CEM I	100 %	-
CEM II/A-S	85 %	Masuunikuonaa 15 %
CEM II/B-S	70 %	Masuunikuonaa 30 %
CEM II/A-D	95 tai 93 %	Silikaa 5 tai 7 % (kohta 3)
CEM II/A-V	85 %	Lentotuhkaa 15 %
CEM III/A	40 %	Masuunikuonaa 60 %
CEM III/B	25 %	Masuunikuonaa 75 %



Kuva I.2. Esimerkki kaavalla 1.1 lasketun P-luvun riippuvuudesta vesisideainesuhteesta ja ilmamäärästä sementtilaadulla CEM I sementtimäärän ollessa 350 kg/m³. Jälkihoitoaika 7 vuorokautta.

4.4 Ilmamäärän mittaaminen

Ilmamäärä, sen jakautuma ja pysyvyys ovat keskeisiä tekijöitä betonin hyvän pakkasenkestävyyden aikaansaamiseksi (kuva I.2). Sen vuoksi ilmamäärän varmistamiseen laadunvalvonnassa tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Betonimassan ilmamäärä mitataan painemenetelmällä. Mittarin tilavuuden tulee olla 16 mm tai suuremmalla runkoaineen maksimiraekolla vähintään 8 dm³ ja tarkkuus vähintään 0,2 %. Mittari tarkistetaan vuosittain. Betonimassaa tiivistetään mitta-astiassa kahdessa kerroksessa enintään 50 mm läpimittaisella sauvatäryttimellä niin kauan, että sen pinta on tasainen ja kiiltävä eikä siinä enää ole suuria ilmakuplia. Sauvatäryttimen nostoaika on vähintään 10 sekuntia. Yläosan tiivistyksen jälkeen betonimassan pinta tasataan mitta-astian yläreunan tasolle ja mittarin yläosa asetetaan paikoilleen. Mittaus tehdään mittarin ohjeiden mukaan. Mittarin asteikko ilmoittaa kokonaisilmamäärän prosentteina betonimassan tilavuudesta.

Itsetiivistyvän betonin ilmamäärän mittaamisessa noudatetaan erikseen sovitua menettelyä.

5 KELPOISUUDEN OSOITTAMINEN

P-luku lasketaan suhteitustietojen, jälkihoitoajan ja ilmamäärän perusteella käyttäen kohdassa 4.3 esitettyä kaavaa (I.1). P-lukujen keskiarvon on täytettävä suunnitelmassa asetettu vaatimus. Yksi kolmesta peräkkäisestä P-luvusta saa alittaa vaatimuksen enintään 20 %.

Kovettuneen betonin kelpoisuutta pakkasenkestävyyden suhteen ei tarvitse erikseen osoittaa, jos betonimassa on todettu tältä osin kelvolliseksi. Tällöin edellytetään kuitenkin, että puristuslujuus on ennakkokokeiden mukainen, massa on tiivistynyt hyvin ja betoni on suojattu ja jälkihoidettu hyväksyttävällä tavalla.

Elleivät kaikki edellä luetellut ehdot täyty, tilaaja harkitsee tapaus tapaukselta täydentävien tutkimusten tarpeellisuuden. Täydentävät tutkimukset tehdään Tiehallinnon ohjeiden mukaan rakenteesta irrotetuista näytteistä. Täydentävistä tutkimuksista laaditaan hyväksyttävä suunnitelma RakMK B4:n kohdan 6.3.4 mukaisesti. Poranäytteiden paikat valitaan siten, että tutkittavan rakenneosan betonista saadaan mahdollisimman kattava ja oikea kuva.

Täydentävän tutkimuksen perusteella määritettyjen P-lukujen keskiarvon on täytettävä suunnitelmassa asetettu vaatimus. Korkeintaan yksi kolmesta peräkkäisestä tuloksesta saa alittaa vaatimuksen enintään 20%:lla.

6 DOKUMENTOINTI

Betonin valmistuksesta rakennuspaikalla tai valmisbetonilaitoksessa tehdään RakMK B4:n kohdan 5.1 mukaiset muistiinpanot.

Työmaalla tehdyt muistiinpanot luovutetaan tilaajalle. Valmisbetonilaitoksella tehdyt muistiinpanot sekä laadunvalvontakokeiden tulokset säilytetään tilaajan mahdollisia tarkastuksia varten vähintään kymmenen vuotta.

II TUOREEN BETONIN OMINAISUUKSIIN PERUSTUVA P-LUKUMALLI

1 JOHDANTO

Vuodesta 1986 lähtien on Suomessa ollut käytössä Erkki Vesikarin kehittämä P-lukuun perustuva pakkasenkestävyyden käyttöikämalli. Käsitteenä P-luvun ideoi Tiehallinnon siltayksikkö puristuslujuuden mittarina käytetyn K-lujuuden rinnalle kuvaamaan betonin pakkasenkestävyysominaisuutta.

Pakkasenkestävyyden käyttöikämallia on käytetty sillanrakennuksessa, vesirakentamisessa ja muissa hyvää pakkasenkestävyyttä vaativissa kohteissa. Malli on aikanaan kehitetty ja kalibroitu standardin SFS 5449 mukaisen suoran pakkasenkestävyyden testausmenetelmän avulla.

1980-luvun lopussa Suomessa tehtiin erittäin laajoja säilyvyyskoesarjoja, joissa tutkittiin teollisuuden sivutuotteiden kuten lentotuhkan, silikan ja ma-suunikuonan vaikutusta betonin pakkasenkestävyyteen ja suolapakkaskestävyyteen. Koesarjoja tehtiin betoneiden eri jälkihoidoilla ja jälkihoitoajoilla. Koesarjoissa otettiin käyttöön myös vanhennusmenetelmät, joilla pyrittiin simuloimaan betonin todellista vanhenemista kuivumisen ja karbonatisoitumisen seurauksena. Laajoja koesarjoja tehtiin myös korkealujuusbetoneilla, joiden pakkasenkestävyysominaisuuksista saatiin lisävalaistusta ja joiden suolapakkaskestävyys todettiin useimmilla sideainekoostumuksilla erinomaiseksi. Lujuustason vuoksi korkealujuusbetoneihin ei voitu soveltaa sellaisenaan normaalille lujuustasolle kehitettyä aikaisempaa P-lukukaavaa.

1980-luvun lopussa Tiehallinnon siltayksikkö päätti tutkia, voidaanko betonin pakkasenkestävyyden mittarina käytössä oleva P-luku määrittää luotettavasti tuoreen betonin ominaisuuksista jo ennen valutapahtumaa. Menettelyn etuna nähtiin nopeus ja reklamaatioiden ja kustannusten väheneminen siltojen betonitöiden osalta.

Tiehallinto antoi VTT:n tehtäväksi kehittää malli, joka soveltuisi P-lukubetonin suhteitukseen lähtien tuoreen betonin ominaisuuksista. Mallin kehitystyö aloitettiin Seppo Matalan tekemänä VTT:llä vuonna 1989 ja saatettiin loppuun Teknillisessä korkeakoulussa vuonna 1990.

Mallin laadinnassa päädyttiin tukeutua käytettävissä olleeseen vuoteen 1990 asti Suomessa tehtyjen dokumentoitujen pakkasenkestävyysskoekokeiden tilastoaineistoon. Mallissa otettiin huomioon tuoreen betonin ominaisuuksien, betonikoostumuksen ja sivutuotteiden vaikutuksen lisäksi myös jälkihoitoaika ja vanhennusprosessien, kuten karbonatisoitumisen ja kosteusolosuhteiden muutosten vaikutus myöhäisiän pakkasenkestävyyteen. Lisäksi mallin tuli soveltua myös korkealujuusbetoneihin.

Malliin ei sisällytetty olosuhdetekijää, joten käyttöiän laskemisessa päätettiin edelleen noudattaa peruskaavaa

$$t_l = k_e \cdot P \quad \text{jossa } t_l \text{ on käyttöikä vuosina} \quad (\text{II.1})$$

k_e on olosuhdekerroin

P on tässä tutkimuksessa kehitettävä tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva pakkasenkestävyytluku.

Tutkimuksen tulokset, seuraavassa esitettävät kohdat 2-5, on vuonna 1990 raportoitu Tiehallinnolle /4/.

2 TUTKIMUSMATERIAALI

2.1 Tutkimusmateriaalin kokoaminen

Vuoden 1989 aikana kerättiin eri lähteistä sellaisten betonikokeiden tuloksia, joista oli tehty jonkintyyppisiä pakkasenkestävyyttä kuvaavia joko suoria tai epäsuoria kokeita ja joiden suhteitustiedot myös tuoreen betonin ominaisuuksien osalta olivat tiedossa.

Koeaineistoon pääsemiseksi betonikokeesta tuli olla taltioituna vähintään seuraavat tiedot:

- betonin sideaineen laatu ja määrä, runkoaineen määrä ja veden määrä (tai vesisideainesuhde)
- tuoreen betonin ilmamäärä ja notkeustaso
- betonin jälkihoitotapa ja -aika
- arvio betonin puristuslujuudesta
- jokin seuraavista pakkasenkestävyyttä kuvaavista kokeista
 - suojahuokoskoe
 - kapillaarisen vedelläkylästysasteen määrityskoe
 - jäädytysulatuskoe joko taivutusvetolujuuteen tai ultraäänen läpimenoaikaan perustuen
 - optinen ilmahuokoskoe
 - dilaatiokoe
 - pakkassuolakoe (SFS 5449).

Tutkimusmateriaalin joukkoon kelpuutettuja koetuloksia saatiin käyttöön Tiehallinnolta, VTT:n betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriosta, Teknillisen korkeakoulun Rakennetekniikan laitokselta ja Oy Partek Ab:stä.

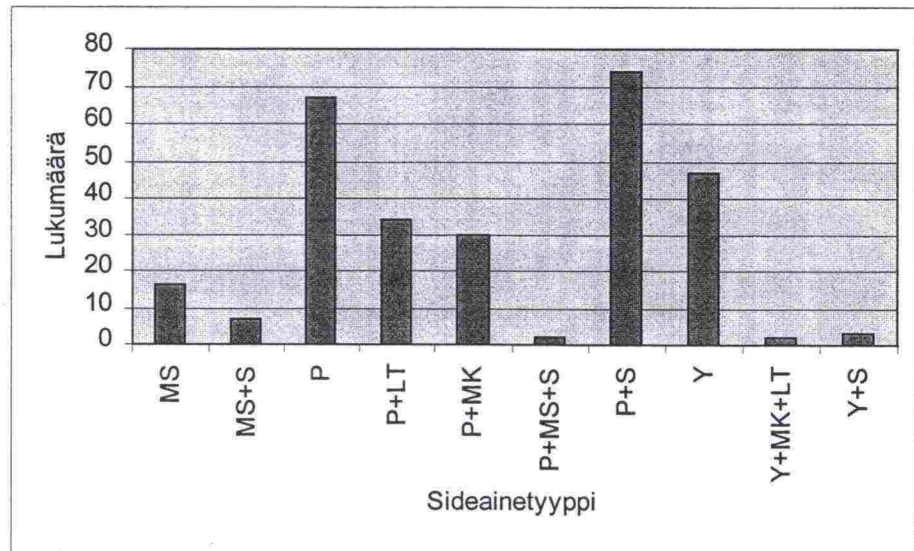
2.2 Tutkimusmateriaali

Tutkimusmateriaali sisälsi kaikkiaan 179 erilaista betonisuhteitusta. Samoista suhteituksista valmistettuja betoneita oli jälkihoidettu tai vanhennettu eri menetelmillä. Tämän vuoksi koko tutkimusaineisto (jokin pakkasenkestävyyttä kuvaava koe oli tehty) sisälsi yhteensä 282 eri tavoin jälkikäsiteltyä betonia.

2.2.1 Sideainekoostumus ja -määrä, seosaineet ja vesisideainesuhde

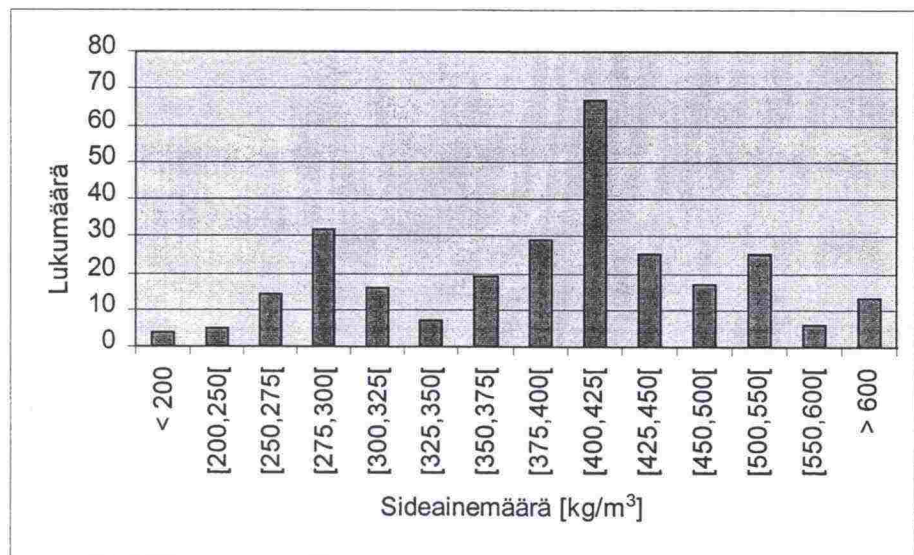
Tutkimusaineistoon kuuluvien betoneiden sideainekoostumuksien ja sideainemäärien jakaumat koko aineistossa käyvät ilmi kuvista II.1 ja II.2.

Kuvassa II.3 on esitetty silikan, masuunikuonan ja lentotuhkan seosprosenttien jakaumat koko tutkimusaineistossa. Silikamäärän vaihteluväli oli 3-20 %, masuunikuonan 23-80 % ja lentotuhkan 13-30 % sideaineen kokonaismäärästä.

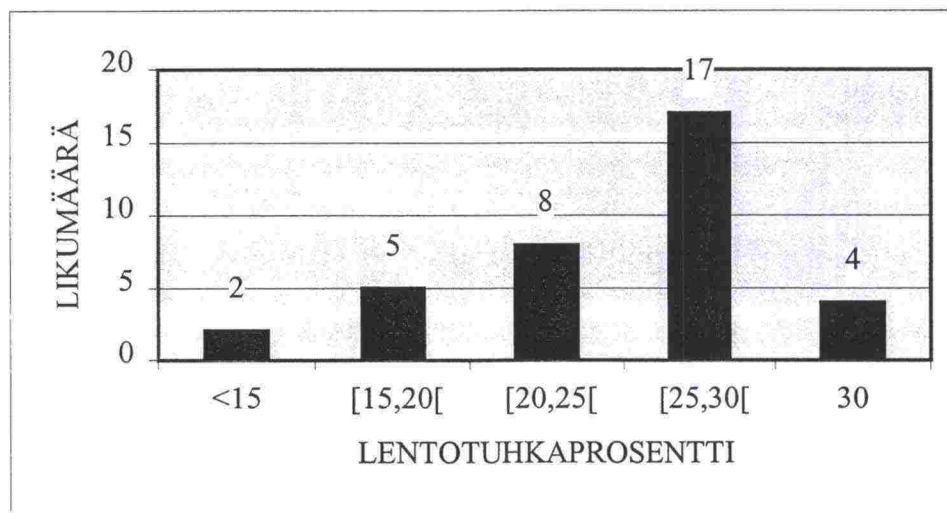
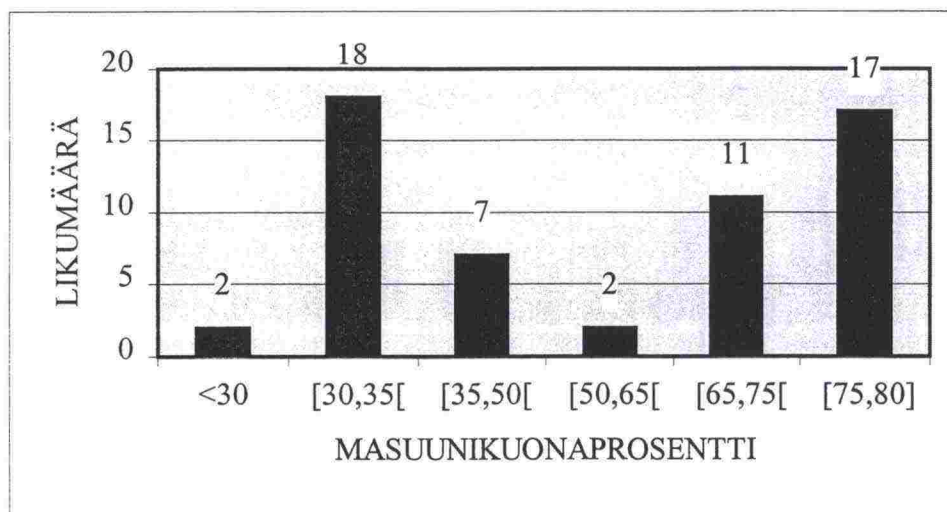
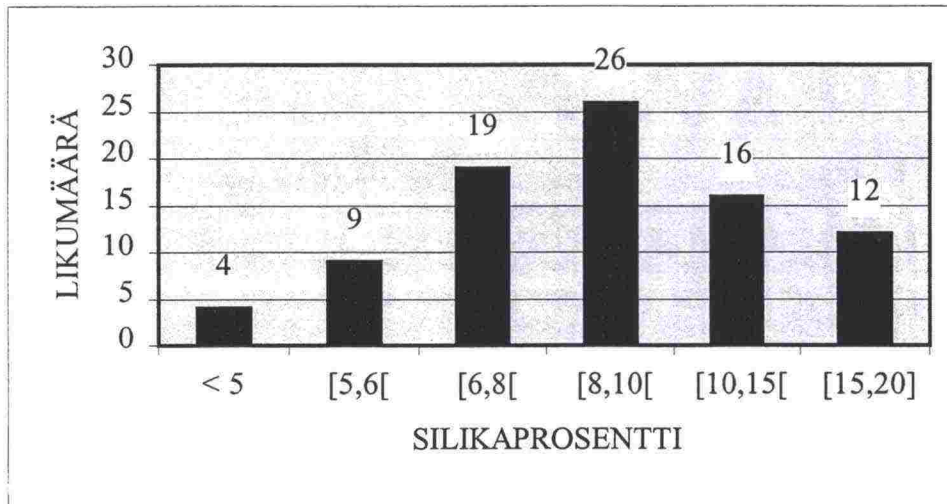


