

Juha Ratvio

# Ultralujan betonin käyttösovellukset

## Esitutkimus

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

*V T T T i e d o t t e i t a*

# Ultralujan betonin käyttösovellukset Esitutkimus

Juha Ratvio

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5788-3 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5789-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2001

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka,  
Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7004

VTT Byggnads- och samhällsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik,  
Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7004

VTT Building and Transport, Building Materials and Products, Wood Technology, Kemistintie 3,  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7004

Toimitus Kerttu Tirronen

Otamedia Oy, Espoo 2001

Ratvio, Juha. Ultralujan betonin käyttösovellukset. Esitutkimus [Preliminary study of ultra strength concrete applications]. Espoo 2001, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2078. 45 s. + liitt. 13 s.

**Avainsanat** ultra strength concrete, high strength concrete, utilization, compression strength, corrosion resistance, durability, reactive powder concrete, RPC, mechanical properties, manufacturing

## Tiivistelmä

Julkaisussa käsitellään ultralujien betonien, erityisesti RPC-betonien (Reactive Powder Concrete) ominaisuuksia, valmistustekniikkaa ja käyttösovelluksia. Tässä esitutkimuksessa tehtiin myös koekappaleita RPC-massasta.

RPC:n menestymisen mahdollisuudet perustuvat sen erikoisominaisuuksiin kuten hyviin lujuusominaisuuksiin (puristuslujuus 200–800 MPa), hyvään korroosionkestävyyteen ja säilyvyyteen erinomaisen tiiviyn ansiosta sekä rakenteiden keveyteen. Toisaalta RPC:n käyttöä rajoittavat tavanomaista kalliimmat materiaalit ja erikoinen valmistustekniikka korkeissa lujuusluokissa sekä vielä ratkaisemattomat palonkestävyysongelmat.

Valmistustekniikka rajoittaa RPC:n käyttöä niin, että ainakin aluksi on järkevää pyrkiä vain puristuslujuusluokkiin 200–300 MPa ja käyttää joko perinteistä betonirakenteiden esivalmistustekniikkaa tai sitten autoklaavivalmistusta.

RPC:n mahdollisia sovellusalueita on sekä rakentamisen että muun teollisuuden aluilla. Jos palonkestävyysominaisuuksia ei saada hyviksi, rajoittuu RPC:n käyttö vain niihin rakenteisiin, joiden palonkestävyys ei ole rajoittava tekijä. Tällainen käyttökohde on esimerkiksi kävelysilta. Palonkestävyyttä on mahdollista parantaa muovikuitujen avulla, mutta asia vaatii vielä tutkimusta. RPC:n mahdollisia sovellusalueita rakentamisessa ovat siltojen lisäksi mm. putket, palkit, julkisivupaneelit, kanavarakenteet ja puolustusvoimien suojarakenteet. Muussa teollisuudessa RPC:n potentiaalisia sovellusalueita ovat mm. kassakaapit, kaatopaikkajyrät ja erilaiset säiliöt.

Ratvio, Juha. Ultralujujan betonin käyttösovellukset. Esitutkimus [Preliminary study of ultra strength concrete applications]. Espoo 2001, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2078. 45 p. + app. 13 p.

**Keywords** ultra strength concrete, high strength concrete, utilization, compression strength, corrosion resistance, durability, reactive powder concrete, RPC, mechanical properties, manufacturing

## Abstract

Properties, manufacturing and use applications of ultra high strength concrete, especially RPC-concretes (Reactive Powder Concrete), are studied in this publication. In this preliminary study were also made samples of RPC-material. Success possibilities of RPC are based on its special properties like good strength properties (compression strength 200–800 MPa), good corrosion resistance and durability due to excellent compactness and lightness of constructions. But more expensive materials than usually and special manufacturing technique on the top of strength classes and still unresolved fire endurance problems confine its use.

Manufacturing technique of RPC confines its use so, that least in the beginning it is practical to try come to compression strength classes 200–300 MPa and to use traditional precast concrete technique or autoclave-manufacturing.

Possibly application areas of RPC can be found in building construction and in other industry. If the fire resistance properties of RPC are not got good, its use will be confined only to those constructions, in which the fire resistance is not a limiting factor like in bridges. There are possibilities to improve the fire resistance with plastic fibres, but it must been studied at first. Possible applications areas for RPC in building construction in addition to bridges are among other things pipes, beams, facade panels, canals and military structures. In other industry potential applications of RPC are, among other things, safes, landfill compactors at dumping places and different containers.

# Alkusanat

Tässä esitutkimuksessa perehdyttiin ultralujien betonien, erityisesti ns. RPC-betonien (Reactive Powder Concrete), ominaisuuksiin, niiden sovellusmahdollisuuksiin rakentamisessa ja muussa teollisuudessa sekä tehtiin muutamia koekappaleita RPC-massasta.

Tutkimuksen rahoittivat Tekes ja VTT.

Tutkimus toteutettiin VTT Rakennustekniikassa erikoistutkija Juha Ratvion johdolla. Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat tekn. tri Anna Kronlöf Suomen Betonitieto Oy:stä (vuoden 2000 alusta VTT:n palveluksessa), tuotantopäällikkö Aune Pulkkinen (projektin alussa) ja suunnittelija Risto Alkula Kaso Oy:stä, teknologia-asiantuntija Reijo Kangas Tekesistä, tekn. tri Heikki Kukko ja erikoistutkija Juha Ratvio VTT Rakennustekniikasta.

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	4
Alkusanat .....	5
1. Johdanto .....	9
2. Ultralujan betonin ominaisuudet.....	10
2.1 Ultralujan betonin materiaalit .....	10
2.2 Ultralujan betonin ja siitä tehtyjen rakenteiden valmistusmenetelmät .....	11
2.3 Kovettuneen ultralujan betonin ominaisuudet ja vertailu tavanomaiseen betoniin .....	13
2.4 Ultralujan betonin taloudellisuus .....	15
3. Ultralujan betonin käyttökohteet rakennusteollisuudessa.....	18
3.1 Putket .....	18
3.2 Sillat.....	20
3.3 Voimalaitoskohteet .....	23
3.4 Palkit.....	25
3.5 Julkisivupaneelit .....	25
3.6 Vesisäiliöt, altaat ja kanavarakenteet.....	26
3.7 Puolustusvoimien suojarakenteet.....	27
3.8 Muut potentiaaliset käyttökohteet rakentamisessa .....	28
4. Ultralujan betonin käyttökohteet muussa teollisuudessa .....	31
4.1 Kassakaapit .....	31
4.2 Paperikoneen telat.....	34
4.3 Kaatopaikkajyrät.....	35
4.4 Muut potentiaaliset käyttökohteet.....	36
5. Suunnitteluohjeet .....	37
6. Koevalut.....	38
6.1 Koevalujen massat ja valmistustekniikka.....	38
6.2 Kovettuneen RPC:n ominaisuudet.....	41

