

Tilaaaja: Liikennevirasto
Taitorakenneyksikkö

Asia: Selvitys Kostamontien alikulkusillan betonin alilujuuteen vaikuttaneista syistä

Muistion laatija: Seppo Matala/Matala Consulting

1. Tausta

Toukokuun 24.päivänä 2016 valettiin Kemijärvellä Kostamontien alikulkusilta. Silta on jännitetty 31.5.2016. Jännittämisen yhteydessä ankkurit painuivat betoniin 8-12 mm. Lisäksi ankkurialueella sillan päät halkeilivat.

Liikennevirasto on pyytänyt muistion laatijalta lausuntomuistiota asiasta.

Muistio perustuu Liikenneviraston asian yhteydessä toimineilta yrityksiltä saatuihin tietojen ja selvityksiin ja Liikenneviraston tilaamien lisätutkimusten ja -kokeiden tuloksien arviointiin.

2. Ennakkokokeet ja työaikainen laadunvalvonta ja niiden tulokset

Kohteen betonin C40/50 P30 on toimittanut Rudus Oy ja valutyöstä on vastannut Mestek Oy. Kohteen pääurakoitsijana on VR Track Oy.

Ennen betonivalua InfraRYL:n mukaan käytettävästä betonilaadusta on toimitettava tilaajan edustajalle betonin suhteitustiedot ja ennakkokokeiden tulokset. Ennakkokokeina tulee tehdä vähintään betonin nimellislajuuden testaus sekä P-lukubetonin ennakkokoe joko suoralla pakkassuolakokeella tai huokosjakomäärityksenä. Lisäksi laatuvaatimukseksi on asetettu yleinen lisäaineiden yhteensopivuuden ja kuljetuskestävyyden todentaminen. Ennakkokokeista lisäksi edellytetään, että ne eivät saa olla vuotta vanhempia.

Tämän raportin laatijan käyttöön luovutetun laadunvalvonta-aineiston joukossa ei ole mitään edellä esitettyjen ja laatuvaatimuksissakin edellytettyjen ennakkokokeiden tuloksia.

P-lukubetonin ja jälkijännitetyn rakenteen kyseessä ollen työaikaisista laadunvalvontatoimista edellytetään muun muassa:

- Betonin ilmamäärän mittausta työmaalla 5 ensimmäisestä kuormasta ja sen jälkeen joka kymmenennestä mikäli laatu pysyy tasaisena.
- Betonin jälkihoitoa siten, että saavutetaan vähintään 7 vuorokauden kostejälkihoitoa vastaava taso.
- Jännittämistä varten betonin lujuudenkehitystä tulee seurata jännittämislujuuden varmistamiseksi. Kohteen suunnitelmissa jännittämislujuudeksi on merkitty monitulkintaisesti C40. Se ehkä tarkoittaa 40 MPa jännittämislujuutta.

Kohteen betonointipöytäkirjaan ei ole kirjattu työmaan laadunvalvontakokeita tai otettavien kelpoisuuskokeiden määriä. On tietenkin mahdollista, että ne on kirjattu toisaalle.

Betonin koostumus ilmoitettujen suhteustietojen perusteella

Liikennevirastolla ei ole tiedossa onko tilaajan valvojalle ilmoitettu InfraRYL kohdan 42020.1.1.4.3 mukaiset betonin suhteustiedot (InfraRYL 42020:liite1). Betonin koostumuksen arviointi jää betonin valmistajan ilmoittaman P-lukulaskennan tietojen ja yhden suhteitusohjelmatulosteen varaan (Taulukko 1).

Tulosteen mukaan betonin tehollinen vesimäärä on ollut 192 kg/m³. P-lukulaskentatulosteessa teholliseksi vesimääräksi on ilmoitettu kuitenkin 179-180 kg/m³ ja ilmamääräksi 4,6 %. Suhteitusohjelmassa ilmamääränä on käytetty 5 %. Suhteitusohjelman mukaan tehollinen vesisementtisuhte on 0,458 ja P-lukulaskennassa se on 0,427.

Taulukko 1. Betonin valmistajan ilmoittama suhteitusohjelman tuloste.

Suhteita		BetasRAS-tuoteominaisuussiirto						
		Talleta reseptit automaatiikalle				Talleta reseptit tietokantaan		
Aine	Osuus/ %	Tehollin	Tilavuus	Absorbt	Puhdas	Kosteus	Ann.vesi/ kg/m ³	Annostelutavoite/
Vesi		188,6	188,6		191,9		140,9	140,9
Ilma			50,0					
Plus	100,0	419,1	135,2		419,1			419,1
hiekkä	70,0	1170,2	437,4	0,2	1167,8	3,5	40,9	1208,7
kivi	30,0	501,5	187,5	0,2	500,5	1,0	5,0	505,5
Sika RSX 25%	1,1000	1,15	0,93		1,15		3,46	4,61
Air-Pro V5	0,1000	0,42	0,42		0,42		1,68	2,10
YHTEENSÄ		2281,0	1000,0		2281,0		191,9	2281,0

Sementtinä on käytetty Plus-sementtiä, lisäaineina Sika RSX 25%- nesteytintä ja Air-Pro V5- huokostinta.