Kuva II.1. Sideaineainelaadut koearneistossa ja koodien nykyiset vastaavuudet:

P = Portlandsementti (CEM I); MK = Masuunikuona
Y = Yleissementti (CEM II/B); LT = Lentotuhka
MS = Masuunikuonaseementti (CEM III/B); S = Silika

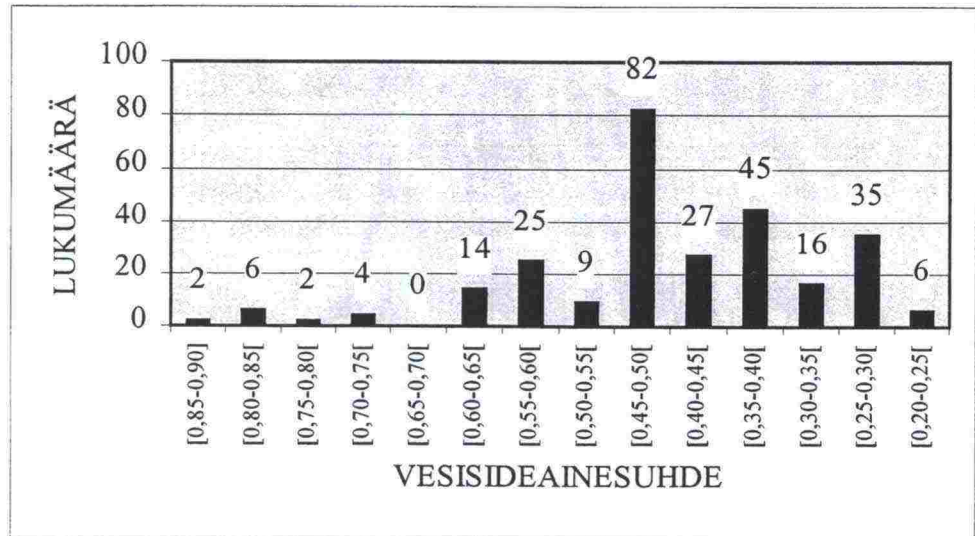


Kuva II.2. Sideainemäärien jakautuma koearneistossa.



Kuva II.3. Silikan, masuunikuonan ja lentotuhkan seosprosenttien jakaumat tutkimusaineistossa.

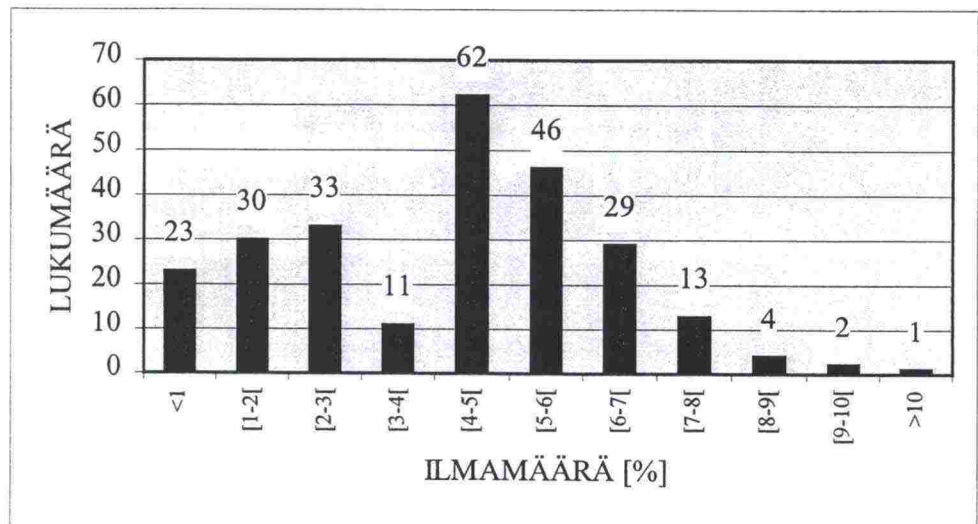
Vesisideainesuhteiden jakaumat perusaineistossa (179 betonia) on esitetty kuvassa II.4. Vesisideainesuhteiden vaihteluväli oli 0,25 - 0,90 painottuen kuitenkin arvojen 0,40 ja 0,60 välille.



Kuva II.4. Vesisideainesuhteiden jakaumat tutkimusaineistossa.

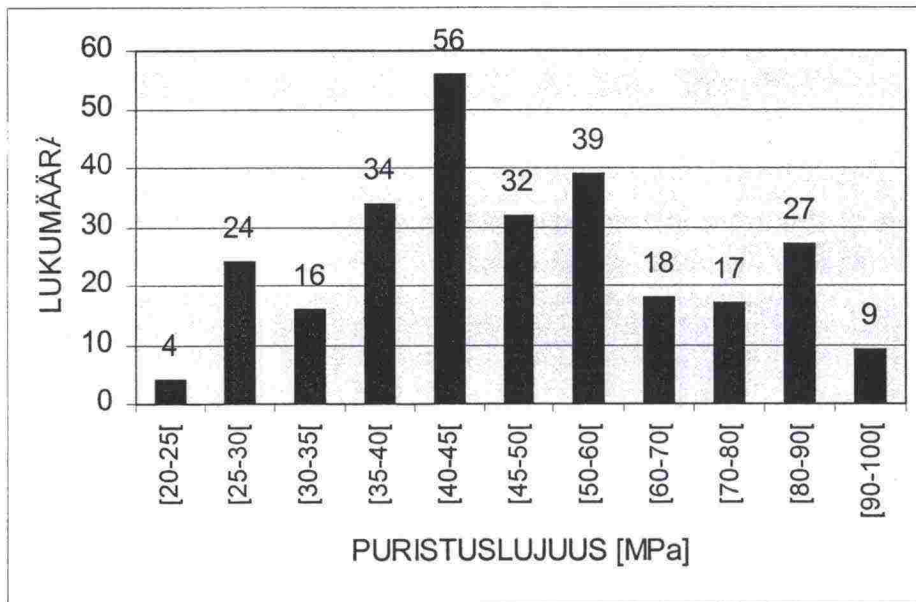
2.2.2 Tuoreen betonin ominaisuudet ja lujuustaso

Tuoreen betonin ilmamäärien ja painuma-arvojen jakaumat perusaineistossa (179 betonia) on esitetty kuvassa II.5. Ilmamäärien vaihteluväli oli 1 - 10 %. Huokoistetut betonit painottuivat ilmamääräalueelle 4 - 7 %, kuten kuvasta II.5 ilmenee. Korkealujuusbetonit selittävät alhaisen ilmamäärän betoneiden suurehkon osuuden koeaineistossa.



Kuva II.5. Tuoreen betonin ilmamäärän jakautuma tutkimusaineistossa.

Kuvassa II.6 on esitetty puristuslujuuden jakauma perusaineistossa. Lujuus vastaa 150 mm kuution keskilujuutta 28 vuorokauden ikäisenä myös korkealujuusbetoneiden osalta. Perusaineiston yleisin lujuustaso on välillä 25 - 55 MPa vastaten lujuusluokkia K20 - K50. Korkealujuusbetoneiden osuudesta kuva II.6 ei anna oikeaa kuvaa koko aineiston osalta, sillä korkealujuusbetoneilla oli tutkittu laajasti jälkihoidon ja eri ikäännyttämisprosessien vaikutusta pakkasenkestävyyteen.



Kuva II.6. Puristuslujuuden jakauma tutkimusaineistossa.

2.2.3 Pakkaskestävyyskokeet

Pakkasenkestävyyttä kuvaavia kokeita oli koko aineistossa seuraavasti:

- 93 suojahuokoskoetta (SH-koe)
- 106 kapillaarisen vedelläkylästysasteen määrittystä (KAP-koe)
- 78 jäädytyskulatuskoetta (taivutusvetolujuus) (JS-koe)
- 73 ultraäänikoetta (UÄ-koe)
- 103 optista ilmahuokoskoetta (IH-koe)
- 139 pakkassuolakoetta SFS 5449:n mukaisella menetelmällä (PS-koe)
- 13 dilaatiokoetta (DIL-koe).

Edellämainitut kokeet otettiin mukaan tilastolliseen tarkasteluun. Taulukosta II.1 käy ilmi, kuinka monta koetta koko tutkimusaineistosta on tehty eri pakkasenkestävyyskokeilla.

Taulukko II.1. Kokeiden määrät eri pakkasenkestävyyskokeilla.

Pakkasen- kestävyys- koe	Kokeiden määrät					
	PS-koe	SH-koe	KAP-koe	JS-koe	UÄ-koe	IH-koe
PS-koe	139	78	72	68	31	55
SH-koe	78	93	42	41	4	42
KAP-koe	72	42	106	18	46	63
JS-koe	68	41	18	78	35	4
UÄ-koe	31	4	46	35	73	32
IH-koe	55	42	63	4	32	103

3 TUTKIMUSMENETELMÄ

Tilastollinen aineisto käsiteltiin kaksivaiheisesti regressio- ja korrelaatio-analyysinä käyttäen.

Ensimmäisessä vaiheen selvitettiin aluksi eri pakkasenkestävyyttä kuvaavien menetelmien keskinäistä riippuvuutta korrelaatioanalyysin avulla. Tämän jälkeen tutkittiin selittävimmän pakkasenkestävyyskokeen tuloksen perusteella sen riippuvuutta eri suhteitusparametreista etsimällä regressioanalyysin avulla suhteitusparametrien välille sellainen lineaarikombinaatio, joka voimakkaimmin selittää pakkasenkestävyyskokeen tuloksia.

Toisessa vaiheessa ensimmäisen vaiheen selittävimpään lineaarikombinaatioon kuuluvien suhteitusparametrien välille etsittiin epälineaarista regressio-analyysinä käyttäen funktio, joka voimakkaimmin korreloi pakkasenkestävyyskokeen tuloksien kanssa.

Kolmannessa vaiheessa toisessa vaiheessa saatua keskiarvofunktiota tarkennetaan jälkihoitoa ja vanhennusprosesseja kuvaavilla kertoimilla, joiden määrittäminen tilastollisesti ei ollut mahdollista aineiston rajallisuuden vuoksi. Lopuksi P-lukukaavaa muutettiin varmuustason parantamiseksi. Se toteutettiin siten, että lopullisen P-lukukaavan antamat arvot rajautuivat 90 %:sti kokeelliseen tulosaineistoon.

4 TUTKIMUSTULOKSET

4.1 Pakkasenkestävyyskokeiden tulosten keskinäinen riippuvuus

Pakkasenkestävyyskokeiden tulosten keskinäistä riippuvuutta tarkasteltiin lineaarisen regressioanalyysin avulla sovittamalla tulosjoukkoon seuraavia malleja:

$$Y = a + b \cdot X \quad (II.2)$$

$$\frac{1}{Y} = a + b \cdot X \quad (II.3)$$

$$Y = e^{a+b \cdot X} \quad (II.4)$$

$$Y = a \cdot X^b \quad (II.5)$$

Kaavoissa II.2...II.5 a ja b ovat parametrejä, X ja Y ovat pakkasenkestävyyskokeiden ao. tunnuslukuja.

Variaatioiden lukuisuuden vuoksi seuraavissa kappaleissa esitetään vain parhaimpien korrelaatioiden tulokset taulukkomuodossa ja osittain graafisesti. Korrelaatiota on arvosteltu Pearsonin korrelaatiokertoimen neliön R^2 avulla.

4.1.1 Suojahuokoskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä

Taulukossa II.2 on esitetty regressioanalyysin tulokset suojahuokoskokeella määritetyn suojahuokossuhteen (Y) ja jäädytyslaskokokeen taivutusvetolujuussuhteen (X1), optisen ilmahuokosanalyysin ilmahuokosvälin (X2 JA X3), pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvojen (X4) ja (X5) ja kapillaarikokeella määritetyn suojahuokossuhteen (X6) ja dilaatiokokeen laajenema-arvon (X7) avulla.

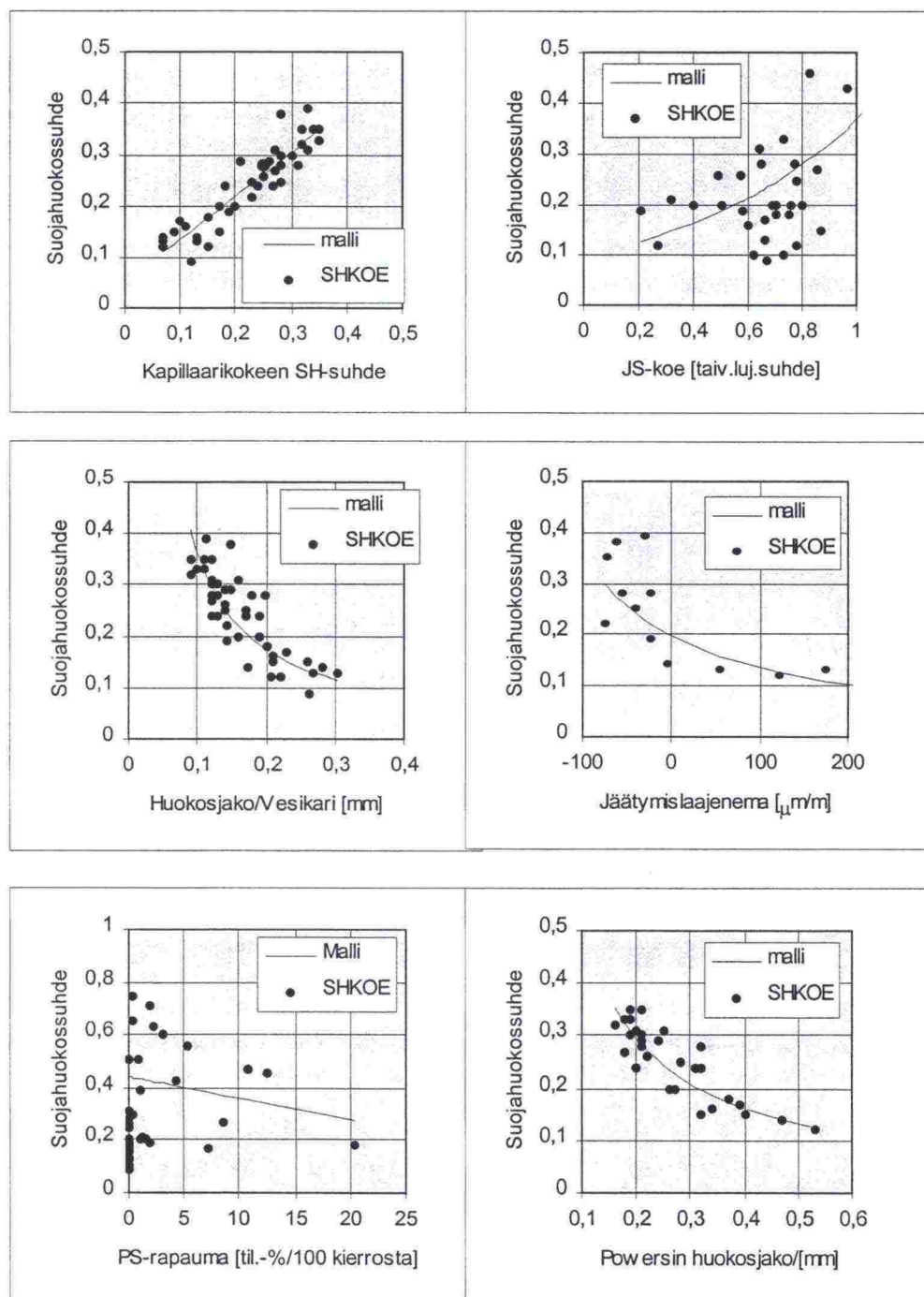
Taulukko II.2. Suojahuokossuhteen riippuvuus muiden koemenetelmien antamista tuloksista.