7. Jatkotutkimussuunnitelma .....	42
8. Yhteenveto .....	44
Lähdeluettelo.....	45

## LIITTEET

Liite 1: Erikoislujia betoneita

Liite 2: RPC-betonin palonkestävyys





# 1. Johdanto

Betonien ja betonirakenteiden kehittämisessä on kahden viimeisen vuosikymmenen aikana otettu merkittäviä edistysaskeleita mm. korkealujuusbetonien ansiosta. Viime vuosina on kehitetty ultralujaa sementtipohjaista komponenttibetonia, joka on hyvä plastisiltakin ominaisuuksiltaan. Kuivien komponenttiensa hienouden ja reaktiivisuuden takia tätä materiaalia on usein kutsuttu RPC:ksi (Reactive Powder Concrete). Siinä on erittäin tiivis mikrorakenne, joka on saatu aikaan partikkelien kehittyneellä pakkauksella ja erittäin alhaisella vesimäärällä. Korkeissa lujuuksissa käytetään valmistusprosessissa hyväksi myös korkeata painetta ja lämpötilaa. RPC:n puristuslujuus vaihtelee 200 MPa:sta aina 800 MPa:iin asti. Metallikuiduilla siihen saadaan vastaavaa sitkeyttä ja vetolujuutta kuin metalleilla on. Muita ultralujia betoneja on esitelty liitteessä 1.

RPC:n useita materiaaliominaisuuksia on jo tutkittu erityisesti alhaisissa lujuusluokissa samoin kuin valmistustekniikkaa. Nyt on aika etsiä RPC:lle hyviä käyttösovelluksia. RPC:stä onkin jo ulkomailla tehty useita koerakenteita ja prototyyppejä kuten kävelysilta Kanadassa, palkkeja ja julkisivulevyjä Ranskassa sekä putkia Yhdysvalloissa. Uusia käyttösovelluksia on suunnitteilla. RPC:n erityisen hyvät lujuus- ja säilyvyysominaisuudet ovat mahdollistaneet sen käytön ohuina ja kevyinä rakenteina. Tällöin sen tavanomaista korkeampi hintakaan ei ole ollut käytön esteenä.

## 2. Ultralujan betonin ominaisuudet

### 2.1 Ultralujan betonin materiaalit

RPC:n materiaalit eivät ole vakio, vaan ne muuttuvat puristuslujuuden kasvaessa. Yksityiskohdissaan niiden ominaisuudet ovat vaihdelleet eri lähteissä /1, 2, 3, 4/. Ensin tarkastellaan lujuusluokan 200 MPa materiaaleja. Tyypillinen RPC200:n koostumus on annettu taulukossa 1.

*Taulukko 1. RPC200: tyypillinen koostumus /8/.*

<b>Materiaali</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
Vesi	185
Sementti	705
Silika	230
Kvartsi hiekka	1010
Murskattu kvartsi	210
Supernotkistin	34,5 (litraa)
Teräskuidut	140

Sementtinä voidaan käyttää portlandsementtiä, jonka hydrataatiolämpö on alhainen ja C<sub>3</sub>A-pitoisuus pieni.

Supernotkistimena on käytetty polynaftaleenisulfonaattia, jonka ominaispaino on 1,21. Sen kiinteän materiaalin pitoisuus on 42 % ja sulfaatin määrä on < 2 %. Polymeroitumisaste on keskimäärin yli 10.

Silikajauheen hienous on ollut 20 000 m<sup>2</sup>/kg ja sen hiilen määrä on ollut noin 1,9 %. Silikan mikropallojen keskimääräinen koko on ollut noin 0,1 µm. SiO<sub>2</sub>:n määrä on ollut suurempi kuin 92 %.

Kvartsihiekan keskimääräinen halkaisija on ollut 300 µm ja murskatun kvartsin 15 µm.

Teräskuituina on käytetty 0,15–0,20 mm paksuja ja 12–13 mm pitkiä kuituja.

RPC800:n materiaalit poikkeavat siis osittain RPC200:n materiaaleista. Tyypillinen RPC800:n koostumus on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. RPC800:n tyypillinen koostumus /7/.

<b>Materiaali</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
Vesi	181
Sementti	955
Silika	220
Murskattu kvartsi	372
Supernotkistin	18
Teräskuidut	602
Teräsjauhe	1423

RPC800:ssa sementti on samaa laatua kuin RPC200:ssakin. Supernotkistimena on käytetty polyakrylaattia. Silikajauheena on käytetty samaa laatua kuin edellä.

Kvartsihiekkää ei RPC800:ssa käytetä, mutta murskattua kvartssia tarvitaan mielellään vieläkin hienompana jauheena kuin RPC200:ssa eli sen keskimääräinen raekoko on nyt 10 µm.

Teräskuituina käytetään lyhyitä 3 mm:n kuituja, joiden halkaisija on 0,15 mm. Lisäksi tarvitaan vielä teräsjauhetta, jonka raekoko on < 800 µm.

Siitä miten materiaalit muuttuvat RPC200:n ja RPC800:n välialueella, ei ole vielä kovinkaan paljon tietoa eli tältä osin tarvitaan lisää kokeita.

## **2.2 Ultralujan betonin ja siitä tehtyjen rakenteiden valmistusmenetelmät**

RPC200 massan sekoitus tapahtuu seuraavasti:

1. Kuivasekoitus 3 minuuttia.
2. Lisätään vesi (alle 20 litraa), jossa on puolet tehonotkistimesta.
3. Sekoitus 2 minuuttia.
4. Lisätään toinen puolisko tehonotkistimesta sekoitettuna 20 litraan vettä.
5. Sekoitus 4 minuuttia.
6. Lisätään teräskuidut.
7. Sekoitus 9 minuuttia.

RPC800:aan sovelletaan tätä RPC200:n sekoitusohjetta.

RPC:stä tehtävän koekappaleen tai rakenteen valmistusmenetelmät riippuvat oleellisesti tavoiteltavasta lujuudesta. Puristuslujuudet 200–230 MPa saavutetaan perinteellisillä betonirakenteen valmistusmenetelmillä ilman erikoislaitteita. Tätä suurempiin lujuuksiin tarvitaan valmistusprosessiin painetta (50–60 MPa asti) ja korkeata lämpötilaa (400 °C asti). Taulukossa 3 on esitetty paineen, lämpökäsittelyn ja puristuslujuuden karkea riippuvuus / 4 /.