Liikennevirastolle toimitettu kiviaineksen rakeisuutta kuvaavat läpäisyprosentit eri fraktiolla osoittavat yhdistekiviaineksen olevan erittäin hienoa enimmäisläpimitaltaan 16 mm koostekiviainekselle. Kiviaineksen 11 mm läpäisy-% on 98 ja 8 mm läpäisy-% on 90.

Betoni ilmamäärä

Ilmamäärät on työmaalla mitattu ohjeiden mukaisin välein yhteensä 10 kuormasta. Ilmamäärät ovat erittäin tasaisia vaihdellen 5,6 ja 6,6 % välillä keskiarvon ollessa 6,1 ja hajonnan 0,3 %. Valmisbetonitehtaalla mitatut ilmamäärät vaihtelivat 3,5 ja 6,9 % välillä keskiarvon ollessa 5,1 ja hajonnan 1,0 %.

Kahdeksan ensimmäistä ilmamittausta ovat sekä tehtaalla että työmaalla samoista kuormista; tehtaalla keskiarvo 5,3 % ja hajonta 0,8 %. Työmaatuloksien keskiarvo oli 6,1 % ja hajonta 0,4 %.

Betonin kuljetusaika on mittaustulosten keloaikojen perusteella ollut 1,31 - 2,3 tuntiin. Kuljetuksen aikana ilmamäärä on lisääntynyt keskimäärin vain 1 %-yksikköä.

Kuvaan 1 on koottu betoninvalmistajan ilmoittamat ilmamittausten tulokset tehtaalla ja työmaalla.

Työmaa ilmoitt. Haus

kello	kuormakirja	numero	ilma	huom
4:53	26800242		5,2	
5:24	26800243		4,6	
5:55	26800244		5,9	
6:31	26800245		5,0	
7:00	26800246	21	6,9	
10:22	26800256	22	5,7	
12:23	26800260	23	4,5	
15:32	26800271	24	4,7	
16:52	26800282	25	3,5	
7:10	26800242		6,4	
7:35	26800243		5,6	
7:45	26800244		6,3	
8:05	26800245		6,5	
8:20	26800246	1	6,1	
12:15	26800256	2	5,8	
13:40	26800260	3	5,7	
17:00	26800271	4	5,6	
17:30	26800272	5	6,1	
18:15	26800277	6	5,9	

Kuva 1. Betoninvalmistajan ilmoittamat tehtaalla ja työmaan ilmamittausten tulokset

Lujuus jännittämishetkellä

Laadunvalvonnan tuloksina on ilmoitettu kuvassa 2 esitettyjä puristuslujuustuloksia.. Nähtävästi tulokset edustavat 150 mm lierön testaustuksia 7 vuorokauden ikäisinä. Tuloksista ei käy ilmi onko lujuudet muutettu kuutiolujuuksiksi vai ovat ne lierölujuuksia. Nähtävästi alkupään tulokset ovat tehdastuloksia ja loppupään tulokset tunnuksella OLO työmaalla säilytettyjen koekappaleiden tuloksia.

Jos ilmoitetut ötehdaslujuudet ovat kuutiolujuuksia, betoni ei ole saavuttanut jännittämislujuuksia 7 vuorokauden iässä. Öolosuhdekoekappaleiden lujuudet eivät täytä jännittämislajuuden vaatimuksia olivatpa ne kuutio- tai lieriölujuuksia.

Ötehdaskoekappaleiden tiheydet ovat selvästi työmaakoekappaleiden tiheyksiä suuremmat. Tehdaskoekappaleiden tiheydet tunnuksesta 21/7 alkaen tunnukseen 25/7 ovat 2317-2396 kg/m³ keskiarvolla 2359 kg/m³. Tehdaskoekappaleiden tiheyskeskiarvo 2359 kg/m³ on hieman suurehko betonille, jonka ilmamäärä on suhteituksen mukainen 5 %. Olosuhdekoekappaleiden tiheydet tunnuksesta olo2 tunnukseen olo6 ovat 2147-2200 kg/m³ keskiarvolla 2166 kg/m³. Tiheyksien ero on niin suuri, että se vastaa noin 8 %-yksikön ylimääräistä ilmaa verrattuna tehdaskoekappaleisiin. Luonnollisesti jo lujuudet viittaavat samaan ilmiöön. Tämä havainto asettaa työmaamittauksien ilmamääräarvojen luotettavuuden ja oikeellisuuden tiettyyn valoon.

Betonin lujuudenkehitystä on arvioitu myös laskennallisesti BetoPlus-ohjelmalla lämpötilakehityksen perusteella. Laskenta antaa 6 vuorokauden iässä lujuustason 37-40 MPa. Laskennasta ei selviä, mikä on ollut betonin oletusilmamäärä laskennassa.