Y=SH-suhde	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R^2
		a	b	Ta	Tb		
Jääd.sul.koe X1=Taivutus- lujuussuhde	$Y=EXP(a+b X)$	-2,35	1,35	-7,8	3,31	40	0,22
Ilmahuokoskoe X2=Ilmahuokosväli /Powers	$1/Y=a+b X$	0,57	14,1	1,47	10,4	28	0,80
Ilmahuokoskoe X3=Ilmahuokosväli /Vesikari	$1/Y=a+b X$	-0,23	29,7	-0,41	9,2	28	0,68
Pakkassuolakoe X4=DEL V25	$Y=a X^b$	0,045	-0,084	-18,1	-1,4	77	0,02
Pakkassuolakoe X5=DEL V100	$Y=a+b X$	0,441	-0,008	7,61	-1,0	19	0,05
Kapillaarikoe X6=SH-suhde	$Y=a+b X$	0,048	0,061	3,3	14,2	39	0,84
Dilaatiokoe X7=laajenema	$1/Y=a+b X$	5,07	0,023	14,8	6,8	12	0,81

Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde.

Kuvassa II.7 on esitetty suojahuokoskokeella määritetyn suojahuokossuhteen (Y) riippuvuus jäädytyslaskokokeen taivutusvetolujuussuhteesta (X1), optisen ilmahuokosanalyysin ilmahuokosväleistä (X2=Powers ja X3=Vesikari), pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoista

(X4) ja (X5), kapillaarikokeella määritetystä suojahuokossuhteesta (X6) ja dilaatiokokeen laajenema-arvosta (X7). Kuvissa oleva sovitekäyrä vastaa taulukon II.2 mukaisia funktioita.



Kuva II.7. Suojahuokossuhteen riippuvuus muiden pakkasenkestävyyskokeiden tuloksista.

4.1.2 Kapillaarisen vedelläimeytyskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä

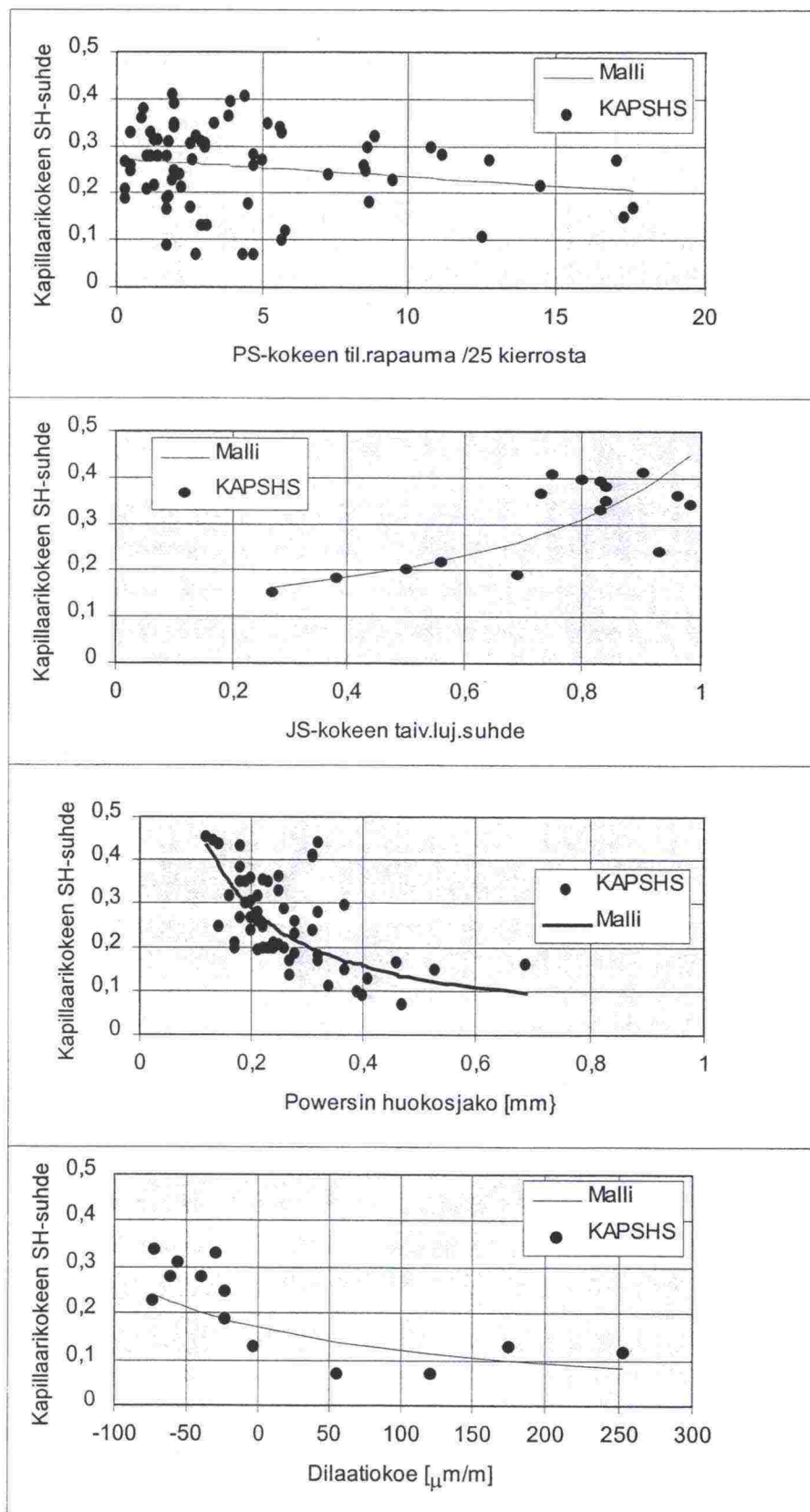
Kohdassa 4.1.1 esitettiin kapillaarisella vedelläimeytyskokeella määritetyn suojuhuokossuhteen riippuvuus suojuhuokoskokeella määritetystä suojuhuokossuhteesta. Taulukossa II.3 on esitetty regressioanalyysin tulokset kapillaarisella vedelläimeytyskokeella määritetyn suojuhuokossuhteen (Y1) riippuvuudesta jäädytyslatuskokeen taivutusvetolujuussuhteen (X11) ja ultraäänien läpimenoaikojen neliöiden suhteeseen (X81), optisen ilmahuokosanalyysin ilmahuokosväliin (X21), pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoihin (X41) ja (X51) ja dilaatiokokeen laajenema-arvon (X71) avulla.

Taulukko II.3. Kapillaarikokeella määritetyn suojuhuokossuhteen riippuvuus muiden koemenetelmien antamista tuloksista.

Y=SH-suhde Kapillaarikoe	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R ²
		a	b	Ta	Tb		
Jääd.sul.koe X11= Taivutus- lujuussuhde	Y=a+b X	0,093	0,32			17	0,19
	Y=a X ^b	0,143	0,82			17	0,41
	1/Y=a+b X	7,463	-5,52			17	0,54
	1/Y=a+b X (1) (1)suojuhuokos- suhde < 0,6	7,648	-5,54	10,33	-5,61	15	0,69
Ilmahuokoskoe X21=Ilmahuo- kosväli /Powers	1/Y=a+b X	0,539	14,7			62	0,28
	Y=a+b X	0,496	-0,77			62	0,41
Pakkassuolakoe X41=DEL V25	Y=a+b X	0,272	-3,71			71	0,03
	Y=a X ^b	0,043	-0,066	-18,8	-1,3	71	0,02
Pakkassuolakoe X51=DEL V100	Y=a+b X	0,311	-0,001			28	0,06
Dilaatiokoe X71=laajenema	1/Y=a+b X	5,91	0,024	6,5	2,7	12	0,40
Ultraäänikoe X81=(t _s /t _v) ²	1/Y=a+b X	7,04	-4,41	9,4	-5,0	45	0,37

Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde.

Kuvassa II.8 on esitetty kapillaarisella vedelläimeytyskokeella määritetyn suojuhuokossuhteen (Y) riippuvuus jäädytyslatuskokeen taivutusvetolujuussuhteesta (X11), optisen ilmahuokosanalyysin ilmahuokosväleistä (X21=Powers, pakkassuolakokeen 25 kierroksen rapauma-arvoista (X41), dilaatiokokeen laajenema-arvosta (X71)). Kuvissa oleva sovitekäyrä vastaa taulukon II.3 funktioita.



Kuva II.8. Kapillaarikokeella määritetyn suojuhuokossuhteen riippuvuus muiden pakkasenkestävyyskokeiden tuloksista.

4.1.3 Jäädetyssulatuskokeen riippuvuus muista koemenetelmistä

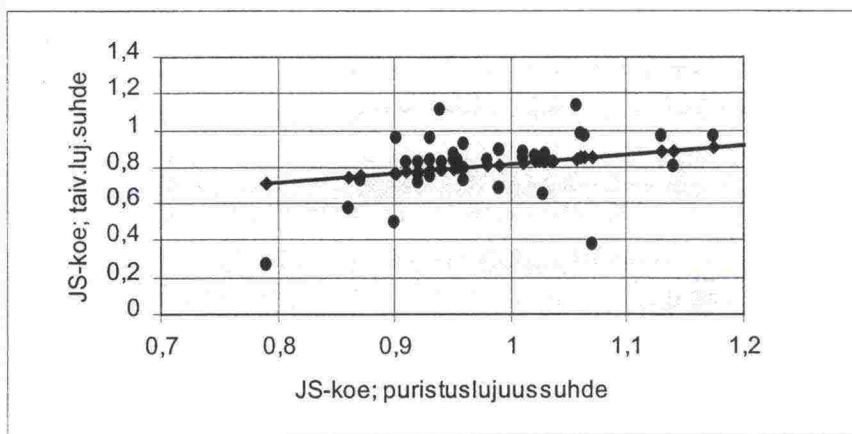
Taulukossa II:4 on esitetty regressioanalyysin tulokset jäädetyssulatuskokeen taivutusvetolujuussuhteen (Y1) riippuvuudesta ultraäänen läpimenoaikojen neliöiden suhteeseen (X81), pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoihin (X41) ja (X51) ja jäädetyssulatuskokeen puristuslujuussuhteeseen (X91) avulla.

Taulukko II.4. Jäädetyssulatuskokeen taivutusvetolujuussuhteen riippuvuus muiden koemenetelmien antamista tuloksista.

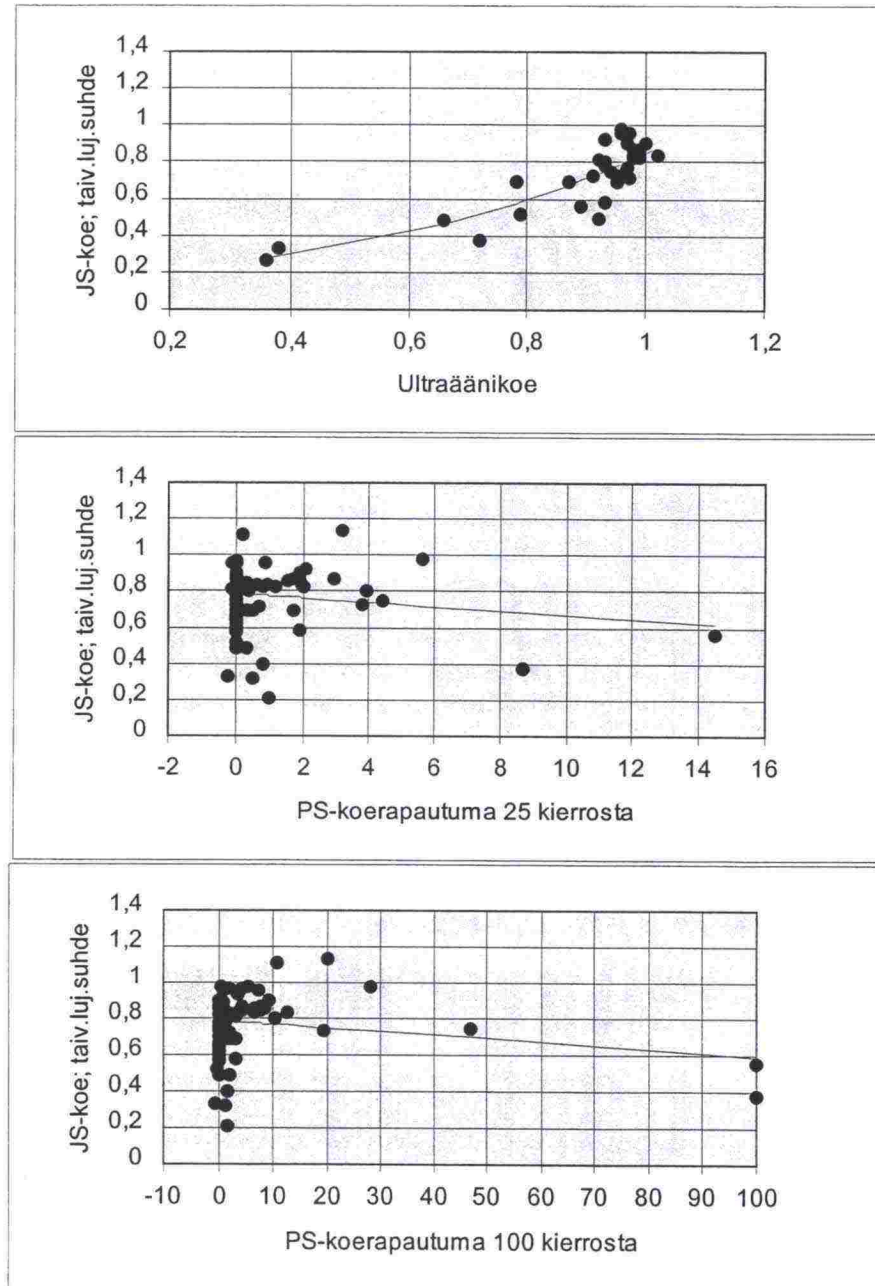
Y1=JS-koe Taiv.luj.suhde	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R ²
		a	b	Ta	Tb		
Pakkassuolakoe X41=DEL V25	$Y=a+b X$	0,789	-0,012	25,1	-1,1	51	0,02
Pakkassuolakoe X51=DEL V100	$Y=a+b X$	0,788	-0,002	26,3	-1,3	51	0,03
Js-koe $X91=(s_{js}/s_v)^2$	$Y=a+b X$	5,91	0,024	6,5	2,7	12	0,40
Ultraäänikoe $X81=(t_{js}/t_v)^2$	$Y=EXP(a+b X)$	-1,93	1,77	-13,3	11,1	34	0,79

Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde

Kuvassa II.9a on esitetty jäädetyssulatuskokeen taivutusvetolujuussuhteen (Y) riippuvuus jäädetyssulatuskokeen puristuslujuussuhteesta (X91) ja kuvassa II.9b ultraäänen läpimenoaikojen neliöiden suhteesta (X81), pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoista (X41) ja (X51). Kuvissa oleva sovitekäyrä vastaa taulukon II.4 funktioita.



Kuva II.9a. Jäädetyssulatuskokeen taivutusvetolujuuden riippuvuus puristuslujuussuhteesta.



Kuva II.9b. Jäädytyskulatuskokeen taivutusvetolujuuden riippuvuus muiden pak-
kassenkestävyyskokeiden tuloksista.

4.1.4 Pakkassuolakokeen riippuvuus muista koemenetelmistä

Taulukossa II.5 on esitetty regressioanalyysin tulokset pakkassuolakokeen 25 kierroksen rapauma-arvojen (Y) riippuvuus optisen ilmahuokosanalyysin ilmahuokosvälistä (X21) ja dilaatiokokeen laajenema-arvosta (X71). Taulukossa II.6 on esitetty regressioanalyysin tulokset ultraäänen läpimenoaikojen neliöiden suhteen riippuvuudesta pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoista.

Taulukko II.5. Pakkassuolakokeen rapauma-arvojen riippuvuus muiden koemethodien antamista tuloksista.

Y1=PS-koe Rapauma til. %	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R ²
		a	b	Ta	Tb		
Ilmahuukoskoe X21=Ilmahuukos- väli/Powers	Y=a+b X	4,24	4,46	2,45	0,89	39	0,02
Ilmahuukoskoe X21=Ilmahuukos- väli /Vesikari	Y=a+b X	4,04	3,93	2,91	0,58	52	0,01
Dilaatiokoe X71=laajenema	Y=a+b X	2,01	0,012	6,79	3,99	12	0,59

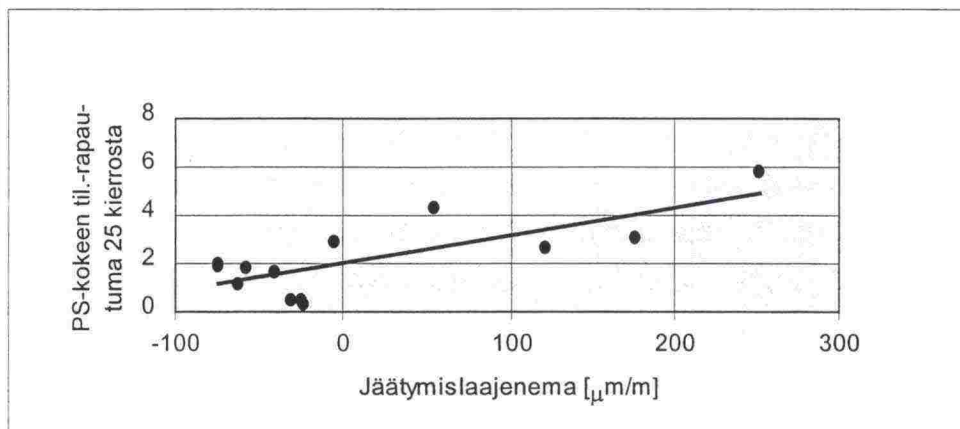
Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde

Taulukko II.6. Ultraäänen läpimenoaikojen suhteen neljän riippuvuus pakkassuolakokeen 25 ja 100 kierroksen rapauma-arvoista.