*Taulukko 3. RPC:n lujuuden, lämpökäsittelyn lämpötilan ja paineen riippuvuus; maksimipuristuslujuus.*

	Maksimi puristuslujuus, MPa		
	lämpötila 20 °C	lämpötila 90 °C	lämpötila >250 °C
Ilman painetta	200	280	550
Paineella	250	400	810

Noin 200 MPa:n lujuuteen päästään siis jo 20 °C:n käsittelyllä (1 vrk 20 °C:ssä 100 %:n kosteudessa). Noin 280 MPa:n lujuuteen on päästy 90 °C:n lämpökäsittelyllä (2 vrk), joka on tehty edellisen käsittelyn (1 vrk 20 °C 100 %:n kosteudessa) jälkeen. Suurempiin lujuuksiin pääsemiseksi voidaan käyttää autoklaavia tarvittavan paineen ja lämpötilan saavuttamiseksi.

Autoklaavillakaan ei päästä yli 30 MPa:n paineen. Tämän jälkeen on käytettävä esimerkiksi mekaanista puristinta, jossa on lämmitysmahdollisuus, tai ns. kuumapuristinta, jolla tehdään metallijauheesta metallikappaleita. Kuumapuristin on kuitenkin erittäin kallis laite (useita miljoonia markkoja) ja sen ongelmana RPC:n valmistuksessa on, että laite ei siedä vettä.

Kun lämpökäsittelyssä käytetään hyvin korkeita lämpötiloja, nostetaan kappaleen lämpötilaa portaittain esimerkiksi seuraavasti: 20 °C (24 h, 100 %:n kosteus), 90 °C (4h), 400 °C (12 h).

RPC:n valmistuksessa puristava paine lisää materiaalin tiheyttä. Paineen käyttö aloitetaan heti tuoreeseen massa. Sen avulla poistetaan ilmaa jo muutamassa sekunnissa. Samalla poistetaan liika vesi ja pienennetään kemiallista kutistumaa. Painetta pidetään vähintään 6–12 tuntia massan sekoituksen jälkeen. Tärytystä massan tiivistämisvaiheessa RPC tarvitsee hieman tavanomaista betonia vähemmän.

Tutkimuksen mukaan paikallarakentamiseen soveltuu vain lujuusluokka 200–230 MPa. Lujuudet 230–550 MPa voidaan saavuttaa elementtitekniikalla tehdasoloissa, mutta

huippulujuudet ovat vielä nykyisin saavutettavissa vain kalliilla erikoislaitteilla laboratorio-oloissa.

### **2.3 Kovettuneen ultralujan betonin ominaisuudet ja vertailu tavanomaiseen betoniin**

Ultralujan betonin ominaisuudet perustuvat merkittävästi mm. kvartsirunkoaineen ja sementtikiven väliseen kemialliseen reaktioon sekä pieneen vesisideainesuhteeseen /6/.

Kvartsin ja kalsiumhydroksidin välillä tapahtuu hydroterminen reaktio veden läsnäollessa 200 °C:n lämpötilassa autoklaavioloissa. Kvartsibetonilla suoritetuissa kokeissa on havaittu noin 100 MPa:n lujuuden nousu 200 °C:n lämpötilassa normaalissa ilmanpaineessa.

Betonin lujuuteen voidaan vaikuttaa voimakkaasti vesi-sideainesuhteen avulla. Suhteen kasvattaminen etäännyttää partikkeleita toisistaan, jolloin muodostuvat hydrataatiotuotteet joutuvat ylittämään suhteellisen pitkiä välimatkoja, jotta rakenne lujittuisi. Siten rakenteesta ei muodostu tiivistä. Teoreettisesti ajatellen vesi-sideainesuhdetta voidaan nostaa partikkeleiden välisten etäisyyksien kasvamatta korvaamalla sideainetta yhtä hienolla runkoaineella, jolloin vesi-sideainesuhteen muuttuminen vaikuttaisi lujuuteen suhteellisen vähän. Tavanomaisessa betonitekniikassa vesisideainesuhdetta nostetaan korvaamalla sementtiä hienojakoisella runkoaineella, mutta sementillä ja runkoaineella on kuitenkin selvä hienousero, joten tilanne poikkeaa täysin ultralujiin betoneihin verrattuna.

Taulukkoon 4 on kerätty kirjallisuudesta normaali- ja korkealujuusbetonien, RPC200:n ja RPC800:n ominaisuustietoja. Siitä nähdään ne ominaisuudet, joissa RPC on parempi tai huonompi kuin perinteelliset betonit ja myös ne alueet, joilta tietoa vielä puuttuu. RPC:n palonkestävyysominaisuudet ovat vielä puutteelliset. Ranskalaisen yrityksen Bouyguesin valmistamalle RPC-betonille lujuuksille 180–350 MPa on vuonna 1999 tehty alustavia palonkestävyyskokeita HITECO-projektissa. Tulokset eivät olleet kovinkaan hyviä (liite 2). RPC-betonit lohkeilivat palokokeissa, paitsi betonitäyteinen putkipilari. Lohkeilu poikkesi tyypillisestä normaalilujuuksisessa tai korkealujuuksisessa betonissa esiintyvistä lohkeilusta siinä, että se eteni jatkuvasti, alkoi nopeasti (3–7 minuutin kuluttua kokeen alkamisesta) ja jatkui koko kokeen ajan. Betoni lohkesi pieninä palasina tai ohuina kerroksina. Kokeissa todettiin myös, että RPC:n palonkestävyyttä on mahdollista parantaa käyttämällä teräskuitujen lisäksi myös muovikuituja, esimerkiksi polypropyleenikuituja. Muovikuitujen palaessa RPC:n sisäinen vedenpaine alenee kideveden paineen purkautuessa syntyneeseen tyhjiin tilaan. Sopivaa muovikuitujen määrää ei vielä määritetty. Tämän perusteella ei RPC-betonia voi vielä suositella palonkestä-

vyyttä vaativiin kohteisiin. RPC200:n ja RPC800:n välialueelta puuttuu myös paljon ominaisuustietoja.

Pakkasenkestävyydellä on erityisen suuri merkitys Suomessa. Sitä on tutkittu mm. Ranskassa /5/.

Pakkasenkestävyydestä ranskalaiset ovat saaneet RPC200:lle seuraavia tuloksia jäädytys-sulatuskokeessa (betonin lohkeilu, g/cm<sup>2</sup>): RPC 7, korkealujuusbetoni 900, tavanomainen betoni >1000; toisessa jäädytys-sulatuskokeessa (kriteerinä hyvälle arvolle E<10 %) 2,8 %. Tuloksia on pidetty hyvinä, mutta niihin on syytä suhtautua kriittisesti, koska eri maiden vaatimustasot vaihtelevat.