KPL	PINTA-ALA	KN LUKEMA	KN LUKEMA/ P-ALA	LUJUUS	PAINO	TIHEYS	K-
20/7	177	44,6	784,6	54,5	12969	2436	
15/20	177	36,4	642,4	46	12860	2482	
21/7	177	37,5	663,7	47,5	12283	2317	
22/7	177	38,4	678,4	48,5	12436	2346	
23/7	177	36,3	641,3	46,0	12663	2389	
24/7	177	34,6	612,5	44,0	12448	2348	
25/7	177	41,2	727,6	51	12702	2396	
0101	177	8	137,7	~10	9907	1869	Hox!
0102	177	24	424,2	29	11437	2157	
0103	177	24,8	438,3	30	11472	2164	
0104	177	23,3	412	28,0	11660	2200	
0105	177	20,8	368,3	26	11380	2147	
0106	177	22,7	402,1	28	11475	2165	

Kuva 2. Ilmoitettuja puristustestauksen tuloksia

3. Betoninvalmistajan teettämät rakennelujuuskokeet

Betoninvalmistajan teettämien rakennekoekappaleiden perusteella (Kuva 3) lujuustaso jää noin 50 % nimellislajuuden vaatimustasosta. Lajuustulosten hajonta on myös poikkeuksellisen suuri ollen noin 15 % keskiarvosta. Rakennekoekappaleiden tiheys on myös poikkeuksellisen alhainen keskiarvon ollessa 2084 kg/m³. Tiheyden perusteella rakennekoekappaleiden ilmamäärä on selvästi yli 10 %-yksikköä. Mikäli suhteitustietojen osa-ainemäärät ovat suhteellisesti oikein, rakennekoekappaleiden ilmamäärä on noin 13 %.

	Halkaisija mm	Tiheys kg/m ³	Voima kN	Lujuudet MPa
RPO1	71	2110	110,7	31,0
RPO2	71,1	2070	115,6	32,0
KO1	70,5	1910	59,8	17,0
KO2	70,2	2140	114,9	32,5
KO3	71	2130	105,3	29,5
KO4	71	2080	106,5	29,5
KV1	70,3	2090	112	31,5
KV2	70,8	2130	117,3	33,0
RPV1	70,8	2050	108,8	30,5
RPV2	70,7	2130	115,8	32,5
ka		2084	fcm	29,9 Mpa 4,70 Mpa
Vaativustaso	85% nimellislajuudesta		42,5	Mpa
	80% nimellislajuudesta		40,0	MPa
lujuustaso	Kk=fcm-fk fk = 4 (10 kpl)		Kk = 29,9 - 4 = 25,9	
	Kk = fcm+4 fcm 17 Mpa		Kk = 17 + 4 = 21,0	

Kuva 3. Betoninvalmistajan teettämien rakennekoekappalelujuudet 30 vuorokauden iässä.

4. Liikenneviraston teettämät kokeet

Liikennevirasto on teettänyt lujuusaluksen syiden selvittämiseksi seuraavat kokeet:

- Ohuthieanalyysi ilmamäärän arvioimiseksi
- Puristuslujuuskokeet rakennekoekappaleista
- Kapillaarinen vedelläkyllästysasteen määrittäminen kokonaishuokoisuuden, ilmahuokoisuuden ja kapillaarihuokoisuuden määrittämiseksi ja kapillaarihuokoisuuden perusteella vesisementtisuhteen arvioimiseksi.

4.1 Ohuthieanalyysin tulokset

Ohuthieanalyysi tehtiin Contesta Oy:n toimesta viidelle koekappaleelle (yhteensä 10 näytettä). Tulokset ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Ilmahuokosanalyysin tulokset.

	A	C	E	G	H	Keskiarvo
Kokonaisilmamäärä %	15,0	10,4	8,0	9,8	9,9	10,6
Ilmamäärä suojahuokosissa %	14,4	10,0	7,4	9,6	8,9	10,1
Ilmamäärä tiivistyshuokosissa %	0,6	0,4	0,7	0,2	1,0	0,4
Suojahuokosten ominaispinta-ala mm ² /mm ³	29	33	33	34	32	32
Suojahuokosten huokosjako mm	0,08	0,10	0,14	0,11	0,13	0,11

Ilmahuokosanalyysin tulosten perusteella näytteiden ilmamäärä on noin 2-kertainen tavoiteilmamäärään nähden.

4.2 Puristuslujuustulokset

Puristuslujuustulokset ovat taulukossa 3. Tuloksista laskettu vertailulujuus on 23,4 MPa, joka on noin puolet vaadittavasta tasosta ja lähes sama kuin Rudus Oy:n teettämien rakennekoekappaleiden lujuus.

Koekappaleiden tiheyksien keskiarvo on 2074 kg/m³, joka on lähes sama kuin Rudus Oy:n teettämien rakennekoekappaleiden tiheys.

Taulukko 3. Puristuslujuustulokset.