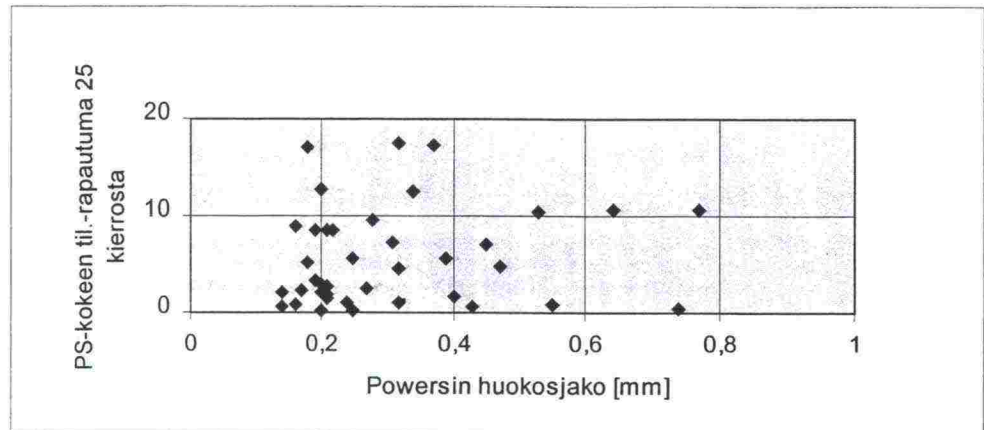
Y=UÄ-koe (t _s /t _v) ²	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R ²
		a	b	Ta	Tb		
Pakkassuolakoe X41=DEL V25	Y=a+b X	0,977	-0,015	79,8	-0,19	11	0,00
Pakkassuolakoe X51=DEL V100	Y=a X ^b	0,871	0,021	-3,47	2,04	11	0,29

Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde

Kuvassa II.10a on esitetty pakkassuolakokeen 25 kierroksen rapauma-arvon riippuvuus dilaatiokokeen laajenema-arvosta. Kuvassa II.10b on esitetty pakkassuolakokeen 25 kierroksen rapauma-arvon riippuvuus Powersin huukosjaosta. Kuvassa II.10a oleva sovitekäyrä vastaa taulukon II.5 funktiota.



Kuva II.10a. Pakkassuolakokeen rapauma-arvon riippuvuus dilaatiokokeesta.



Kuva II.10b. Pakkassuolakokeen rapautuma-arvon riippuvuus huokosjaosta.

4.1.5 Ilmahuokoskokeen ja dilaatiokokeen välinen riippuvuus

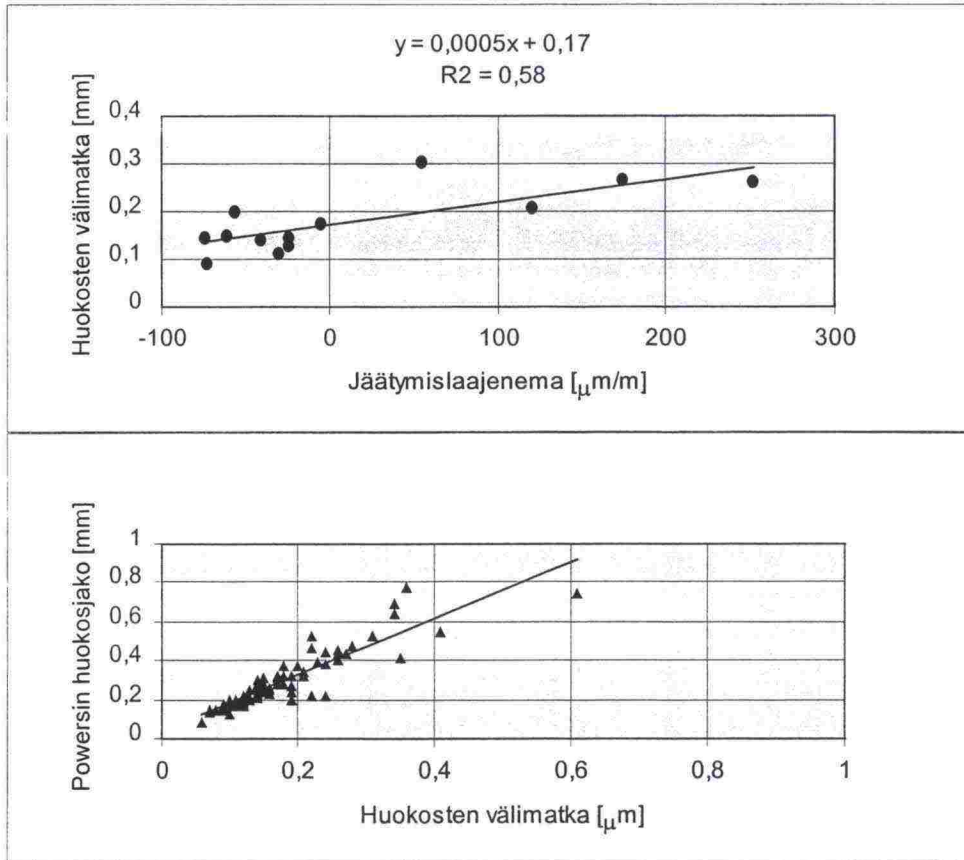
Taulukossa II.7 on esitetty regressioanalyysin tulokset optisen ilmahuukos-analyysin ilmahuukosvälin (Y,Vesikari) ja dilaatiokokeen laajenema-arvon (X71) välisestä riippuvuudesta ja Vesikarin ja Powersin (X21) ilmahuukosvälin riippuvuus.

Taulukko II.7. Ilmahuukosanalyysin ilmahuukosjaon (Y,Vesikari) ja dilaatiokokeen laajenema-arvon (X71) välinen riippuvuus ja Vesikarin ja Powersin ilmahuukosjakojen riippuvuus.

Y1=IH-koe IH-jako (mm)	MALLI	VAKIOT		T-ARVOT		KOK LKM	R ²
		a	b	Ta	Tb		
Ilmahuukoskoe X21=Ilmahuukos- jako /Powers	$Y=a+b X$	0,041	1,42	2,33	17,3	39	0,89
Dilaatiokoe X71=laajenema	$Y=a+b X$	0,17	0,0005	14,0	3,91	12	0,58

Ta (Tb) on estimaatin a (b) ja sen hajonnan suhde

Kuvassa II.11 on esitetty optisen ilmahuukosanalyysin ilmahuukosvälin (Y,Vesikari) ja dilaatiokokeen laajenema-arvon (X71) ja Powersin (X21) ilmahuukosvälien välinen riippuvuus. Kuvissa oleva sovitekäyrä vastaa taulukon II.7 funktioita.



Kuva II.11. Optisen ilmahuokosanalyysin Vesikarin ilmahuokosvälin ja dilataatiokokeen laajenema-arvon ja Powersin ilmahuokosjaon välinen riippuvuus.

4.2 Mallin luonti

4.2.1 Pakkassuolakokeen tulosta selittävät suhteitusparametrit

Mallin luontia varten etsittiin sellaiset suhteitusparametrit, joiden lineaarikombinaatio korreloi parhaiten pakkassuolakokeen tuloksen kanssa. Pakkassuolakoe, vaikkakin se korreloi erittäin huonosti epäsuorien pakkasenkestävyysskoekien kanssa, valittiin mallin perustaksi, koska koe on ns. suora pakkasenkestävyyden testausmenetelmä, menetelmää käyttäen oli tehty paljon kokeita ja koska se on ainoa pintakerrokseen kohdistuva menetelmä.

Lineaarikombinaatiot etsittiin sekä 25 että 100 pakkassuolakerroksen koe-tuloksille.

Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin lineaarikombinaatiota

$$\Delta V_{25} = K + k_1 \cdot Q_{sid} + k_2 \cdot \frac{W}{Q_{sid}} + k_3 \cdot A + k_4 \cdot P + k_5 \cdot K_{28} + k_6 \cdot T + k_7 \cdot SEMCODE \quad (\text{II.6})$$

jossa	K	on vakio,
	Q_{sid}	on sideainemäärä [kg/m^3],
	W	on vesimäärä [kg/m^3],
	A	on tuoreen betonin ilmamäärä [%],
	P	on painuma-arvo [cm],
	K_{28}	on 28 d puristuslujuus [MPa],
	T	on jälkihoitoaika [d],
	SEMCODE	on sideainelaatua kuvaava koodinumero ja
	$K_1...k_7$	ovat kertoimia.

Taulukkoon II.8 on kerätty lineaarikombinaation riippumattomien muuttujien kertoimien estimaatit, niiden hajonnat, T-arvot ja muuttujan merkitsevyytaso. Taulukon II.8 arvoista havaitaan, että 129 mittaustuloksen havaintoaineistoon perustuen lineaarikombinaation muuttujista sideainemäärän, painuma-arvon ja sideainetyypin merkitsevyytaso ylittää arvon 0,05, jolloin niiden vaikutus mallissa on merkityksetön tai korrelaatiota ($R^2=0,456$) alentava. Kun em. muuttujat poistetaan mallista, saadaan lineaarikombinaatiolle taulukon II.9 mukaiset arvot. Korrelaatiokerroin ($R^2=0,612$) on parantunut, mutta nyt puristuslujuuden merkitsevyytaso ylittää arvon 0,05, mikä on luonnollista, koska lineaarikombinaatiossa on mukana siihen korreloiva vesisideainesuhde. Kun puristuslujuus poistetaan mallista saadaan taulukon II.10 mukaiset arvot, jotka perustuvat 172 kokeen havaintoaineistoon. Mallin korrelaatiokertoimeksi tulee 0,608 ja lineaarikombinaatio saa muodon

$$\Delta V_{25} = -4,74 + 21,77 \cdot \frac{W}{Q_{sid}} - 0,42 \cdot A - 0,059 \cdot T \quad (II.7)$$

missä ΔV_{25} on rapauma-arvo 25 kierroksen kohdalla, W/Q_{sid} on vesisideainesuhde A on ilmamäärä (%) ja T on jälkihoitoaika (vrk).

Taulukko II.8. Lineaarimallin sovitus 25 kierroksen pakkassuolakokeen arvoon (I).

Riippumaton muuttuja	kerroin	virhe	t-arvo	merk.taso
Vakio	1,528381	4,365594	0,3501	0,7269
Sideainemäärä	-0,002679	0,005906	-0,4536	0,6509
Vesisideainesuhde	10,099565	3,940191	2,5632	0,0116
Ilmamäärä	-0,364362	0,115015	-3,1680	0,0019
Painuma-arvo	-0,000738	0,005382	-0,1372	0,8911
Lujuus K_{28}	-0,042481	0,019650	-2,1618	0,0326
Jälkihoitoaika	-0,034008	0,01476	-2,3040	0,0229
Sementtilaatu	0,337248	0,217727	1,5489	0,1240
$R^2 = 0,4242$ SE= 1,761943 MAE= 1,092936				
129 kokeen sovitettu havaintoaineisto				

Taulukko II.9. Lineaarimallin sovitus 25 kierroksen pakkassuolakokeen arvoon (II).

Riippumaton muuttuja	kerroin	virhe	t-arvo	merk.taso
Vakio	-2,047583	2,155354	-0,9500	0,3435
Vesisideainesuhde	19,382931	2,305287	8,4080	0,0000
Ilmamäärä	-0,513411	0,110457	-4,6481	0,0000
Jälkihoitoaika	-0,061941	0,015253	-4,0609	0,0001
Lujuus K28	-0,023596	0,0179	-1,3182	0,1892
R ² = 0,6027 SE= 2,146208 MAE= 1,527061				
172 kokeen sovitettu havaintoaineisto				

Taulukko II.10. Lineaarimallin sovitus 25 kierroksen pakkassuolakokeen arvoon (III).

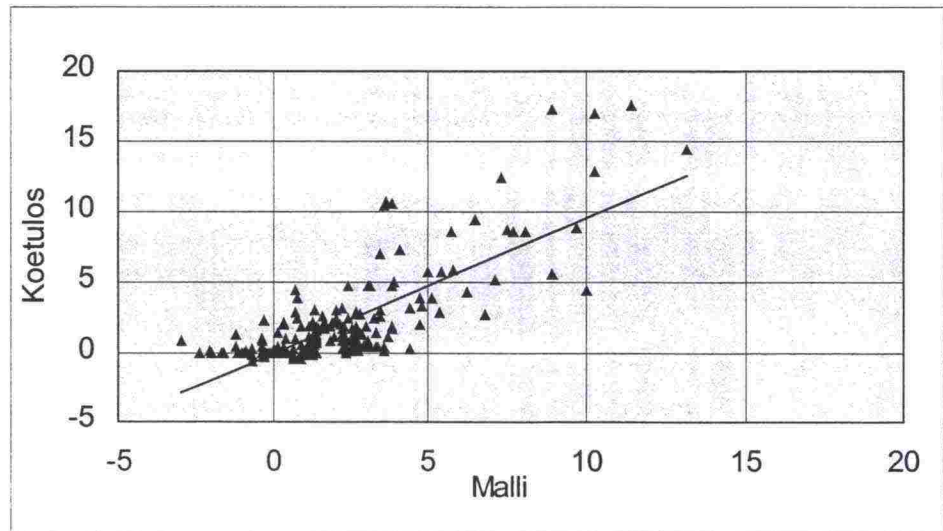
Riippumaton muuttuja	kerroin	virhe	t-arvo	merk.taso
Vakio	-4,73621	0,698466	-6,7807	0,0000
Vesisideainesuhde	21,772385	1,427394	15,2532	0,0000
Ilmamäärä	-0,417194	0,083085	-5,0213	0,0000
Jälkihoitoaika	-0,058766	0,015095	-3,8931	0,0001
R ² = 0,6009 SE= 2,150914 MAE= 1,521465				
172 kokeen sovitettu havaintoaineisto				

Kuvassa II.12 on esitetty graafisesti lineaarimallin antamien tulosten ja koetulosten välinen riippuvuus.

Vastaavaa menettelyä käyttäen luotiin lineaarimalli samoille suhteitusparametreille kuin edelläkin paitsi siten, että vesisideainesuhde korvattiin ns. redusoidulla vesi-ilmasideainesuhteella

$$\left(\frac{W}{S}\right)_{RED} = \frac{W + (A - 2) \cdot 10}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \quad (II.8)$$

jossa W on vesimäärä (kg/m³),
A on ilmamäärä (%),
Q_{OPC} on portlandsementtimäärä (kg/m³),
Q_{SIL} on silikamäärä (kg/m³),
Q_{LT} on lentotuhkamäärä (kg/m³) ja
Q_{KUO} on masuunikuonamäärä (kg/m³).



Kuva II.12. Lineaarimallin (kaava II.7) ja koetulosten välinen riippuvuus.

Taulukossa II.11 ovat lineaarimallin kertoimien arvot. Malli perustuu 172 koetulokseen ja sovituksen korrelaatiokertoimeksi (R^2) saatiin 0,525. Kuvassa II.13 on esitetty graafisesti lineaarimallin antamien tulosten ja koetulosten välinen riippuvuus. Malli on muotoa

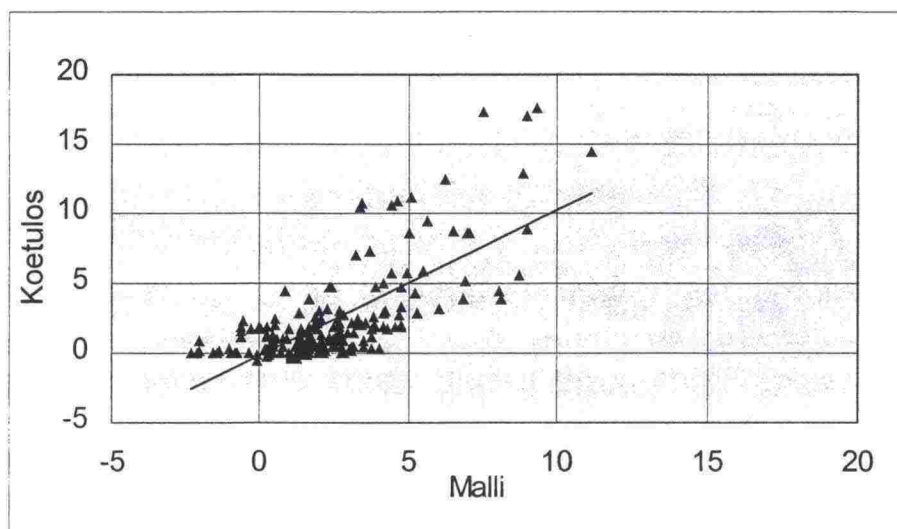
$$\Delta V_{25} = -1,85 + 16,4 \cdot \left(\frac{W}{S} \right)_{RED} - 0,81 \cdot A - 0,051 \cdot T \quad (\text{II.9})$$

Taulukko II.11. Lineaarimallin sovitus 25 kierroksen pakkassuolakokeen arvoon redusoidulle vesi-ilmasementtisuhteelle.