*Taulukko 4. RPC:n materiaaliominaisuudet (kirjallisuudesta).*

<b>Materiaaliominaisuus</b>	<b>Normaali- ja korkealujuusbetonit; tyypillisiä arvoja</b>	<b>RPC200</b>	<b>RPC800</b>
Puristuslujuus	20–100 MPa	170–230 MPa	650–810 MPa
Taivutusvetolujuus	6–7 MPa	30–60 MPa	45–140 MPa
Vetolujuus	1,5–3,5 MPa	9 MPa	?
Murtumisenergia	140 J/m <sup>2</sup>	20000–40000 J/m <sup>2</sup>	1200–20000 J/m <sup>2</sup>
Kimmomoduuli	36–48 GPa	50–67 GPa	65–75 GPa
Kutistuma	0,4 ‰	0,58 ‰	?
Pakkasenkestävyys	Yleensä hyvä	Hyvä	?
Karbonatisoitumissyvyys	2–10 mm	0,04 mm	?
Ilmanläpäisevyys	250*10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>	5*10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>	?
Vedenimu	2,5 kg/m <sup>2</sup>	0,05 kg/m <sup>2</sup>	?
Kulutuskestävyys	2,75	1,27	?
Raudoituksen korroosio	0,25–1,2 µm/v	< 0,01 µm/v	?
Palonkestävyys	Palamaton materiaali; palonkestoajat määritetty	Huonompi kuin Normaalibetonilla (alustavat kokeet)	?
Huokoisuus	16–20 %	4 %	?
pH	11–12	12,8	?
Pituuden lämpötilakerroin	10*10 <sup>-6</sup> /°C	10,5*10 <sup>-6</sup> /°C	?
Työstettävyys	1–2 h	1–1,5 h	?

## 2.4 Ultralujan betonin taloudellisuus

RPC200:n materiaalikustannukset kuutiometriltä ovat laboratorio-oloissa olleet noin 2 500 mk massalle ilman teräskuituja ja 7 000 mk teräskuitujen kanssa /4/. Merkittäviä hinnannpudotuksia olisi kuitenkin saatavissa, jos RPC:tä tehtäisiin suuria määriä. Parhaimmillaan on päästy jo noin 4 500 mk:n kuutioon teräskuitujen kanssa. Taulukossa 5 on RPC200:n komponenttien hintoja Yhdysvalloista /4/.

Taulukko 5. RPC200:n hintatietoja (1996 hinnat).

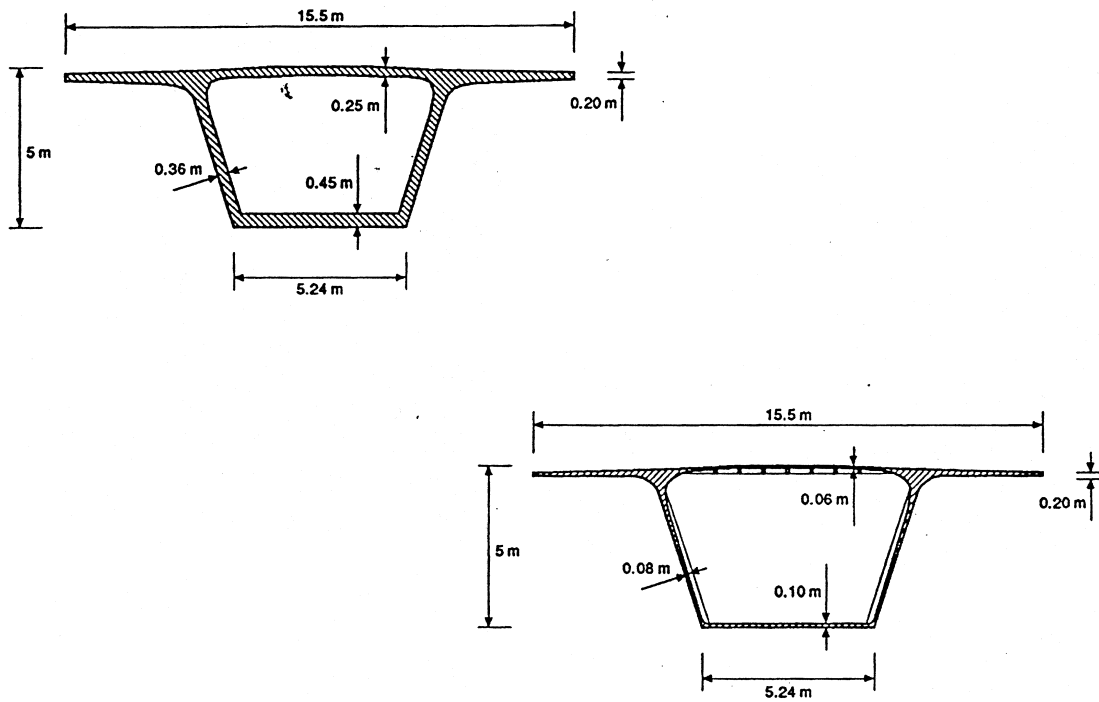
RPC200	Mater.määrä, kg/m <sup>3</sup>	Yksikköhinta, mk/tn	Hinta, mk/m <sup>3</sup>
Sementti	705	350	245
Silika-jauhe	230	470	110
Hiekka	1010	585	590
Kvartsi-jauhe	210	2240	470
Tehonotkistin	42	5,8	245
Yhteensä ilman kuituja	200	22750	4550
Yhteensä kuitujen kanssa			6210

RPC200:n merkittävin hintatekijä on teräskuidut. Ilman teräskuituja RPC on usein taloudellisesti hyvä vaihtoehto. Korkeampilujuuksisilla RPC-laaduilla materiaalien hinnat kasvavat, ja niistä tehtyjen rakenteiden valmistustekniikka tuo lisäkustannuksia.