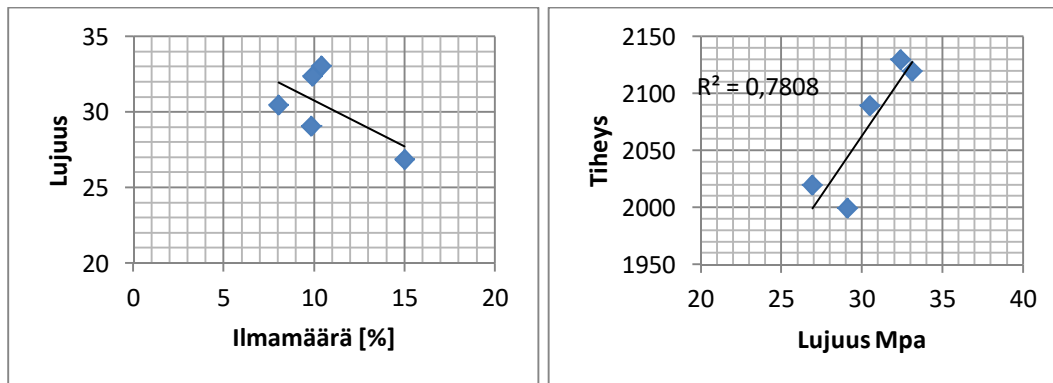
Tunnus	Halk.Ø mm	Voima kN	Lieriölujuus ⁽¹⁾ MPa	Kuutiolujuus ⁽²⁾ MPa	Tiheys kg/m ³	Arvioitu max raekoko ⁽³⁾ mm	Testauspäivä
1809/KTA 55-14	80,3	123,8	24,4	26,9	2020	14	30.6.2016
1809/KTC 70-175	80,2	152,1	30,1	33,1	2120	14	30.6.2016
1809/KTE 80-205	80,8	142,2	27,7	30,5	2090	14	30.6.2016
1809/KTG 60-180	80,8	135,7	26,5	29,1	2000	10	30.6.2016
1809/KTH 0-70	80,8	151,2	29,5	32,4	2130	14	30.6.2016

1) Lujuus on ilmoitettu Ø 80,2 - 80,8 mm lieriölujuutena.

2) Lieriölujuustulos on muunnettu vastaamaan 150 mm kuutiolujuutta kertomalla lieriölujuustulos luvulla 1,1 betoninormit 2012 (by50), kohdan 6.3.3 ohjeen mukaisesti.

3) Maksimiraekoko on arvioitu koekappaleen ulkopinnasta.

Puristuslujuus ja ilmahuokosanalyysi on tehty samoista poralieriöistä. Kuvassa 4 on esitetty ilmahuokosmäärän ja lujuuden välinen yhteys.



Kuva 4. Lujuuden riippuvuus ilmahuokosanalyysin ilmamäärästä ja tiheydestä. Poranäytteet A, C, E, G ja H.

4.3 Kapillaarinen vedelläkyllystysaste

Kapillaarinen vedelläkyllystysaste määritettiin kolmelle poranäytteelle VTT:llä. Tulokset ovat tiivistetysti taulukossa 4.

Koekappaleiden tiheyksien keskiarvo kuivana jää arvoon 1930 kg/m^3 . Kun siihen lisätään kapillaari- ja jäännöshuokoisuutta vastaava vesimäärä, päädytään tiheyskeskiarvoon 2076 kg/m^3 , joka on likipitään sama kuin puristuslujuuskoekappaleiden tiheyskeskiarvo 2074 kg/m^3 .

Koekappaleiden suojahuokoisuus, joka vastaa betonin ilmapitoisuutta, on erittäin suuri 13-14,9 % keskiarvon ollessa 14,0 %. Koekappaleiden ilmamäärä on 8-9 % yksikköä suurempi kuin tuoreen betonin työmaalla mitattu ilmamäärä.

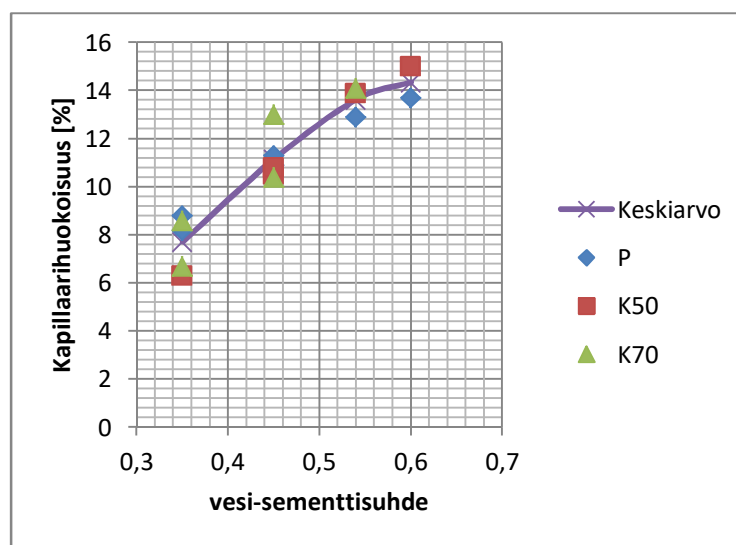
Taulukko 4. Kapillaarikokeen tulokset poranäytteille B, D ja F.