Riippumaton muuttuja	kerroin	virhe	t-arvo	merk.taso
Vakio	-1,850027	0,639936	-2,8910	0,0043
Redusoitu vesisideainesuhde	16,361326	1,282294	12,7594	0,0000
Ilmamäärä	-0,814729	0,106023	-7,6845	0,0000
Jälkihoitoaika	-0,051204	0,016689	-3,06891	0,0025
$R^2 = 0,5167$ SE= 2,367154 MAE= 1,709248				
172 kokeen sovitettu havaintoaineisto				

Kun vastaavat tarkastelut tehtiin pakkassuolakokeen 100 jäädytyslatuskierroksen arvoille, saatiin lineaarimallin merkitsevimmiksi muuttujiksi ilmamäärä ja vesisideainesuhde tai redusoitu vesisideainesuhde. Jälkihoitoajan vaikutus oli vähäinen. Mallin korrelaatiokertoimeksi (R^2) saatiin 0,413. Malli on muotoa

$$\Delta V_{100} = -13,9 + 73,5 \cdot \left(\frac{W}{S} \right)_{RED} - 3,5 \cdot A \quad (\text{II.10})$$



Kuva II.13. Lineaarimallin ja koetulosten välinen riippuvuus redusoituun vesisideainesuhteeseen perustuen.

4.2.2 Perusmallin sovitus

Kohdan 4.2.1 perusteella voidaan päätellä, että tuoreen betonin suhteitusparametreista vesisideainesuhde tai redusoitu vesisideainesuhde tai redusoitu vesi-ilmasementtisuhde ja ilmamäärä selittivät lineaarimallilla parhaiten pakkasuolakokeen tulosta. Seuraavassa on käsitelty näihin muuttujiin perustuvia epälineaarisia malleja.

Sovituksessa käytettiin STATGRAPHICS-ohjelmistoa, jolla laskettiin regressioanalyysiä käyttäen korrelaatioita 25, 50, 75 ja 100 jäädytyskulutuskierron rapauma-arvon ja erityyppisten epälineaaristen funktioiden välille. Funktioon otettiin muuttujiksi ilmamäärä (A) ja vesisideainesuhde (W/S) tai redusoitu vesisideainesuhde (W/S_{RED}) tai redusoitu vesi-ilmasementtisuhde ((W+A)/S_{RED}).

Parhaat korrelaatiot saatiin muotoja

$$k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W}{S}\right)^{k_3} \cdot A^{k_4} \quad \text{ja} \quad \text{EXP}\left(k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W}{S}\right)^{k_3} \cdot A^{k_4}\right)$$

olevien funktioiden ja pakkassuolarapauman välille. Funktioissa W/S on jokin edellämainituista vesisementtisuhdeista ja A on ilmamäärä. Parametrien k_3 ja k_4 arvot valittiin siten, että korrelaatio oli voimakkain.

4.2.3 Redusoituun vesi-ilmasementtisuhdeeseen ja ilmamäärään perustuva malli

25 Kierroksen pakkassuolakokeita oli tehty 192. Taulukosta II.12 käy ilmi lineaarimallin

$$\Delta V_{25} = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{k_3} \cdot A^{k_4}$$

kertoimen k_3 muutoksen vaikutus Pearsonin korrelaatiokertoimen neliöön (R^2). Kertoimella k_4 oli arvo -0,33. Taulukkoon on merkitty myös eksponenttimallin

$$\Delta V_{25} = EXP \left[k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{k_3} \cdot A^{k_4} \right] - 1$$

parhaan sovituksen arvot.

Taulukko II.12. Kertoimen k_3 sovitus.

Malli	Parametrit/T-arvot				Kertoimet		
	k_1	T_1	k_2	T_2	k_3	k_4	R^2
LIN	-0,40	-1,3	18,4	11,8	2,5	-0,33	0,42
LIN	-1,31	-3,8	19,0	12,3	2,0	-0,33	0,44
LIN	-2,90	-6,5	20,5	12,8	1,5	-0,33	0,46
LIN	-4,58	-8,2	22,5	13,1	1,2	-0,33	0,47
LIN	-4,41	-8,9	24,2	13,4	1,25	-0,33	0,48
EXP	-0,70	-6,1	5,64	14,4	1,25	-0,33	0,52

Kuvassa II.14 on esitetty graafisesti

$$\left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,33}$$

riippuvuus 25 kierroksen pakkassuolarapaumasta. Kuvan käyrä edustaa mallia

$$\Delta V_{25} = -4,4 + 24,2 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,33} \quad (\text{II.11})$$

jossa

$$\frac{W + A}{S_{RED}} = \frac{W + (A - 2) \cdot 10}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}}$$

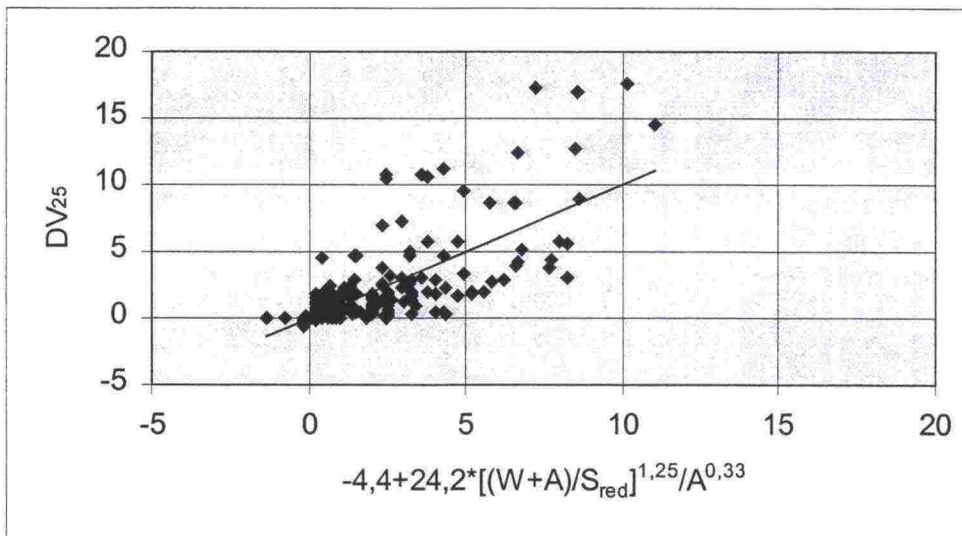
ja A on ilmamäärä [%]. Kuvassa II.15 on esitetty vastaavasti malli

$$\Delta V_{25} = EXP \left[-0,7 + 5,6 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,33} \right] - 1 \quad (II.12)$$

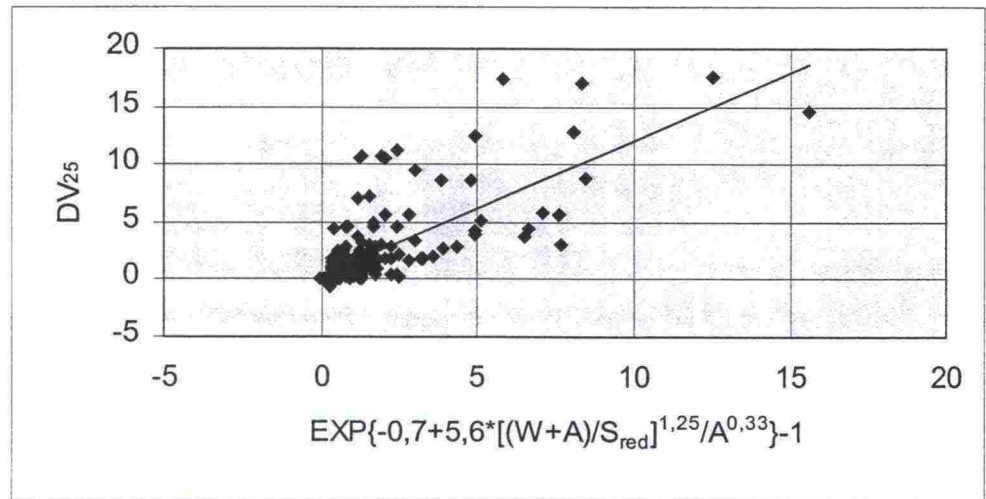
100 kierroksen pakkassuolakokeen tulokselle sovitettiin sekä lineaari- että eksponenttimallia. Aineistossa oli 114 koetta. Parhaat sovitteet on esitetty taulukossa II.13. Samassa taulukossa on myös sovite, jossa ilmamäärän eksponenttina käytettiin arvoa 0,50 ja kun tulosjoukosta poistettiin ne betonit, joiden ilmapitoisuudet olivat yli 8 tai alle 1 % (LIN2).

Taulukko II.13. Mallit 100 kierroksen rapauma-arvolle.

Malli	Parametrit/T-arvot				Kertoimet		R ²
	k ₁	T ₁	k ₂	T ₂	k ₃	k ₄	
LIN	-6,75	-6,2	45,9	11,0	1,25	-0,33	0,52
EXP	-0,48	-2,4	7,74	9,9	1,25	-0,33	0,46
EXP	0,23	1,8	6,94	10,4	1,75	-0,33	0,49
LIN2	-9,09	-7,7	72,4	12,5	1,25	-0,5	0,62



Kuva II.14. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva lineaarimalli 25 kierroksen rapaumalle.



Kuva II.15. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva eksponenttimalli 25 kierroksen rapaumalle.

Lineaarimallit ja paremman korrelaation eksponenttimalli ovat muotoa

$$\Delta V_{100} = -6,8 + 45,9 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,33} \quad \text{ja} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta V_{100} = -9,1 + 72,4 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,50} \quad \text{ja} \quad (\text{II.13a})$$

$$\Delta V_{100} = \text{EXP} \left[0,23 + 6,94 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,75} / A^{0,33} \right] - 1 \quad , \quad (\text{II.14})$$

joissa

$$\frac{W + A}{S_{RED}} = \frac{W + (A - 2) \cdot 10}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \quad (\text{II.15})$$

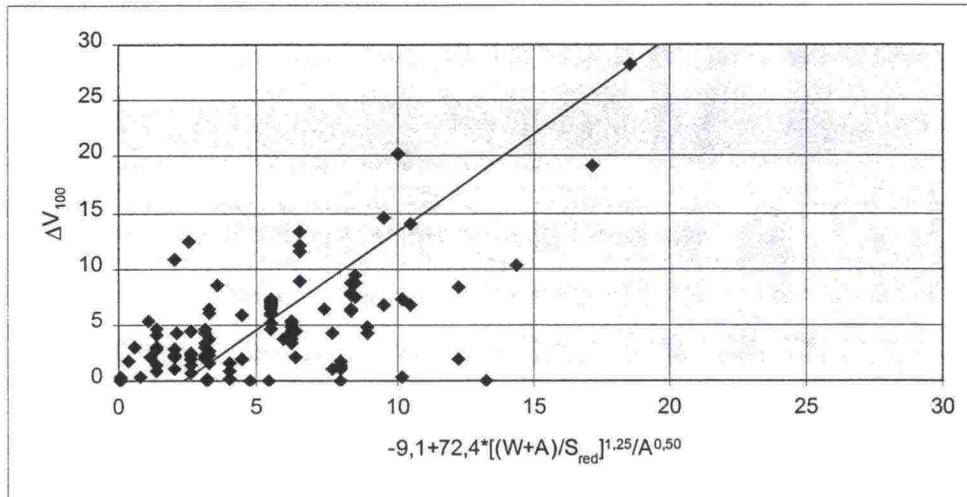
ja A on ilmamäärä (%).

Kuvassa II.16a on esitetty graafisesti paremman lineaarimallin sovitus tulosjoukkoon. Kuvassa II.16b on eksponenttimallin sovitus tulosjoukkoon. ja A on ilmamäärä (%).

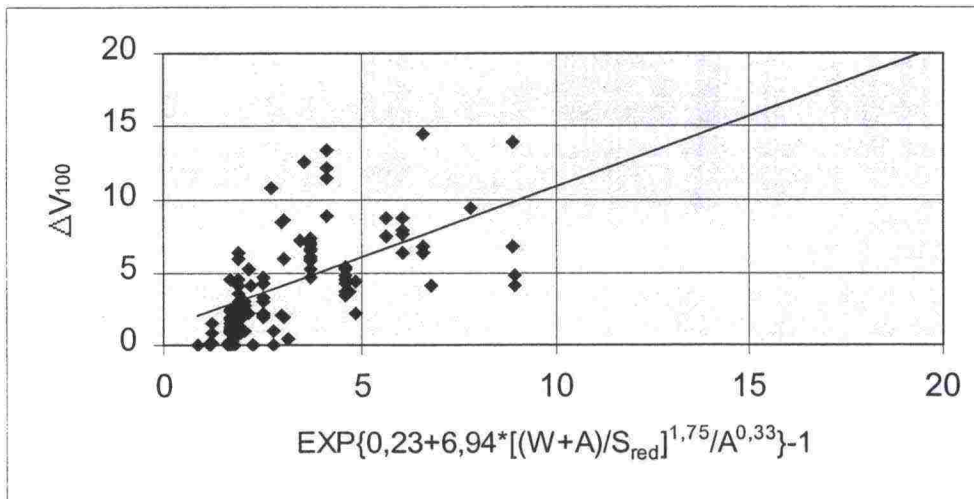
Eksponenttimalli sovitettiin 114 kokeen aineistossa myös 25, 50 ja 75 kierroksen rapauma-arvoille. Sovitefunktiona oli

$$\Delta V_x = \text{EXP} \left[k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{k_3} / A^{0,33} \right] - 1 \quad (\text{II.16})$$

jossa X on kierrosten lukumäärä. Kertoimet k_1 , k_2 ja k_3 sekä korrelaatioker-
toimen neliö on esitetty taulukossa II.14.



Kuva II.16a. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva lineaarimalli
100 kierroksen rapautumalle.



Kuva II.16b. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva eksponent-
timalli 100 kierroksen rapautumalle.

Taulukko II.14. Eksponenttimallin kertoimet 25...100 kierroksen rapautuma-
arvolle.

Kierrosmäärä	Kertoimien arvot			Korrelaatio
	k_1	k_2	k_3	R^2
25	-0,85	5,80	1,25	0,48
50	-0,52	6,63	1,42	0,53
75	-0,15	6,90	1,58	0,51
100	0,23	6,95	1,75	0,49

Taulukon II.14 k_3 -kertoimen muuttuminen osoittaa, että pakkassuolara-
paumakäyrän muoto ei ole lineaarinen. Taulukon II.14 arvoista voidaan joh-
taa P-luvulle kierrosmäärästä X riippuva funktio

$$P = \frac{4 \cdot X}{\text{EXP} \left\{ \frac{X}{75} - 1,13 + \left(5,7 + \frac{X}{75} \right) \cdot \left[\left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,08 + X / 150} / A^{0,33} \right] \right\} - 1} \quad (\text{II.17})$$

4.2.4 Vesisideainesuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli

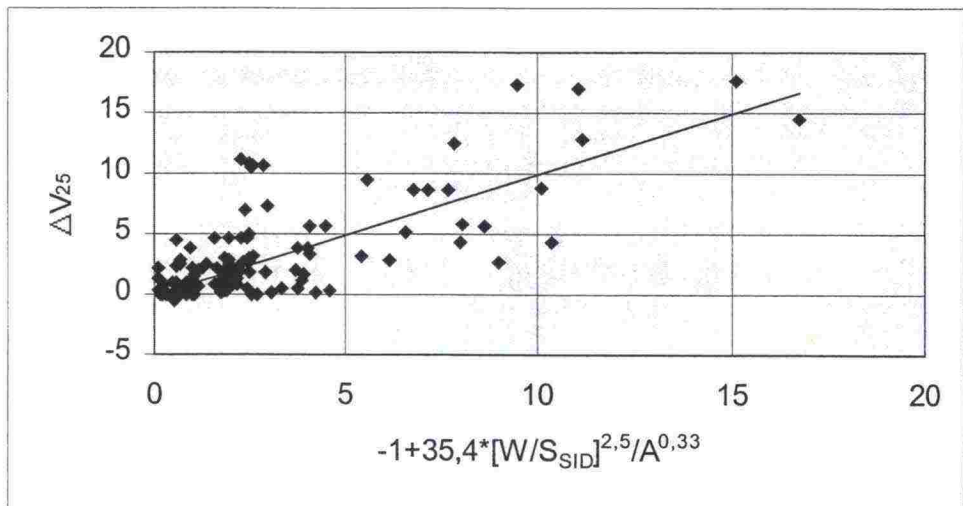
Vesisideainesuhteen (W/S_{SID}) ja ilmamäärän riippuvuutta 25 kierroksen pak-
kassuolakokeen arvosta tutkittiin sekä lineaarimallilla että eksponenttimallilla.
Paras korrelaatio ($R^2=0,57$) saatiin lineaarimallilla

$$\Delta V_{25} = -1,0 + 35,4 \cdot \left(\frac{W}{S_{SID}} \right)^{2,5} / A^{0,33}, \quad (\text{II.18})$$

jossa

$$\frac{W}{S_{SID}} = \frac{W}{Q_{OPC} + Q_{SIL} + Q_{LT} + Q_{KVO}} \quad (\text{II.19})$$

Kertoimien k_1 ja k_2 T-arvot olivat -3,9 ja 16,0. Kuvassa II.17 malli on esitetty
graafisesti.