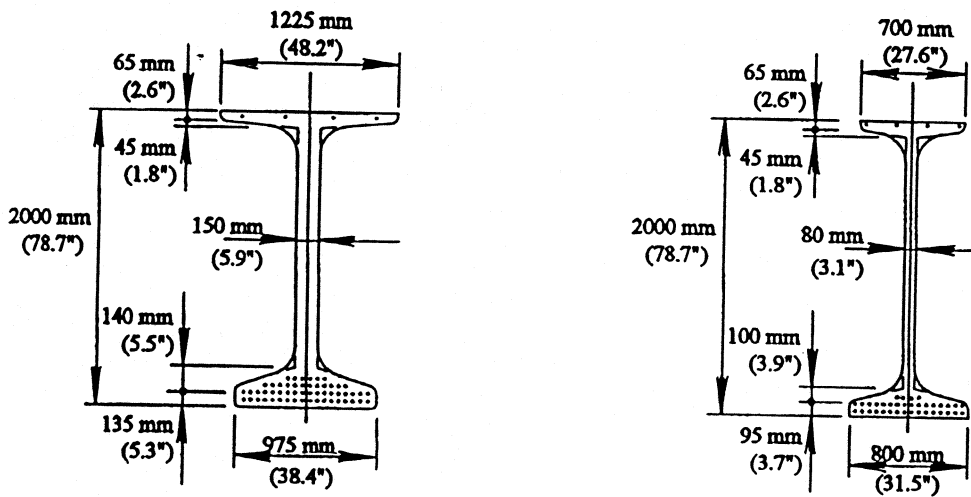
RPC:n hinta voi aluksi tuntua kohtuuttomalta verrattuna tavanomaiseen betoniin ja myös korkealujuusbetoniin, mutta vertailu tulisikin tehdä teräkseen tilavuuden perusteella, sillä teräksen lujuusominaisuudet ovat lähellä RPC:tä. Kuutio terästä maksaa noin 28 000 mk tai 3 600 mk/tn.

Taloudellisuustarkastelu siltaesimerkin avulla (kuva 1) paljastaa, että tavanomainen siltapalkki tuotettiin pinta-alalla 10,35 m<sup>2</sup>, joka merkitsi 0,67 m<sup>3</sup> betonia/silta-m<sup>2</sup>. Jos se olisi tehty RPC200:sta, poikkipinta-ala olisi voitu pienentää 3,55 m<sup>2</sup>:ksi, joka merkitsee 0,23 m<sup>3</sup> betonia/silta-m<sup>2</sup>. Tämä on vain kolmasosa materiaalista. Kuvassa 2 nähdään vastaava mittojen muutos jännebetonipalkin osalta.





Kuva 1. Siltapoikkileikkauksen vertailu tehtynä tavanomaisesta betonista tai RPC200:sta. Vasemmalla on tavanomaista betonia, oikealla on RPC200:aa /10/.



Kuva 2. Jännebetonipalkkien dimensiot /11/.

RPC:n käytön taloudellisuutta arvioitaessa on otettava huomioon mm. seuraavat edut, jotka kompensoivat RPC:n materiaalikustannuksia:

- Korkea lujuus vähentää rakenteen painoa (taulukko 6).
- Hyvät sitkeysominaisuudet antavat suuremman rakenteellisen luotettavuuden myös ylikuormitustapauksissa.
- Hyvät korroosionkesto-ominaisuudet vähentävät huoltotarvetta ja pidentävät rakenteen kestoikää.
- Rakennekorkeudet ym. dimensiot pienenevät ja säästävät tilaa (taulukko 6).
- Rakenneterästen käyttö vähenee.
- Kuormakapasiteetti on korkea.
- Rakenteen halkeiluvaara vähenee.

Näiden etujen taloudellinen merkitys on arvioitava sovelluskohtaisesti.

*Taulukko 6. Taivutuskestävyydeltään identtisten palkkipoikkileikkausten vertailu /3/.*

	<b>RPC</b>	<b>Teräs</b>	<b>Jännebetoni</b>	<b>Teräsbetoni</b>
Profiilin korkeus	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Paino	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

## 3. Ultralujan betonin käyttökohteet rakennusteollisuudessa

### 3.1 Putket

Betoniputkia ja -renkaita on käytetty monissa eri sovelluksissa kuten jäte- ja sadevesiviemäreissä, kaivoissa ja vesiputkissa paineenkin alaisena.

Vertailu RPC:n ja tavanomaisen betonin ominaisuuksista betoniputkissa on esitetty taulukossa 7. Jokainen näistä RPC:n ominaisuuksista voi lisätä betoniputken arvoa mekaanisten, fysikaalisten tai säilyvyysominaisuuksien osalta.

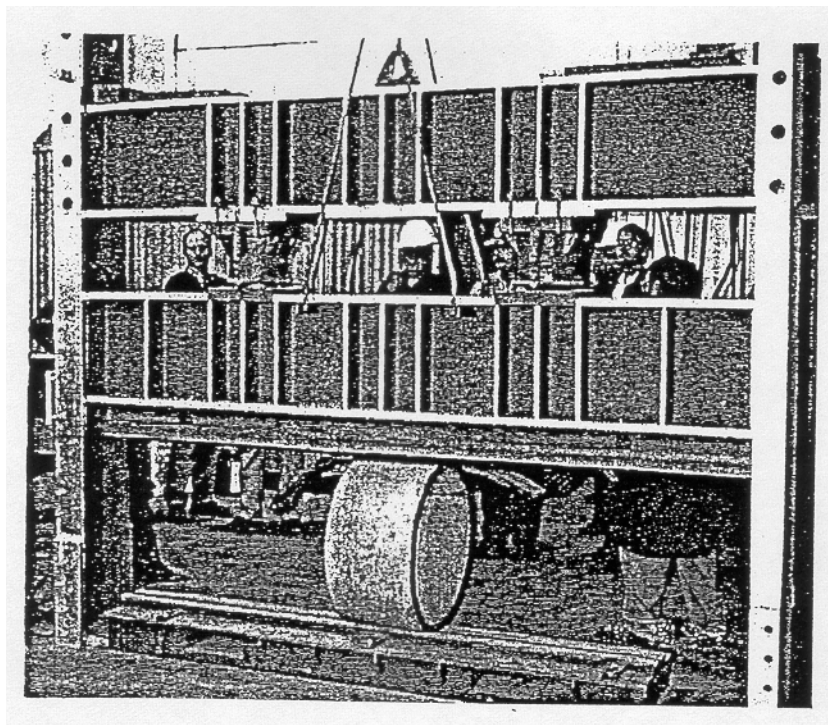
Taulukko 7. RPC:n ja tavanomaisen betonin vertailu putkisovelluksessa /5/.

Ominaisuus	Perinteinen betoni-putki	RPC-putki
Mekaaniset ominaisuudet – puristuslujuus – taivutuslujuus	35–70 MPa 5–10 MPa	180–200 MPa 30–50 MPa
Fysikaaliset ominaisuudet – kulutuskestävyys – eroosiokorroosion kestävyys 8 h:n altistuksessa	3–4 70–85 cm <sup>3</sup> tilavuuden pienentyminen	1,27 15 cm <sup>3</sup> tilavuuden pienentyminen
Säilyvyys – vedenimu – hydrogeenisulfaatin kestävyys 228:n päivän altistuksessa	0,35 kg/m <sup>2</sup> 10 %:n massan pienentyminen	0,05 kg/m <sup>2</sup> 2,5 %:n massan pienentyminen

Putkituotannossa on RPC:n avulla saavutettu Yhdysvalloissa mm. seuraavia etuja:

- Kun tuotetaan kevyitä tuotteita (putken seinämän paksuus 25–30 mm), käsittely- ja kuljetuskustannukset pienenevät.
- Saavutetaan virtaviivaistettu tuotanto eliminoimalla työvaiheita valmistusprosessista.
- RPC mahdollistaa tehokkaan rakenteellisen suunnittelun käyttämällä joustavan putken teoriaa.
- Vesitiiviys paranee.
- Liitosdetaljeja voidaan parantaa.
- Käsittely- ja asennuskustannukset pienenevät.
- Asennusaika pienenee.
- Aggressiivisten kemikaalien kestävyys paranee ja siten huoltotarve vähenee ja putken kestoikä kasvaa.