	B	D	F	Keskiarvo
Kokonaishuokoisuus %	30,5	27,8	29,1	29,1
Suojahuokoisuus %	14,9	13,0	14,0	14,0
Kapillaarihuokoisuus %	14,4	13,5	13,5	13,8
Jäännöshuokoisuus %	1,2	1,3	1,6	1,4
Tiheys kuivana kg/m^3	1893	1959	1932	1928

Kapillaarihuokoisuuden perusteella voidaan arvioida betonin vesisementtisuhteen tasoa, kun sideainemäärä tunnetaan. Korkea sementtimäärä antaa suuremman geeli- ja kapillaarihuokoisuuden kuin alhainen sementtimäärä. Tämä johtuu luonnollisesti kiviaineksen suuremmasta osuudesta betonissa. Kuvassa 5 on esitetty kokeellisesti kapillaarikokeella määritetty kapillaarihuokoisuus kuukauden ikäisenä betoneissa, joiden sideaineina olivat portlandsementti ja masuunikuona eri määrin. Sideainemäärä oli 400 kg/m^3 , joka on hieman pienempi kuin tutkittavassa betonissa. Tutkittava betoni sisälsi kuitenkin sementtiä, jossa oli kalkkikiveä, joten

sen reagoiva, kapillaarihuokoisuutta aiheuttava sideaineosuus on jonkin verran kuvan 5 sideaineosuutta pienempi.

Tutkittavan betonin vesisementtisuhteeksi on ilmoitettu enimmillään 0,46. Sellaisen betonin kapillaarihuokoisuuden voi arvioida kuvan 5 perusteella olevan noin 11,5 %. Tutkittavien betonien kapillaarihuokoisuus oli alimmillaan 13,5 %. Tämän arvion perusteella betonin vesisementtisuhteen on täytynyt olla arvon 0,50 tuntumassa tai jopa hieman sen yläpuolella. Vesisementtisuhteen kasvu saattaa johtua vaihtelusta hienon kiviaineksen kosteudessa. Betonin valmistaja on ilmoittanut hienon kiviaineksen kosteuspitoisuudeksi 3,5 %, joka on varsin alhainen ottaen huomioon määrittäysaika toukokuun loppu. Kiviainesten kosteus on yleensä keväällä varsin suuri johtuen lumien sulamisesta. Jo 1 %-yksikön kasvu hienon kiviaineksen kosteudessa nostaa tehollista vesisementtisuhdetta arvosta 0,46 arvoon 0,49.



Kuva 5. Kapillaarihuokoisuuden riippuvuus vesisementtisuhteesta, Lähde: S. Matala: *Effect of Carbonation on the Pore Structure of Granulated Blast Furnace Slag Concrete*. 1995.

5. Tulosten yhteenveto ja tarkastelu

Lujuusaluituksen mahdollisia syitä voidaan yleisesti listata seuraavasti:

1. Sementin laatu poikkeamat mm. seosaineiden osalta
2. Annosteluvirhe (Toimitettu erä on toteutettu kokonaan väärällä suhteituksella)
3. Hienojen kiviaineksen kosteusvaihteluista johtuvat vesimäärävaihtelut.
4. Huokostetun betonin ilmapitoisuuden muutokset kuljetuksen ja valun aikana.
5. Betonin lisänotkistaminen työmaalla
6. Työvirhe tiivistyksessä.

Edellä mainitusta syistä sementin laatu poikkeamia ei ole reklamoitu. Samoin annosteluvirhe systemaattisena virheenä ei ole todennäköinen, koska valmisbetonitehtaan omat tehtaalla todetut puristuslujuustulokset ovat varsin lähellä tavoitetasoa. Tämä havainto tukee myös sitä, että sementissä ei ole ollut valmisbetonitehtaalla havaittavaa laatu poikkeamaa. Betonin toimittajan ilmoituksen mukaan betonimassaa ei ole lisänotkistettu työmaalla. Myöskään valvoja ei ole raportoinut valun aikaisista työvirheistä.

Jäljelle jäävät listan kohdat 3 ja 4.

Huokostetun betonin ilmamäärien muuttuminen on todettu sekä betonin valmistajan että Liikenneviraston tilaamissa kokeissa.

Betonin valmistajan kokeissa ilmamäärämuutokset näkyvät vain puristuslujuuskoekappaleiden tiheyksissä ja puristuslujuuden alittumisina. Ilmamäärämittaukset sekä tehtaalla että työmaalla antavat tuloksen, että ilma ei ensimmäisen 2-3 tunnin aikana lähes 100 km kuljetusmatkan jälkeen lisääntynyt kuin 1 %-yksikön verran.

Kahdeksan ensimmäistä ilmamittausta olivat sekä tehtaalla että työmaalla samoista kuormista; tehtaan keskiarvo 5,3 % ja hajonta 0,8 %. Työmaatuloksien keskiarvo oli 6,1 % ja hajonta 0,4 %. Betonin kuljetusaika on mittaustulosten kelloaikojen perusteella ollut 1,3í 2,3 tuntia. Betoninvalmistajan ilmoituksen mukaan massaan ei olisi lisätty työmaalla nesteytintä, mikä tuntuu oudolta, kun massan siirto- ja odotusaika on ollut enimmillään reilusti yli 2 tuntia. Massaa ei ole suhteitustietojen mukaan myöskään hidastettu.