Kuva II.17. Vesisideainesuhteeseen perustuva lineaarimalli 25 kierroksen ra-
pautumalle.

4.2.5 Redusoituun vesisideainesuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli

Redusoidun vesisideainesuhteen (W/S_{RED}) ja ilmamäärän riippuvuutta 25 ja 100 kierroksen pakkassuolakokeen arvosta tutkittiin sekä lineaari- että eksponenttimalleilla. Parhaat korrelaatiot saatiin lineaarimalleilla. Tulokset on esitetty taulukossa II.15.

Taulukko II.15. Redusoituun vesisideainesuhteeseen perustuvan lineaarimallin sovitus 25 ja 100 kierroksen pakkassuolakokeelle.

Kierrosmäärä	Parametrit/T-arvot				Kertoimet		Korrelaatio
	k_1	T_1	k_2	T_2	k_3	k_4	
25	-0,92	-3,6	33,5	16,2	2,5	-0,33	0,58
100	0,67	1,5	102,9	11,8	3,25	-0,33	0,56

Kuvassa II.18 ja II.19 on esitetty graafisesti $(W/S_{RED})^K / A^{0,33}$ riippuvuus 25 ja 100 kierroksen pakkassuolarapauksesta. Kuvien käyrät edustavat malleja

$$\Delta V_{25} = -0,9 + 33,5 \cdot \left(\frac{W}{S_{RED}} \right)^{2,5} / A^{0,33} \quad (II.20)$$

$$\Delta V_{100} = 0,65 + 103 \cdot \left(\frac{W}{S_{RED}} \right)^{3,25} / A^{0,33} \quad (II.21)$$

jossa

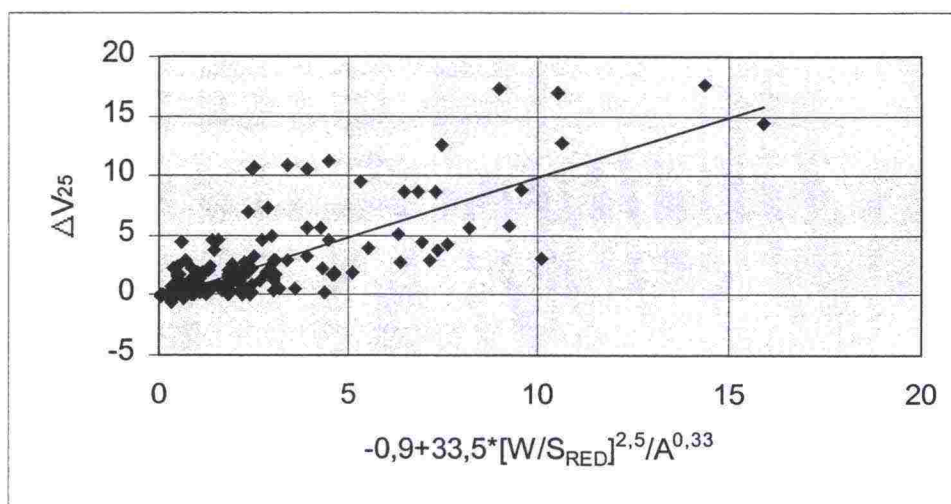
$$\frac{W}{S_{RE}} = \frac{W}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \quad (II.22)$$

ja A on ilmamäärä (%).

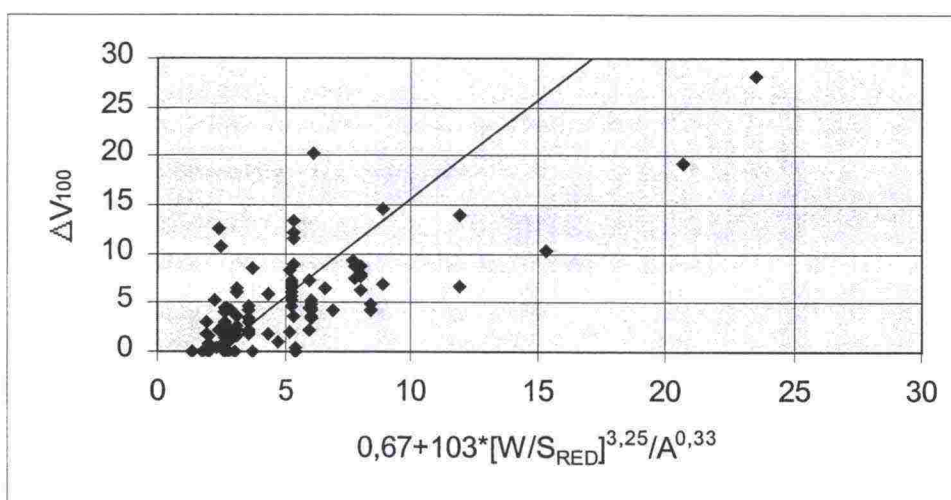
Lineaarimalli sovitettiin 110 kokeen aineistossa myös 25, 50 ja 75 kierroksen rapauma-arvoille. Sovitefunktiona oli

$$\Delta V_X = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{W}{S_{RED}} \right)^{k_3} / A^{0,33} \quad (II.23)$$

jossa X on kierrosten lukumäärä. Kertoimet k_1 , k_2 ja k_3 sekä korrelaatiokerroimen neliö on esitetty taulukossa II.16.



Kuva II.18. Redusoituun vesisideainesuhteeseen perustuva lineaarimalli 25 kierroksen rapautumalle.



Kuva II.19. Redusoituun vesisideainesuhteeseen perustuva lineaarimalli 100 kierroksen rapautumalle.

Taulukko II.16. Lineaarimallin kertoimet 25...100 kierroksen rapautuma-arvolle.

Kierrosmäärä	Kertoimien arvot			Korrelaatio R^2
	k_1	k_2	k_3	
25	-0,83	28,3	2,50	0,42
50	-0,55	47,1	2,75	0,57
75	0,04	69,5	3,00	0,59
100	0,67	102,9	3,25	0,56

4.2.6 Jälkihoidon ja vanhennusprosessien vaikutus pakkassuolakestävyyteen

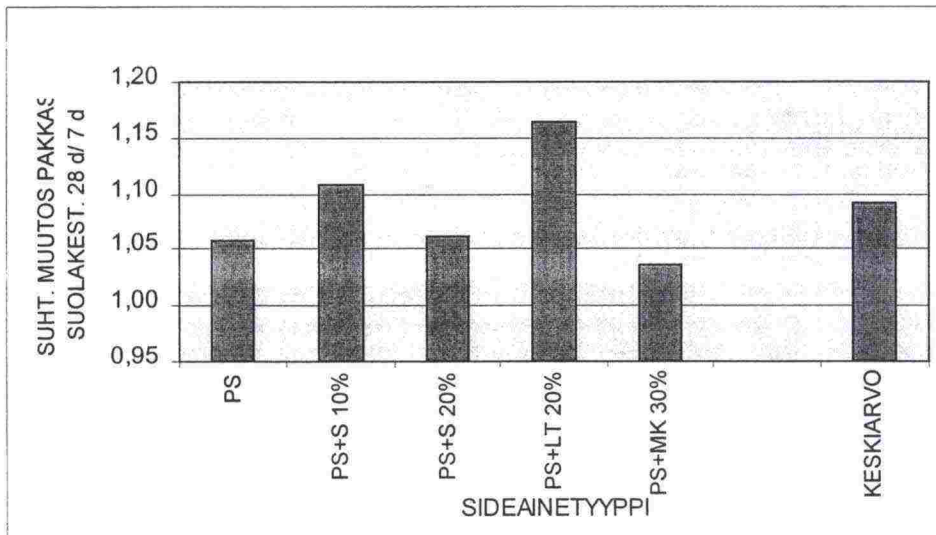
Edellisissä kappaleissa malli sovitettiin vain vesisideainesuhteeseen ja ilmamäärään. Jälkihoidon ja vanhennusprosessien vaikutusta ei sisällytetty malliin, koska tilastollisesti edustavaa koejoukkoa ei ollut käytettävissä.

Tämän vuoksi näiden tekijöiden vaikutus päätettiin ottaa huomioon kahdella kertoimella, joista toinen ottaa huomioon jälkihoitoajan ja toinen sideainetyypin.

Koeaineistona käytettiin tulosaineistoon sisältyville betoneille tehtyjä jälkihoitoajan ja eri vanhennusprosessien vaikutusta tutkivien kokeiden tuloksia. Todettakoon, että nämä koetulokset sisältyvät vesisideainesuhteisiin ja ilmamäärään perustuviin keskiarvomalleihin.

Jälkihoitoaika

Jälkihoitoajan pidentämisen vaikutus 7 vuorokaudesta 28 vuorokauteen käy ilmi kuvasta II.20. Siinä on esitetty keskiarvoina suhteelliset muutokset 100 kierroksen pakkassuolakokeessa eri sideainekoostumuksen ja eri vanhennusprosessit omaavilla betoneilla.



Kuva II.20. Jälkihoitoajan pidentäminen pakkasenkestävyyttä lisäävänä tekijänä.

Suhteellinen muutos pakkasenkestävyydessä riippuu jonkin verran sideainetyypistä. Silika- ja lentotuhkabetoneilla rapauma väheni 11 ja 16 %, kun jälkihoitoaika kasvatettiin 7:stä 28 vuorokauteen. Portlandsementti- ja kuonabetoneilla merkitys oli selvästi vähäisempi rapauma-arvojen vähetessä 6 ja 4 %. Keskimäärin jälkihoitoajan pidentäminen 7:stä 28 vuorokauteen vähentää rapaamaa 9 %.

Seitsemän vuorokauden jälkihoitoaika oli tilastollisen aineiston keskimääräinen jälkihoitoaika. Tämän vuoksi jälkihoitokerroin sovitettiin logaritmilausekkeeseen siten, että 7 vuorokauden jälkihoito antaa P-lukukaavaan jälkihoitokertoimelle k_{jh} arvon 1,0. Vastaavasti 28 vuorokauden jälkihoito sovitettiin

kertoimen keskimääräiselle arvolle 1,09. Näin menetellen jälkihoitokertoimelle saatiin funktio

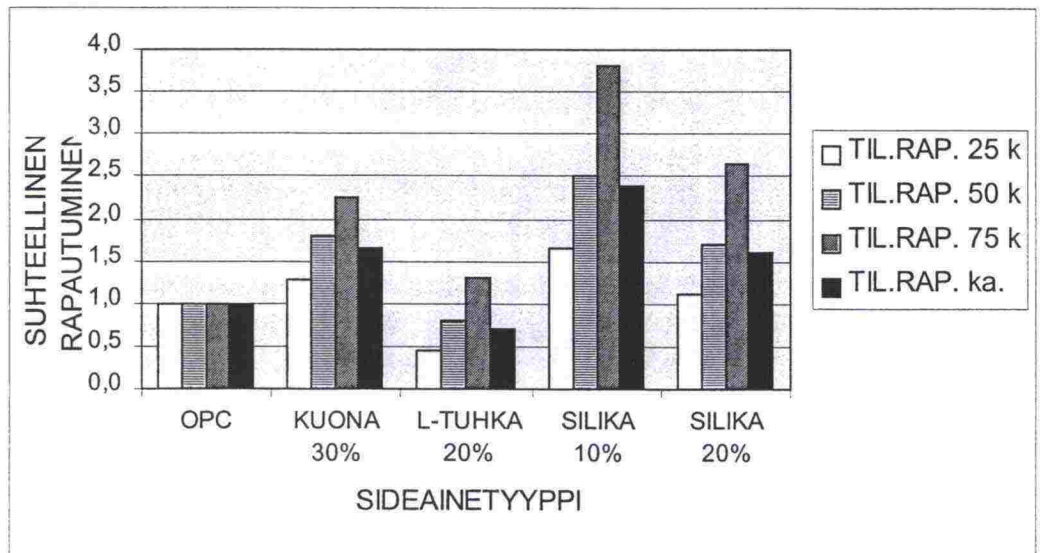
$$k_{jh} = 0,85 + 0,17 \cdot \log_{10}(t) \quad (II.24)$$

jossa t on jälkihoitoaika vuorokausina.

Koemenetelmän vaikutus

Tutkimusmateriaalin joukossa oli koeaineisto, jossa samoille betoneille koeket oli tehty pakkassuolakokeet sekä tavallisena pakkassuolakokeena että ns. kuivatuskokeena. Siinä koekappaleet oli kuivatettu aina 10 kierroksen välein viikon ajan 45 % suhteellisessa kosteudessa ja 20 asteen lämpötilassa ennen seuraavaa 10 syklin koejaksoa. Betoneiden vesisideainesusuhde oli 0,45 ja jälkihoitoajat 7 ja 28 vuorokautta. Sivutuotteiden prosenttiosuudet sideainemäärästä 400 kg/m³ olivat masuunikuonalle 30 %, lentotuhkalle 20 % ja silikajauheelle 10 ja 20 %. Kuvassa II.21 on esitetty kuivatuksen vaikutus 25, 50 ja 75 kierroksen pakkassuolarapaumaan suhteessa normaalikokeen rapaumaan merkitsemällä portlandsementtibetonin suhteellista rapaumaa arvolla 1.

Kuvasta II.21 havaitaan, että masuunikuonabetonilla pakkassuolarapauma kuivatuskokeessa oli keskimäärin noin 60 % suurempi kuin tavallisessa pakkassuolakokeessa. Silikabetonilla rapauma lisääntyi 140 %, kun silikapitoisuus oli 10 % ja noin 60 % 20 % silikapitoisuudella. Lentotuhkabetonilla, samoin kuin portlandsementtibetonilla, kuivatuskokeessa saatiin normaali-koetta parempia tuloksia.

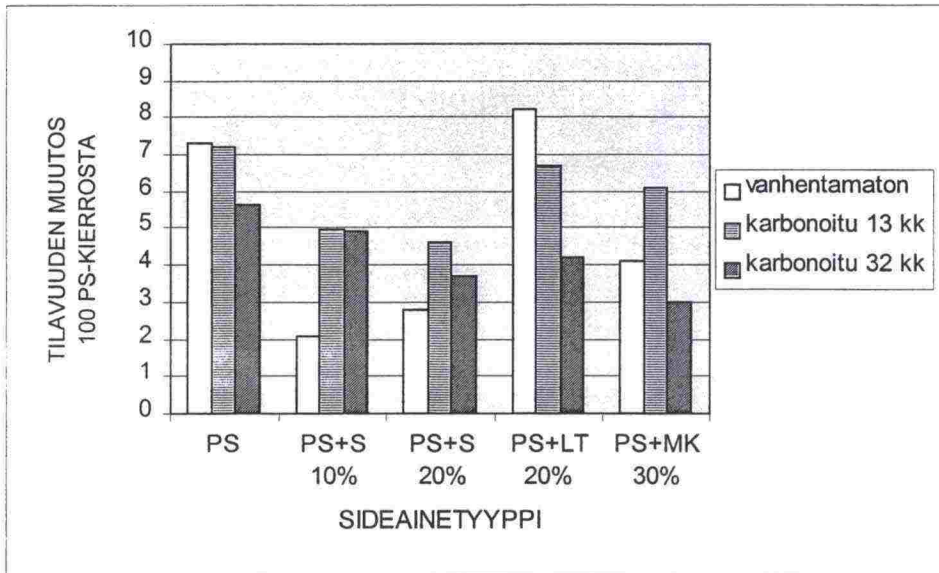


Kuva II.21. Kuivatuskokeessa havaittu pakkassuolarapauman muutos eri sivutuotebetoneilla.

Masuuni- ja silikabetonilla pakkassuolakestävyys heikkeneminen johtuu pakkasenkestävyyden kannalta vaarallisen, kuivaamattomana sulkeutuneena säilyneen huokosalueen avautumisesta kuivatuskäsittelyssä.