Näihin tavoitteisiin onkin jo päästy Yhdysvalloissa käyttäen RPC200:aa (kuva 3).



*Kuva 3. RPC-rengas kuormituskokeessa; renkaan seinämän paksuus on 30 mm /5/.*

RPC-putkien valmistuksessa on kokeiltu neljää erilaista perinteistä putkien valmistusmenetelmää

- märkävalumenetelmää (perusmenetelmä),
- keskipakovalumenetelmää (soveltuu paineputkille, joiden halkaisija  $d < 1200$  mm),
- kuivavalumenetelmää (voimakkaat täryttimet, jäykkä massa) ja
- Packer-menetelmää (soveltuu putkille  $d < 1200$  mm; ulkomuotti, jonka sisällä pyörivä sisämuotti, joka liikkuu alhaalta ylös muokaten plastisesta massasta putken; yleensä pitkälle automatisoitu prosessi).

Packer-menetelmä on osoittautunut parhaiten soveltuvaksi RPC-paineputkien valmistukseen. Muillakin menetelmillä näiden putkien valmistus on siis mahdollista. RPC-putken valujakso Packer-menetelmässä vaati 1,5 minuuttia. Valun ja muotistapurun jälkeen RPC-putki säilytetään huoneen lämmössä oloissa, joissa kosteus on 90–100 % aika vaihtelee 16–24 tuntiin. Tämän jakson jälkeen seuraa lämpökäsittely kuumalla höyryllä 90 °C:ssa 24 tunnin ajan 100 %:n suhteellisessa kosteudessa /5/.

Ainakin halkaisijaltaan pienet RPC-paineputket ovat osoittautuneet taloudellisesti kannattaviksi, ja niiden odotetaan valtaavan osan nykyisiltä valtatuoiteilta putkimarkkinoilla.

## 3.2 Sillat

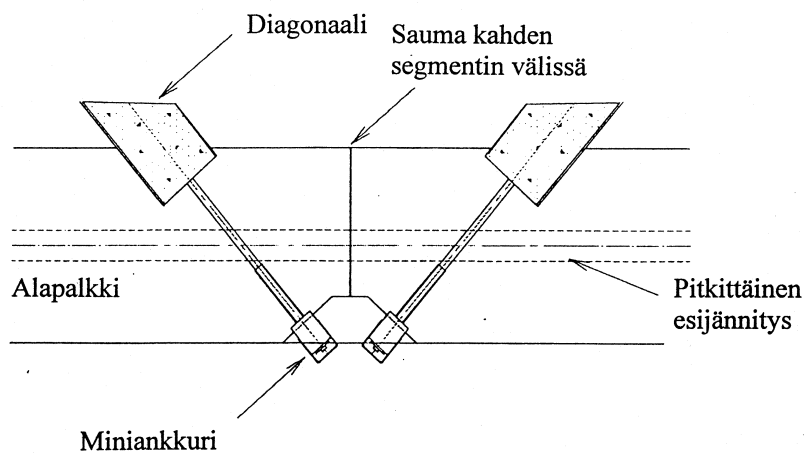
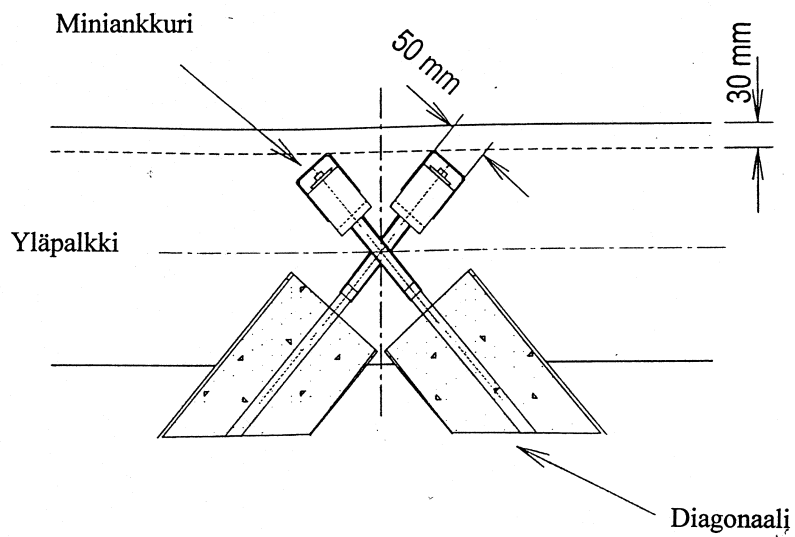
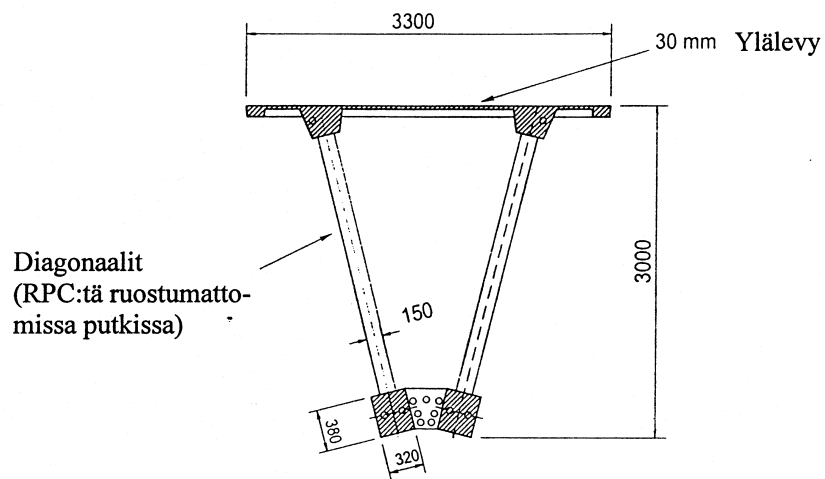
RPC:n avulla on jo toteutettu ainakin yksi täysimittakaavainen siltahanke Kanadassa 1997. Sherbrooken kävelysilta (kuva 4) on ensimmäinen jälkijännitetty rakenne, jossa on käytetty RPC200:aa. RPC200:n ominaisuuksia Sherbrooken kävelysillassa ovat mm.