Olosuhdekoekappaleiden alhaisten tiheyksien perusteella on selvää, että työmaalla betonin ilmamäärä on ollut jo 10 % tuntumassa tai jopa suurempi. Ei ole uskottavaa, että ilma lisääntyisi vain 1 %-yksiköllä ensimmäisen 2 tunnin aikana ja sen jälkeen ilma olisi lisääntynyt jopa 8 %-yksiköllä betonin ollessa koekappalemuotissa. Samoin on outoa, että työmaamittauksissa päästään ilmamäärissä vain 0,4 % hajontaan, kun laboratoriossa hajonta on kaksinkertainen työmaamääritykseen verrattuna.

VTT:llä kovettuneesta betonista tehtyjen kapillaarikokeiden tulosten perusteella suojahuokosilma oli yli 13 %. Tulos oli sama kuin rakennekoekappaleiden tiheyksistä laskettu betonin ilmamäärä. VTT:llä testatut koekappaleet olivat eri kohdista siltaa, ja niissä suojahuokosilman vaihteluväli oli 13,0í ..14,9 %.

Kun P-lukumenettely otettiin käyttöön 1990-luvun alussa, keskeinen edellytys menettelyyn siirtymisessä oli luotettavan työmaavalvonnan toteuttaminen erityisesti ilmamäärien mittaamisen osalta. Edelläkuvattu ilmamäärien mittaustulosten tarkastelu osoittaa, että Kemijärven tapauksessa tässä ei ole onnistuttu alkuunkaan.

Kohteessa on käytetty lisäaineyhdistelmää, joka aiheuttaa ajan kuluessa ja työmaan autosekoituksessa kiistattomasti ilman huomattavan lisääntymisen betonissa ja sitä kautta merkittävän lujuuden alenemisen. On mahdollista, että ilmamäärä lisääntyy vielä entisestäänkin, jos työmaalla lisätään nesteytintä ja tehdään lisäsekoitus vaikka vain pyörintasäiliöautossa.

Voimassaolevien määräysten (liite 1) mukaan lisäaineiden toiminta olisi pitänyt selvittää jo ennakkokokein. Jos työaikaista laadunvalvontaa olisi tunnollisesti noudatettu, ilman lisääntyminen olisi havaittu viimeistään työmaalla jo ennen betonointia ja vauriot lujuuden suhteen eivät olisi realisoituneet.

Betonin alhainen lujuus selittyy valtaosiltaan betonin suurella ilmamäärällä, kuten edellä on jo todettu. Karkean nyrkkisäännön mukaan 1%- yksikkö lisäilmaa voi alentaa lujuutta jopa 4-5 %. Alenema ei ole nähtävästi lineaarinen, mutta 8 %-yksikköä lisäilmaa voi alentaa lujuutta lähes 40 %. Sillan lujuus oli noin puolet

vaatimustasosta, joten nähtävästi myös jonkinasteista heiluntaa on ollut betonin vesimäärissä.

Kapillaarikokeen perusteella päädyttiin korkeahkoon kapillaarihuokoisuuteen vesisementtisuhdetta 0,46 edustavalle betonille. On mahdollista, ehkä jopa todennäköistä, että tehollinen vesisementtisuhde on ollut tasoa 0,50-0,52, jolloin siitä tulee noin 6-7 MPa lujuusalenema.

Työaikaiset laadunvalvontatoimet

Laadunvalvontaa ilmamittausten osalta on käyty läpi jo edellä.

Silta jännitettiin 7 vuorokauden iässä. Laadunvalvonta-asiakirjojen mukaan betonin lujuus ei ole täyttänyt jännittämishetkellä asetettua vaatimusta. Olosuhde-lujuustuloksien mukaan betonin lujuus oli vain noin puolet asetetusta vaatimuksesta. Laskennallisesti lämpötilamittausten perusteella ei myöskään saavutettu jännittämislujutta. InfraRYL:n mukaan betonin lujuuden tulee olla suunnitelman mukainen ennen jännittämistä. Näin ei ollut ja siitä huolimatta silta jännitettiin ja silta vaurioitui.

Laadunvalvonnan toteuttaminen on kiistattomasti urakoitsijan vastuulla. Laadunvalvonnan toteutusta ja kelpoisuuden osoittamisen luotettavuutta arvioi tilaajan valvonta. Tässä muistiossa ei tarkastella valvonnan osuutta muuten kuin toteamalla, että Kemijärven kohteessa rakentamisen tilaajan valvonta on ollut nähtävästi erittäin pistokoeluontoista. Valvonta ei ole kiinnittänyt huomiota edes siihen, että kohteen betonin osalta ennakkokokeita ei ole tehty nähtävästi ollenkaan. Oliko valvonta paikalla silloinkaan, kun työmaamittaukset betonin ilmamäärän osalta tehtiin. Edelleen herää kysymys, antoiko urakoitsijan ja/tai tilaajan valvonta jännittämisluvan, vaikka betonin lujuus oli selvästi alle vaadittavan jännittämislajuuden.