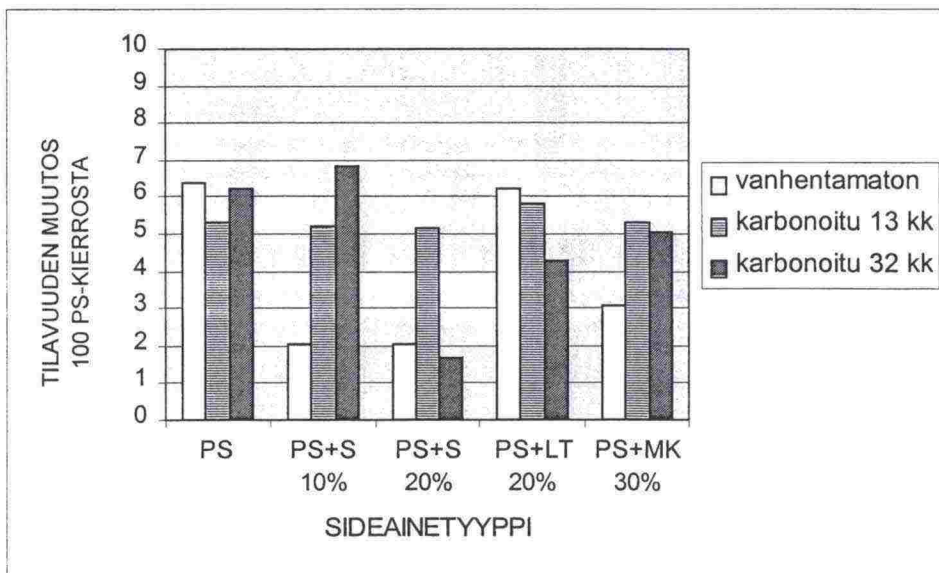
Vanhennusprosessien vaikutus

Kuvissa II.22 ja II.23 on esitetty 7 ja 28 vuorokauden jälkihoitoajoilla vanhentamattomilla ja 13 ja 32 kuukautta vanhennetuilla sivutuotebetoneilla tehtyjen pakkassuolakokeiden tuloksia. Histogrammien arvot on saatu siten, että ensin on laskettu rapaumaero 25 ja 75 kierroksen välillä ja sen jälkeen tämä arvo on muutettu vastaamaan 100 kierroksen tulosta. Näin menetellen kokeen alussa esiintyvän häiriön vaikutus on voitu eliminoida.



Kuva II.22. Vanhentamisen vaikutus 7 vuorokautta jälkihoidettujen betoneiden pakkassuolarapaumaan.

Taulukkoon II.17 on laskettu vanhennuksen vaikutus eri sideainekoostumuksen omaavien betoneiden pakkasenkestävyyteen. Taulukon arvot edustavat jälkihoitoaikojen keskiarvoja.



Kuva II.23. Vanhentamisen vaikutus 28 vuorokautta jälkihoidettujen betoneiden pakkassuolarapaumaan.

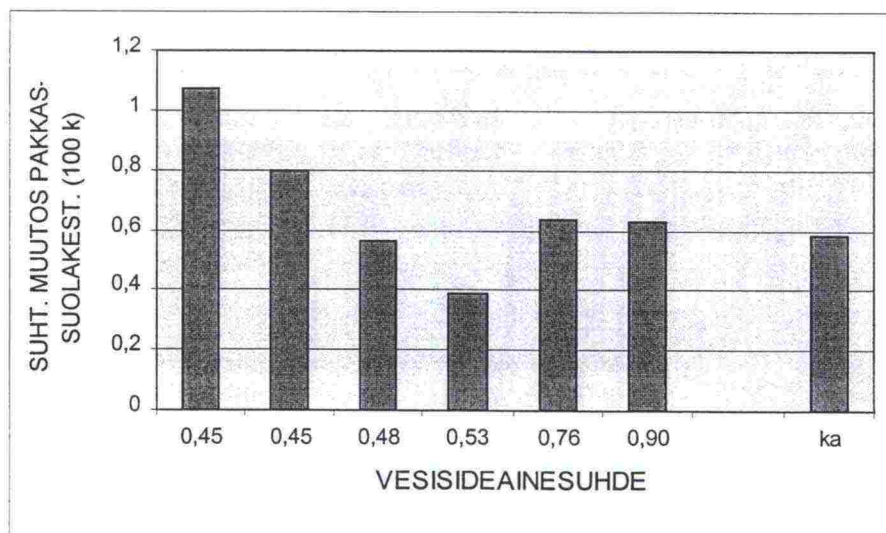
Taulukko II.17. Vanhennuksen vaikutus pakkassuolakestävyyteen.

Sideaine	VANHENNETTU / VANHENTAMATON		
	Vanhennus 13 kk	Vanhennus 32 kk	Keskiarvo
Portlandsementti	1,10	1,18	1,14
Silikaa 10 %	0,41	0,36	0,39
Kuonaa 30 %	0,64	0,91	0,78
Lentotuhkaa 20 %	1,15	1,71	1,43

Jos portlandsementin suhteellista muutosta merkitään 1:llä, silikabetonille saadaan kerroin 0,34, kuonalle 0,68 ja lentotuhkalle 1,25 taulukon II.17 seosaineprosenteilla.

Edelläesitetyt tulokset perustuivat samaan koeaineiston osaan kuin kuivatuskokeen ja normaalikokeen vertailukin. Seuraavaksi koeaineistosta erotettiin kaikki ne betonit, joille oli tehty tavallinen pakkassuolakoe jonkinasteisen vanhennuskäsittelyn jälkeen.

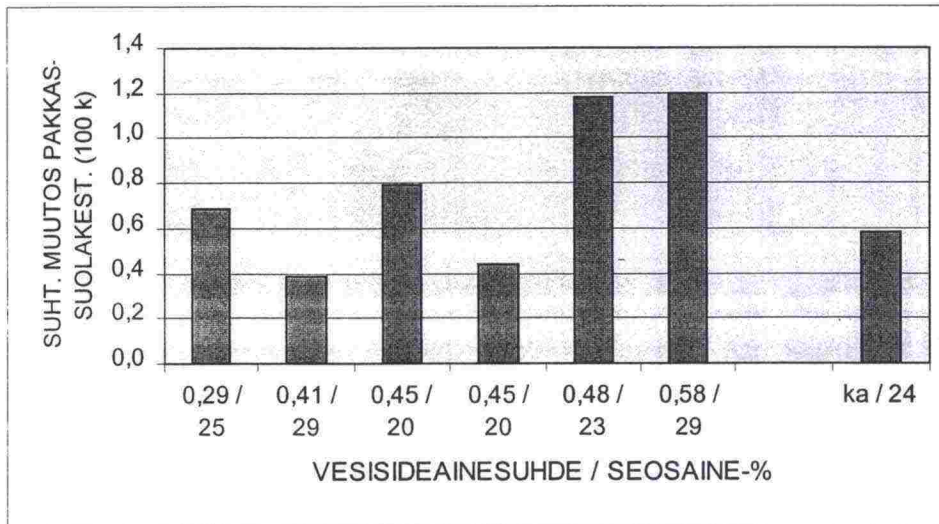
Kuvissa II.24, II.25, II.26 ja II.27 on esitetty portlandsementtibetonille, lentotuhkabetonille, masuunikuonabetonille ja silikabetonille vanhennetun ja vanhentamattoman betonin suhteellinen pakkassuolarapautuma 100 kierroksen kokeessa seosainemäärän ja vesisideainesuhteen funktiona. Kuvassa II.28 on esitetty vastaavat keskiarvotulokset eri seosainetyypeille.



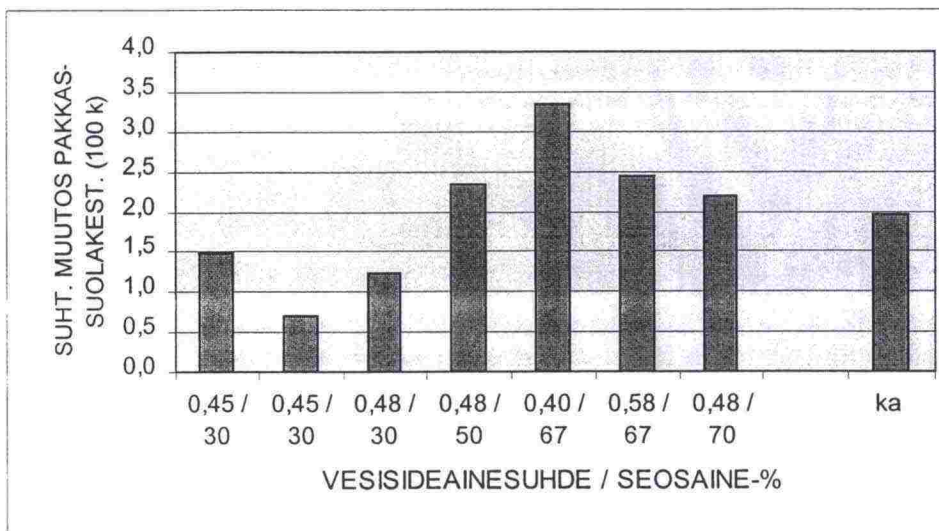
Kuva II.24. Vanhentamisen vaikutus pakkassuolarapautumaan.

Kuvien II.24-II.28 tarkastelu osoittaa portlandsementtibetonin pakkassuolakestävyden paranevan ikääntymisen seurauksena. Ainoastaan yhdessä kokeessa kuudesta rapauma lievästi (7%) lisääntyi vanhenemisen vaikutuksesta. Keskimäärin ikääntyminen paransi portlandsementtibetonin pakkassuolakestävyyttä noin 30 %.

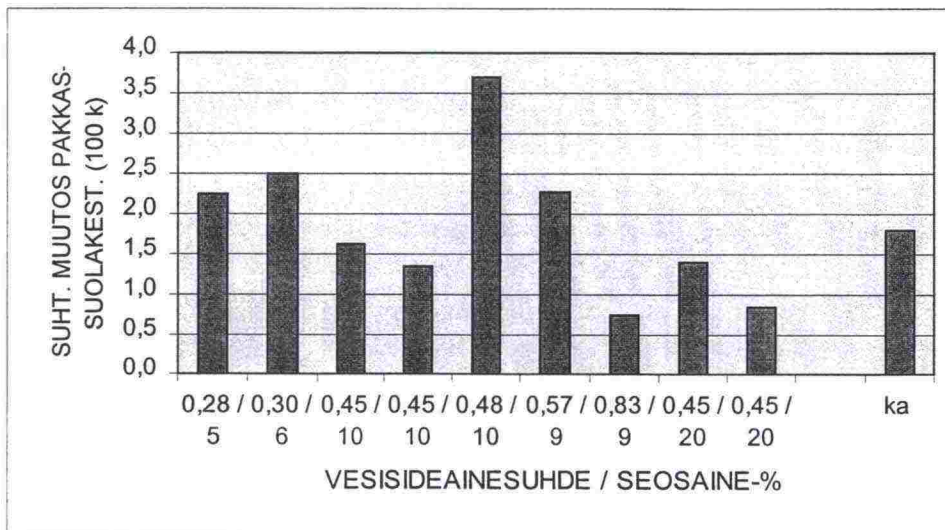
Vastaavat johtopäätökset voidaan tehdä myös lentotuhkabetonin ikääntymiskäyttäytymisestä. Koeaineiston kahdessa kokeessa kuudesta rapauma kasvoi noin 20 % ja neljässä pieneeni noin 30 % ikääntymisen seurauksena. Keskimäärin ikääntyminen paransi lentotuhkabetonin pakkassuolakestävyyttä noin 20 %.



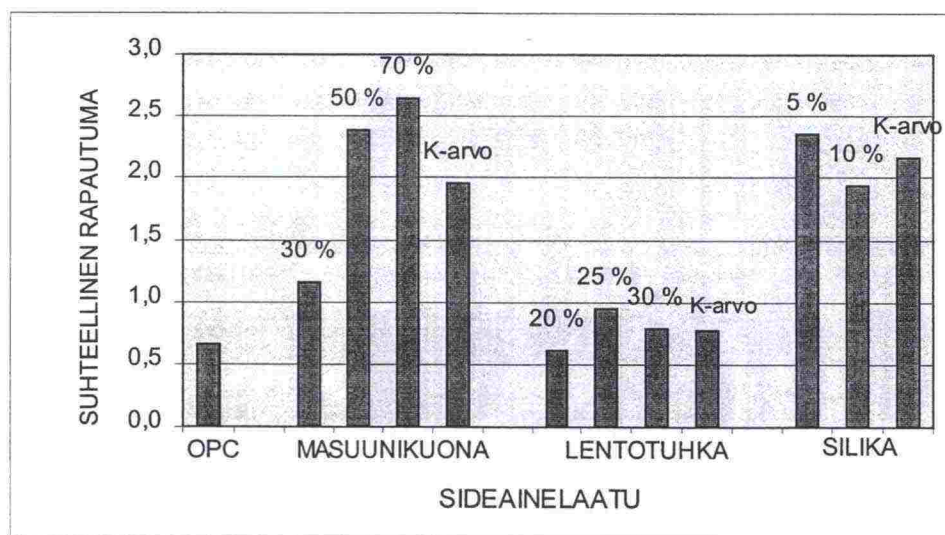
Kuva II.25. Vanhentamisen vaikutus lentotuhkabetoneiden pakkassuolarapautumaan.



Kuva II:26. Vanhentamisen vaikutus masuunikuonabetoneiden pakkassuolarapautumaan.



Kuva II.27. Vanhentamisen vaikutus silikabetoneiden pakkassuolarapautumaan.



Kuva II.28. Vanhentamisen vaikutus sivutuotebetoneiden pakkassuolarapautumaan jaoteltuina eri seosaineprosenttien mukaan. Diagrammin arvo edustaa vanhennetun ja vanhentamattoman betonin rapautumakeskiarvojen suhdetta 100 kierroksen kokeessa.

Vanhentaminen heikentää sekä silika- että masuunikuonabetonin pakkassuolakestävyttä selvästi verrattuna vanhentamattomaan betoniin. Masuunikuonabetonilla pakkassuolakestävyden heikkeneminen näyttäisi olevan verrannollinen seosaineprosenttiin. Kolmenkymmenen prosentin kuonapitoisuus näyttäisi heikentävän pakkassuolakestävyttä vajaat 20 %. Vastaavat heikennykset suuremmilla seosainepitoisuuksilla vaihtelevat 110-240 %. Keskimäärin ikäänntyminen heikensi masuunikuonabetonin pakkassuolakestävyttä noin 95 %.

Silikabetoneilla heikennyksen riippuvuutta seosainepitoisuudesta ei voida selvästi havaita. Tavanomaisilla vesisideainesuhteen arvoilla 0,45-0,57 noin 10 % silikapitoisuudella pakkasenkestävyys heikkeni 40-260 % keskiarvon ollessa kaikilla silikabetoneilla noin 80 %.

Taulukkoon II.18 on merkitty kuvien II.24 - II.27 eri keskimääräisten sideainekoostumuksien omaavien betoneiden absoluuttiset pakkassuolarauman arvot 10 kierroksen kokeessa. Taulukkoon on merkitty myös keskimääräiset seosaineprosentit, vesisideainesuhteet, ilmamäärät ja 28 vuorokauden nimellislujuutta vastaavat arvot ja pakkasenkestävyysluku laskettuna 100 kierroksen rapauma-arvosta. Taulukkoon on merkitty sulkuihin vesisideainesuhdetta 0,50 ja ilmamäärää 5,0 % vastaava pakkasenkestävyysluku, joka on saatu laskennallisesti vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuvasta rapaumakaavasta redusoidulla lisäksi rapauma-arvo vastamaan taulukon mitattua keskimääräistä rapauma-arvoa.

Taulukko II.18. Vanhennuksen vaikutus pakkassuolakestävyyteen.

Sideaine	Portland- sementti	Silikajauhe	Masuuni- kuona	Lentotuhka
Seosaineprosentti	0	10	49	24
Vesisideainesuhte	0,53 (0,5)	0,47 (0,5)	0,48 (0,5)	0,42 (0,5)
Ilmamäärä (%)	5,7 (5)	4,6 (5)	5,5 (5)	5,4 (5)
Lujuus (K28) (MPa)	37	54	37	42
Rapautuma-% (100 kierr.)	4,6	5,7	9,6	4,5
Pakkasenkestävyysluku	87 (94)	70 (65)	42 (38)	89 (67)

Taulukon II.18 keskenään vertailukelpoisista sulkuihin merkityistä pakkasenkestävyysluvuista voidaan päätellä, että vanhennetun keskimäärin 10 % siliikkaa ja 24 % lentotuhkaa sisältävän betonin pakkasenkestävyys on noin 30 % huonompi kuin portlandsementtibetonin pakkasenkestävyys. Vastaavasti keskimäärin 49 % masuunikuonaa sisältävän betonin pakkasenkestävyys vanhennuksen jälkeen on vain noin 40 % portlandsementtibetonin pakkasenkestävyydestä.

Edellämainituista arvoista lähtien johdettiin sivutuotteista riippuva vanhennuskerroin, jonka oletettiin kulkevan lineaarisesti keskimääräisen seosaineprosentin ja seosaineprosentin 0 kautta. Eri seosaineiden kertoimien laskennassa otettiin huomioon seosaineen redusoidun vesi-ilmasideainesuhteen kautta pakkasenkestävyyteen vaikuttavat seosaineiden tehokkuuskertoimet (silikalle 2,5, masuunikuonalle 0,8 ja lentotuhkalle 0,3).