- 200 MPa:n puristuslujuus,
- 7 MPa:n vetolujuus,
- 40 MPa:n taivutusvetolujuus ja
- kimmomoduuli  $E = 50 \text{ GPa}$ .



*Kuva 4. Sherbrooken RPC-kävelysilta Kanadassa /1/.*

Sherbrooken kävelysilta on kolmiulotteinen ristikkorakenne (kuva 5). RPC-kansilaatta, joka toimii ristikon yläpaarteena, on 3,3 m leveä ja 30 mm paksu.

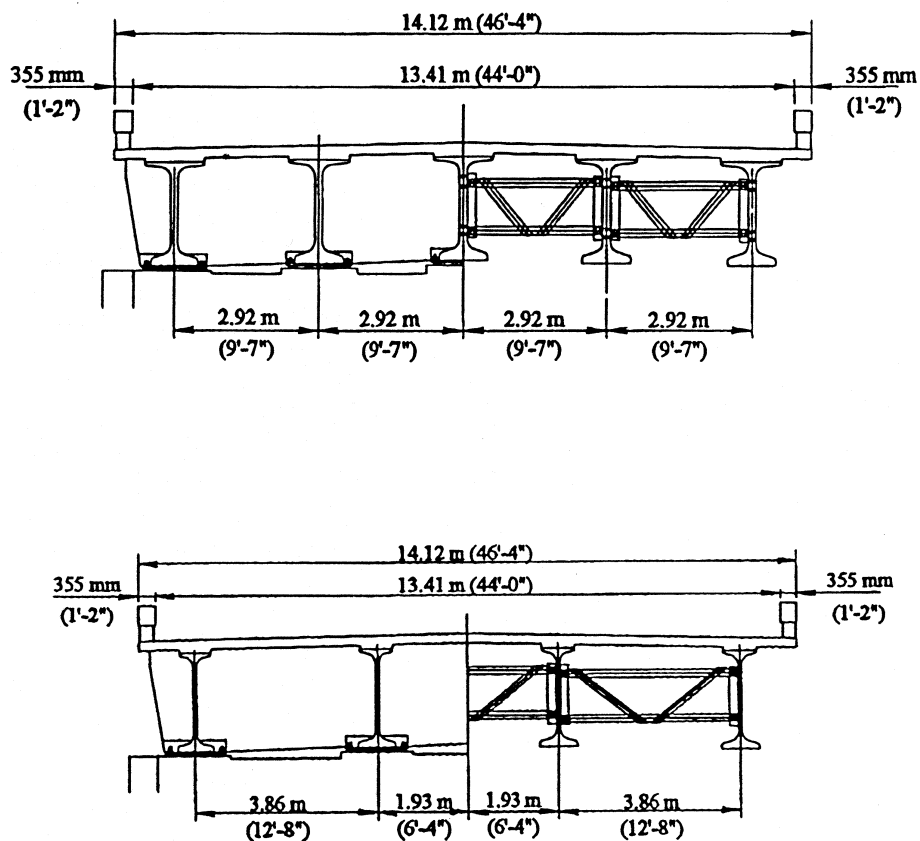


Kuva 5. Sherbroken sillan rakenne /1/.

Diagonaalit on tehty ruostumattomasta teräsputkesta, joka on täytetty RPC:llä. Alapaarre on RPC:stä ja poikkileikkaukseltaan 320 mm x 380 mm. Se on jälkijännitetty. Kansilaatta on jännitetty poikkisuunnassa. Diagonaalit on kiinnitetty jännepunoksilla ylä- ja alapaarteisiin.

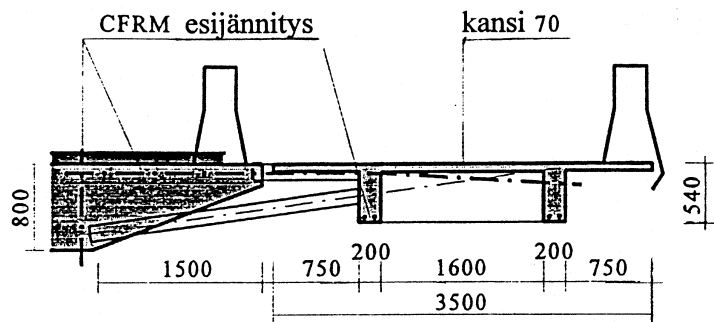
Rakenteen jänneväli on 60 m ja rakennekorkeus 3,5 m. Sillan segmenttielementtien valmistus kesti kaksi kuukautta ja niiden asennus kaksi viikkoa. Silta on koerakenne vielä valmistumisensa jälkeenkin, sillä sen ominaisuuksia ja käyttäytymistä seurataan koko ajan.

Myös suurempia siltoja on suunniteltu rakennettavaksi RPC:stä. Kuvassa 6 on poikkileikkaus maantiesillasta, joka on suunniteltu sekä tavanomaisena betonirakenteena että RPC:stä valmistettuna. Tällöin on voitu jättää yksi pääkannattajista pois, mikä tuo merkittäviä säästöjä, vaikka kansilaattaa joudutaankin vähän vahventamaan. Muita etuja, kuten dimensioiden pienentyminen siltapalkkien osalta, on esitetty jo kohdassa 2.4.

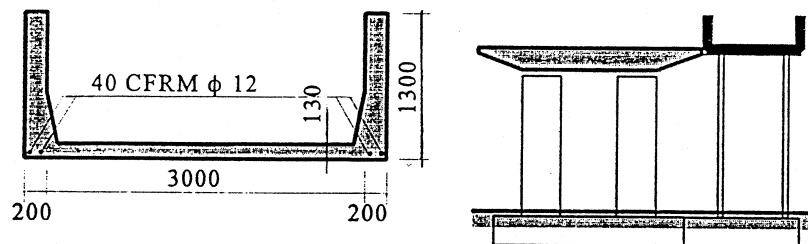


Kuva 6. Maantiesillan poikkileikkaus a) tavanomaisesta betonista b) RPC:stä //1/.

RPC:stä on edullista valmistaa myös siltarakenteiden osia. Kuvassa 7 on suunniteltu siltarakenteen osa RPC:stä: ajokaista keskiraskaalle liikenteelle maksimikuorma kolme 10 tonnin akselia. Jänneväli on 10 m. Kuvassa 8 on esitetty raskaan liikenteen lisäväylä tehtynä RPC:stä jännevälin ollessa 30 m. Maksimikuorma on kaksi kuorma-autoa, joissa kummassakin on kolme 17 tonnin akselia.