6. Johtopäätökset

Kun sillanrakennuskohteessa betonin lujuus täyttää vain 50 %:sti asetetun nimellislajuustason, on tapahtunut megaluokan virhe.

Syy lujuusalitukseen on selvä; epäonnistunut betonin valmistus.

Jos kaikkia Liikenneviraston asettamia betonin laatuvaatimuksia ja laadunvalvonnan toteutuksesta annettuja määräyksiä olisi noudatettu, virhettä ei olisi päässyt syntymään. Kattavien ennakkokokeiden suoritus olisi paljastanut epästabiilin ilmahuokosrakenteen ja suhteettoman korkean ilmamäärän muodostumisen ja niistä aiheutuvaa betonin huomattavaa alilujuutta ei olisi esiintynyt.

Tapaus antaa oikeutetusti syyn epäillä, esiintyykö Suomen siltakohteissa laajemminkin tapauksenkaltaista piittaamattomuutta asetetuista ohjeista ja määräyksistä

- tilaajan valvonnassa
- betonin valmistuksessa ja
- työmaatoteutuksessa.

Koska nähtävästi mainitunlaista piittaamattomuutta esiintyy, herää kysymys: Olisiko betonin ja betonirakenteen kelpoisuuden toteamisessa siirryttävä takaisin valmiin

sillan laadun arvosteluun? Tällainen menettely oli voimassa neljännesvuosisata sitten ja siitä haluttiin pois jatkuvien reklamaatioiden vuoksi.

Muistion laatija esittää vakavasti harkittavaksi kahta etenemistapaa:

1. Ensimmäisessä pitäydytään nykyisenkaltaisessa menettelyssä, mutta tiettyjä laadunvalvontatoimia arvioidaan uudelleen ja tilaajan valvontaa kiristetään. Esitän myös harkittavaksi, pitäisikö Liikenneviraston vaatia valvontaa harjoittavien yritysten osoittavan kelpoisuutensa tehtäviin. Vaativien siltakohteiden valvontaorganisaatiossa tulee olla kohteen edellyttämä asiantuntemus. Olen havainnut liian usein, että valvojien tietämys silta- ja betonirakentamisesta yleensä ja erityisesti jännitettyjen betonirakenteiden toteutuksesta ja toiminnasta on olematon. Tällöin valvonnassa kiinnitetään huomiota toteutettavien siltarakenteiden laadun kannalta epäolennaisuuksiin. Tosiasia kuitenkin on, että siltarakenne tehdään 100 vuodeksi. Tuon iän saavuttamisessa valvontaorganisaation substanssiosaamisella on merkitystä.
2. Jos päädytään siirtämään kelpoisuudentoteamistoimet valmiin sillan arvosteluun, betonin lujuus- ja säilyvyysominaisuudet tulevat testattaviksi valmiista rakenteesta. Puristuslujuuden määrittäminen ja pakkasenkestävyyden testaaminen valmiista rakenteesta ei ole teknisesti ongelmallista. Menettely aiheuttaa kelpoisuudentoteamiskustannusten kasvun ja mahdollisesti urakkahintoihin ns. ylimääräisen arvonmuutoslisän.

Yli neljännesvuosisadan käytössä ollut sillanrakentamisessa noudatettava betonin kelpoisuudenosoittamismenettely on Kemijärven tapauksen tiimoilta osoittautunut epäluotettavaksi. Valvonnan nykytasolla menettely mahdollistaa jopa laadunvalvontatulosten manipuloinnin tai jopa tekemättömien mittaustulosten kirjaamisen.

Asiantilan korjaamisella on kiire. Betonin ominaisuuksien valvonta ja jopa kelpoisuuden toteaminen on vastoin voimassa olevia määräyksiä (InfraRYL 2006) liukunut betonivalmistajan toiminnaksi. Näyttää ilmeiseltä, että osittain jopa tilaajaorganisaatiotkin ovat tämän hyväksyneet.

Mikäli tilaajan valvontaa ei saada kiristetyksi, tiukemmilla laadunvarmistustoimilla ei ole tehoa. Tällöin tilanteen korjaamiseksi ei jää muita vaihtoehtoja kuin valmiin siltarakenteen testaaminen rakenneosittain niin lujuuden kuin pakkasenkestävyydenkin suhteen.

Keskeiset P-lukuohjeen asettamat vaatimukset pakkasenkestävän betonin laadunvalvonnassa

Yleiset vaatimukset Ohjeen kohdassa 4.1

Pakkasenkestävän betonin valmistuksen laatua valvotaan julkaisun by65 Betoninormit 2016 /3/ kohdan 4 ja standardien SFS-EN 206 /5/ ja SFS 7022 /6/ mukaisesti.

Ennakkokokeet tehdään tämän ohjeen kohdan 4.2 mukaisesti.

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

P-lukubetonin laadun varmistamisessa ilmamäärä ja ilman pysyvyys ovat oleelliset. Ilmamäärä mitataan standardin SFS-EN 12350-7 mukaisella painemenetelmällä.