Vanhennuskerrointa kuvaava kaava kalibroitiin siten, että portlandsementillä kerroin saa arvon 1. Keskimääräinen suhteellinen vanhennuskerroin laskettiin siten, että rapaumamallissa mukana olevilla koeaineiston eri

sideainekoostumuksen omaavien betoneiden lukumäärillä (kuva II.1) painotettiin kyseisen sideainekoostumuksen keskimääräistä suhteellista vanhenuskertoimta. Näin menetellen saatiin koko tulosaineiston keskimääräiseksi vanhennuskertoimeksi 1,43, kun portlandsementtibetonin vanhennuskertoimta merkitään 1:llä. Kun tämä kerrotaan portlandsementtibetonin keskimääräisellä vanhennuskertoimella 0,68 saadaan portlandsementtibetonin suhteen kalibroiduksi vanhennuskertoimeksi arvo 0,97. Havaittu 3 % ero voitaneen jättää lopullisen mallin varmuusmarginaaliksi.

Edellämainitulla tavalla menetellen saatiin sideainekoostumuksen ja vanhennuskertoimen välille kaavan II.25 mukainen yhteys.

$$k_{VA} = 1 - 0,045 \cdot P_{sil} - 0,008 \cdot P_{kuo} - 0,001 \cdot P_{lt} \quad (II.25)$$

jossa P_{sil} , P_{kuo} ja P_{lt} ovat silikan, kuonan ja lentotuhkan seosaineprosentit sideaineen kokonaismäärästä.

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Pakkaskestävyyskokeiden vertailu

Taulukkoon II.19 on kerätty eri pakkaskestävyyskokeiden antamien tulosten keskinäiset Pearssonin korrelaatiokertoimen neliöt parhaasta kohdassa 4.1 esitetystä sovitteesta.

Suojahuokoskoe, kapillaarikoe, ilmahuokoskoe ja dilaatiokoe korreloivat keskenään tyydyttävästi (korrelaatiokertoimen neliö suurempi kuin 0,8). Samoin jäädytyssulatuskokeen ja ultraäänikokeen keskinäistä korrelaatiota voidaan pitää tyydyttävänä.

Sen sijaan kapillaarikoe korreloi heikosti ($0,4 < R^2 < 0,8$) jäädytyssulatuskokeen, ultraäänikokeen, dilaatiokokeen ja ilmahuokoskokeen kanssa.

Taulukko II.19. Pakkaskestävyyskokeiden keskinäinen riippuvuus.

Pakkas- kestävyyskoe	Korrelaatiokerroin R^2					
	PS-koe	SH-koe	KAP-koe	JS-koe	UÄ-koe	IH-koe
PS-koe	1	0,05	0,06	0,03	0,29	0,02
SH-koe	0,05	1	0,84	0,22	-	0,80
KAP-koe	0,06	0,84	1	0,69	0,37	0,41
JS-koe	0,03	0,22	0,69	1	0,79	-
UÄ-koe	0,29	-	0,37	0,79	1	-
IH-koe	0,02	0,80	0,41	-	-	1
DIL-koe	0,59	0,81	0,40	-	-	0,89

Pakkassuolakokeen ja muiden pakkaskestävyyskokeiden välille ei löydetty tyydyttävää korrelaatiota. Heikko korrelaatio $R^2=0,59$ löytyi pakkas-

suolakokeen ja toisen suoran pakkasenkestävyyskokeen dilaatiokokeen välille.

Pakkassuolakokeen heikko korrelaatio muiden säilyvyyskokeiden kanssa ei sinänsä ole yllättävää. Muut tutkimuksessa olleet suorat pakkasenkestävyyden testausmenetelmät ilmentävät betonin sisäistä vaurioitumista, kun taas pakkassuolakokeessa kestävyyskriteerinä on pinnan rapautuminen suolarasituksessa. Yllättävää tuloksissa oli se, että huokosjaon ja pakkassuolakokeen rapauma-arvon välille ei löytynyt minkäänlaista, edes heikkoa korrelaatiota (kuva II.10b).

5.2 Mallien tarkastelu

5.2.1 Redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli

Redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuvissa malleissa paras korrelaatio 100 kierroksen pakkassuolarapaumaan ΔV_{100} oli lineaarimallilla 0,56. Malli oli muotoa

$$\Delta V_{100} = 0,67 + 103 \cdot \left(\frac{W}{S_{RED}} \right)^{3,25} / A^{0,33} \quad (II.26)$$

jossa

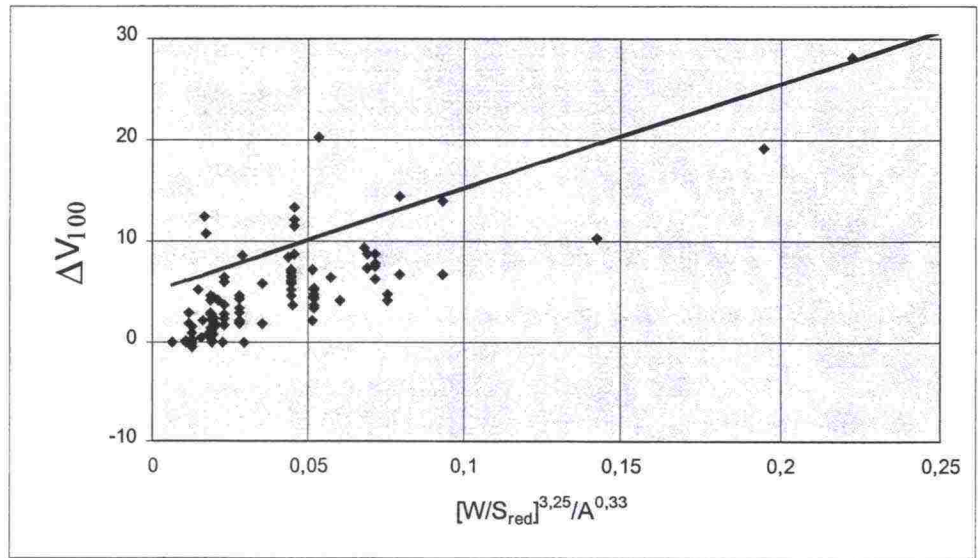
$$\frac{W}{S_{RED}} = \frac{W}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \quad (II.27)$$

ja A on ilmamäärä (%) ja ΔV_{100} tilavuuden muutos 100 kierroksen pakkassuolakokeessa.

Edellä esitetty malli, kaava II.26 edustaa rapauman keskiarvokäyrää (kuva II.19). Kuvassa II.29 kuvan II.19 käyrää on nostettu siten, että 90 % tapauksista kokeen rapauma-arvo jää mallin antamaa arvoa pienemmäksi.

Tällöin malli saa muodon

$$\Delta V_{100} = 5 + 103 \cdot \left(\frac{W}{S_{RED}} \right)^{3,25} / A^{0,33} \quad (II.28)$$



Kuva II.29. Redusoituun vesisideainesuhteeseen perustuva lineaarimalli 100 kierroksen rapaumalle.

Kun P-luvun peruskaavaan sijoitetaan edellä esitetty rapaumakaava ja kohdassa 4.2.3 kehitetyt jälkihoito- ja sideainekertoimet, saadaan redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva tuoreen betonin P-luku-kaava

$$P = \frac{400 \cdot (0,85 + 0,17 \cdot \log_{10}(t)) \cdot (1 - 0,045 \cdot P_{sil} - 0,008 \cdot P_{kuo} - 0,001 \cdot P_{lt})}{5 + 103 \cdot \left(\frac{W}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \right)^{3,25} / \sqrt[3]{A}} \quad (II.29)$$

Kaavassa (II.29)

- t on jälkihoitoaika vuorokausina,
- P_{sil} on silikan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
- P_{kuo} on masuunikuonan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
- P_{lt} on lentotuhkan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
- W on vesimäärä (kg/m^3),
- A on tuoreen betonin ilmamäärä (%),
- Q_{OPC} on portlandsementtimäärä (kg/m^3),
- Q_{SIL} on silikamäärä (kg/m^3),
- Q_{LT} on lentotuhkamäärä (kg/m^3) ja
- Q_{KUO} on masuunikuonamäärä (kg/m^3).

5.2.2 Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva malli

Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuvissa malleissa parhaat korrelaatiot 100 kierroksen pakkasuolarapaumaan ΔV_{100} olivat lineaarimallilla 0,62 (II.13a) ja 0,52 (II.30) ja eksponenttimallilla 0,49.

Mallit olivat muotoa

$$\Delta V_{100} = -9,1 + 72,4 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,50} \quad (\text{II.13a})$$

$$\Delta V_{100} = -6,8 + 45,9 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,33} \quad (\text{II.30})$$

$$\Delta V_{100} = EXP \left[0,23 + 6,94 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,75} / A^{0,33} \right] - 1 \quad (\text{II.31})$$

joissa

$$\frac{W + A}{S_{RED}} = \frac{W + (A - 2) \cdot 10}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \quad (\text{II.32})$$

ja A on ilmamäärä (%) ja ΔV_{100} tilavuuden muutos 100 kierroksen pakkasuolakokeessa.

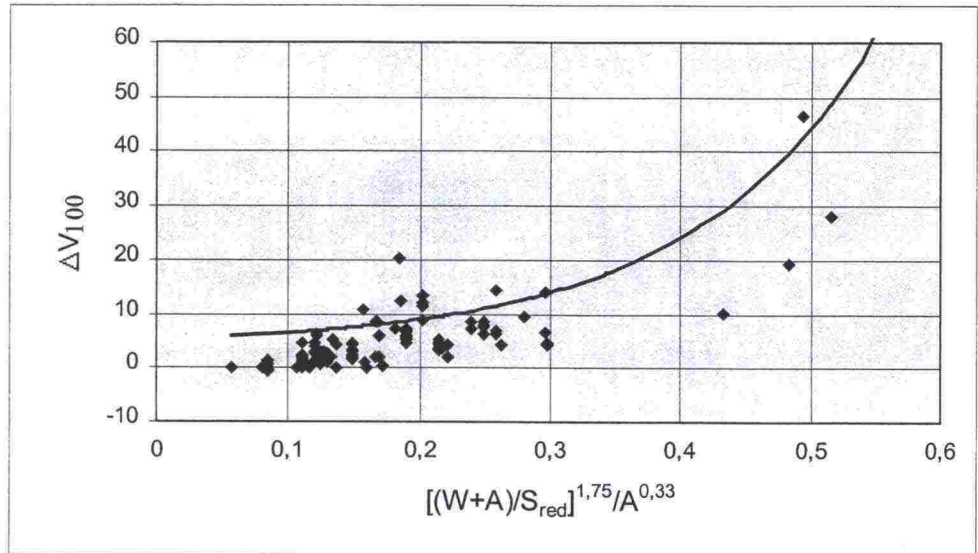
Edellä esitetty eksponenttimalli edustaa rapauman keskiarvokäyrää (kuva II.16b). Kuvassa II.30 kuvan II.16b käyrää on nostettu siten, että 90 % tapauksista kokeen rapauma-arvo jää mallin antamaa arvoa pienemmäksi.

Tällöin eksponenttimalli saa muodon

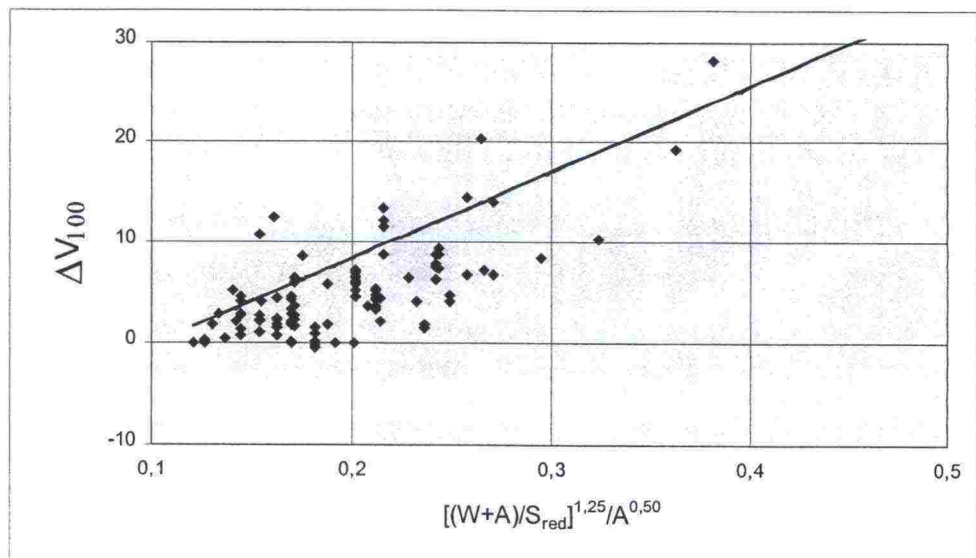
$$\Delta V_{100} = EXP \left[0,23 + 6,94 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,75} / A^{0,33} \right] + 4 \quad (\text{II.31a})$$

Lineaarimalli (kaava II.13a) edustaa rapauman keskiarvokäyrää (kuva II.16a). Kuvassa II.31 kuvan 16a käyrää on nostettu siten, että 90 % tapauksista kokeen rapauma-arvo jää mallin antamaa arvoa pienemmäksi. Tällöin lineaarimalli saa muodon

$$\Delta V_{100} = -8,7 + 85,7 \cdot \left(\frac{W + A}{S_{RED}} \right)^{1,25} / A^{0,50} \quad (II.33)$$



Kuva II.30. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva eksponenttimalli 100 kierroksen rapautumalle.



Kuva II.31. Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen perustuva lineaarimalli 100 kierroksen rapautumalle.

Kun P-luvun peruskaavaan sijoitetaan edellä esitetty rapaumakaava (II.33) ja kohdassa 4.2.3 kehitetyt jälkihoito- ja sideainekertoimet, saadaan redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuva tuoreen betonin P-lukukaava

$$P = \frac{46 \cdot [0,85 + 0,17 \cdot \log_{10}(t)] \cdot [1 - 0,045 \cdot P_{sil} - 0,008 \cdot P_{kuo} - 0,001 \cdot P_{lt}]}{10 \cdot \left(\frac{W + (A-2) \cdot 10}{Q_{OPC} + 2,5 \cdot Q_{SIL} + 0,3 \cdot Q_{LT} + 0,8 \cdot Q_{KUO}} \right)^{1,25} \cdot \sqrt{A-1}} \quad (II.34)$$

Kaavassa (II.34)

t	on jälkihoitoaika vuorokausina,
P_{sil}	on silikan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
P_{kuo}	on masuunikuonan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
P_{lt}	on lentotuhkan prosenttiosuus sideaineen kokonaismäärästä,
W	on vesimäärä (kg/m^3),
A	on tuoreen betonin ilmamäärä (%),
Q_{OPC}	on portlandsementtimäärä (kg/m^3),
Q_{SIL}	on silikamäärä (kg/m^3),
Q_{LT}	on lentotuhkamäärä (kg/m^3) ja
Q_{KUO}	on masuunikuonamäärä (kg/m^3).

5.3 Mallin valinta

Redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuvan mallin (kaava II.34) ja redusoituun vesisementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuvan mallin (kaava II.29) korrelaatiot pakkassuolakokeen 100 kierroksen rapautuman suhteen olivat samaa suuruusluokkaa, 0,62 ja 0,56. Molemmat mallit antavat huokostetulle betonille tavanomaisella vesisideainesuhdealueella 0,40-0,60 lähes yhteneväiset P-luvut.

Molemmissa malleissa hajonnat ovat varsin suuret (kuvat II.29 ja II.31). Tämä on selitettävissä laajalla lujuusalueella (20...100 MPa) ja laajoilla vesisideainesuhteen ja ilmamäärän vaihtelualueilla. On lisäksi huomattava, että koeaineisto oli koottu pitkällä, noin 10 vuoden aikajänteellä eri laboratorioissa tehdyistä säilyvyyskokeista, jolla on luonnollisesti hajontaa lisäävä vaikutus. Suhteitustietojen osalla vaikeutena oli lisäksi puutteelliset tiedot runkoaineen raejakaumasta ja maksimirunkoaineen kokoluokasta, joilla on tietty vaikutus tulosten hajontaan.

Tulosten perusteella lopulliseksi tuoreen betonin P-lukukaavaksi päätettiin valita lievästi paremmin pakkassuolarapautumaan korreloiva redusoituun vesi-ilmasementtisuhteeseen ja ilmamäärään perustuvan malli (kaava II.34).

6 KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Betonirakenneohjeet. Tiehallinto, Siltayksikkö, TIEL 2172073. Helsinki 2000.
- /2/ Sementtistandardi SFS-EN 197-1. Sementti – Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus.
- /3/ Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma. B4 Betonirakenteet. Ohjeet 2001.
- /4/ Matala. S., 1990. Tuoreen betonin ominaisuuksiin perustuva pakkasenkestävyyden käyttöikämalli. Teknillinen korkeakoulu ja VTT. 54 s. Julkaisematon.

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-695-2
TIEL 3200632