Mittauksia tehdään kuormista 1-5 jokaisesta kuormasta ja tämän jälkeen joka kymmenennestä kuormasta. Mittausten kokonaisuuden on oltava vähintään 6. Mittaukset tehdään mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa ennen massan sijoittamista muottiin, esim. betonipumpun letkun päästä. Mitattu ilmamäärä ei saa ylittää suhteituksen mukaista ilmamäärää enempää kuin 3 %-yksikköä.

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.

Elementtiteollisuudessa valmistettävien P-lukubetonien ilmamäärä mitataan ensimmäisestä annoksesta ja sen jälkeen vähintään joka kolmannesta annoksesta kuitenkin siten, että arvosteluerää kohden tulee vähintään 6 mittaustulosta.

Jos ilmamäärämittausten keskiarvo ylittää suhteituksen mukaisen ilmamäärän yli 2 %-yksikköä, tulee ilmamäärän vaikutus betonin puristuslujuuteen selvittää aina rakennekokein.

Ennakkokokeet kohdan 4.2 mukaan

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

Ennakkokokeet tehdään aina, kun P-luku määritetään joko kohdan 4.3 mukaisesti suhteitustietojen ja mitatun ilmamäärän avulla tai kohdan 4.4 mukaisesti suoran pakkassuolakokeen avulla.

Ennakkokokeilla tutkitaan betonin puristuslujuus, tiheys, ilmamäärä ja ne tekijät, joiden avulla pakkasenkestävyys lasketaan. Kiviaineksen kosteuspuiteisuus määritetään ennakkokoemassaan käytetyistä kaikista lajitteista vähintään kahtena erillismäärityksenä. Lisäksi kiviaineksen absorptio tulee määrittää tehollisen vesisideainesuhteen laskemiseksi. Ilmamäärä mitataan heti sekoituksen jälkeen ja tunnin kuluttua sekoituksesta. Huokosteen annostus tarkistetaan vielä välittömästi ennen sekoitusta. Tarvittaessa tutkitaan myös ilmamäärän pysyvyyttä betonin kuljetuksen ja betonoinnin aikana.

Itsetiivistyvää betonia käytettäessä tulee ennakkokokein aina selvittää kuljetusmatkan, lämpötilan, valumenetelmän ja rakennuspaikalla tehtävän massan notkeuden korjaamisen vaikutus tuoreen betonin ilmamäärään, ilman pysyvyyteen ja jakaantumiseen valetussa ja jälkihoidetussa betonissa.

Ennakkokokeiden yhteydessä selvitetään hidasteen ja nesteytteen vaikutusaika betonointiolosuhteissa. Tarvittaessa tutkitaan myös lisäaineiden vaikutuksia eri lämpötiloissa.

Huokostuksen laadun varmistamiseksi kovettuneessa betonissa ennakkokokeet tehdään kovettuneesta betonista määrittämällä joko

- optisesti huokosjako tai
- standardin CEN/TS 12390-9 mukainen pakkassuolarapautuma.

Jos ennakkokoe tehdään määrittämällä betonista huokosjako, tulee tuloksen täyttää taulukossa 3 esitetyt vaatimukset. Käytettäessä standardin CEN/TS 12390-9 mukaista laattakoetta tuloksen tulee täyttää taulukon 4 vaatimukset.

Taulukko 3. Huokosjakovaatimukset eri P-lukutasoilla ja vesi-sementtisuhteen arvoilla.

Vesi-sementtisuhte	Huokosjakovaatimus eri P-lukutasoilla [mm]	
	P < 50	P ≥ 50
> 0,40	≤ 0,25	≤ 0,23
Ö0,40	≤ 0,30	≤ 0,27

Ennakkokoe katsotaan pakkasenkestävyyden osalta hyväksytyksi, jos massan koostumuksen mukaan kohdan 4.3 mukaisesti laskettu P-luku täyttää vaatimuksen ja kun kovettuneen betonin ennakkokokeen tulos täyttää joko edellä esitetyn huokosjakovaatimuksen tai taulukon 4 mukaisen vaatimuksen kerrottuna kohdan 4.3 kaavan 3 mukaisesti lasketulla kertoimella k_{sid} .

Kovettuneen betonin ennakkokokeen tulos ei saa olla vuotta vanhempi.

Taulukko 4. Sallitut rapautumat eri P-luvuilla käytettäessä standardin CEN/TS 12390-9 mukaista laattakoetta.

P-luku	56 kierroksen CEN/TS 12390-9 -kokeessa sallittu rapautuma [g/m ²]				
	CEM I	Sementin kalkkikivipitoisuus %			
		5	10	15	20
P20	900	900	810	700	590
P30	500	500	440	390	330
P50	250	250	210	180	150
P70	150	150	130	110	90

- 1) Taulukossa rapautumien arvot ovat betoneille, joissa sideaineena käytetään joko portlandsementtiä CEM I tai kalkkikiveä sisältävää sementtiä. Sementtien sisältäessä muita seosaineita taulukon arvot kerrotaan kaavan 3 mukaisella sideainetekijällä k_{sid} .