Kuva 7. RPC-ajoväylä keskiraskaalle liikenteelle /5/.



Kuva 8. RPC-lisäajoväylä raskaalle liikenteelle /5/.

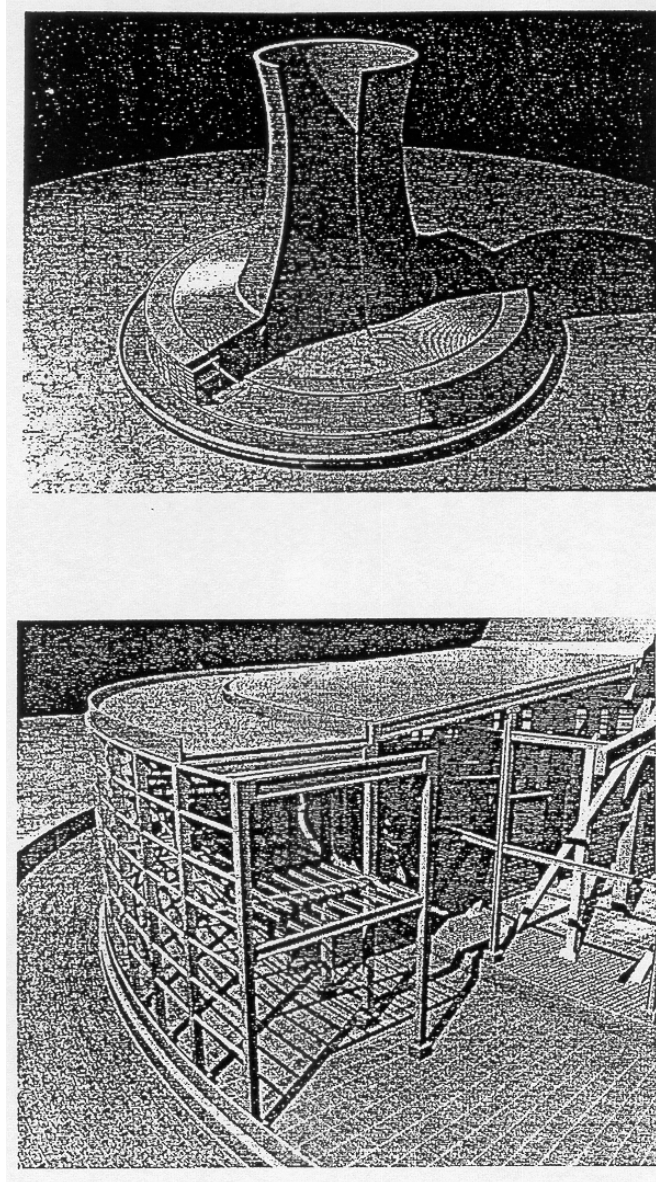
### 3.3 Voimalaitoskohteet

Voimalaitossovelluksissa RPC:n erikoisominaisuuksista on hyvien lujuusominaisuuksien lisäksi erityistä etua hyvistä säilyvyysominaisuuksista ja erinomaisista mikrorakeneominaisuuksista.

RPC:tä on suunniteltu käytettäväksi ydinjättesäiliöissä ydinjätteen pitkäaikaiseen säilytykseen erityisesti RPC:n erinomaisen mikrorakenteen vuoksi. RPC:ssä on erittäin vähän huokosia, mikä vähentää materiaalin siirtymistä sen lävitse. Kokeet ovat käynnissä Ranskan atomienergian komissiossa CEA:ssa /5/. Kokeet kohdistuvat huokoisuuteen, läpäisevyyteen, tritiumin diffuusion, mekaanisiin ominaisuuksiin ja säteilyyn. Alustavat kokeet on jo tehty ja tulokset ovat lupaavia. Niiden mukaan RPC:n ominaisuudet



ovat parempia kuin minkään muun sementtipohjaisen materiaalin, joita on CEA:ssa tutkittu. Ne täyttävät melkein kaikki kyseisille jätesäiliöille asetetut vaatimukset. RPC:n käyttöä pitkäaikaissäilytykseen tutkitaan edelleen. RPC:n palonkesto-ominaisuudet saattavat tuoda ongelmia tässä sovelluksessa eli ne on myös ratkaistava.



*Kuva 9. Cattenomin voimalaitoksen jäähdytystorni ja palkkirakenteita /5/.*

Voimalaitoksen kattopalkkeissa on RPC:tä käytetty Ranskassa jo kahdessa kohteessa. Ensin Chinon voimalaitoksessa ja Cattenomin voimalassa (kuva 9). Palkkirakenteet oli alkuaan tehty tavanomaisesta betonista, mutta ne korvattiin RPC-palkeilla. Kuva yksittäisestä palkista on esitetty kohdassa 5 kuvassa 16. RPC-palkit valmisti Bouygues Travaux Publicas -niminen yritys elementtitehtaallaan Ranskassa. Keskeisiä syitä RPC:n käyttöön tässä kohteessa olivat RPC:n hyvät säilyvyysominaisuudet ja mahdollisuus

pienentää rakenteen paksuutta, kokoa ja painoa (huonot pohja-olo perustuksissa) sekä Ranskassa juuri valmistuneet suunnitteluohjeet RPC-palkeille. Myös palkkisovelluksissa tarvitaan usein hyvää palonkestoa, ja tämä ominaisuus on vielä RPC:n osalta osittain epäselvä.

### 3.4 Palkit

RPC:n käyttösovellukset palkkirakenteissa ovat edenneet jo pitkälle kuten kohdissa 2.4, 3.2, ja 3.3:kin on todettu. Myös kohdassa 5 esitetään yksi palkkiesimerkki kuvassa 16. RPC-palkkeja on käytetty siis jo silloissa ja voimalaitoksen rakenteissa. RPC:n käytön keskeisiä etuja palkkirakenteissa verrattuna tavanomaisiin betonipalkkeihin ovat

- hyvät lujuusominaisuudet,
- pienet dimensiot,
- rakenteen keveys,
- hyvät säilyvyysominaisuudet ja
- sekundaariraudoituksen tarpeettomuus (leikkausraudoitus, haat yms.).

Ongelmana ovat vielä RPC:n palonkesto-ominaisuudet, joita on vain osittain selvitetty.

Suunnitteluohjeetkin on jo tehty Ranskassa RPC-jännebetonipalkeille (ks. luku 5).

### 3.5 Julkisivupaneelit

RPC:n erikoisominaisuuksien avulla voidaan nykyisiä tavanomaisesta betonista tehtyjä julkisivupaneeleja parantaa. Koska RPC:ssä ei ole karkeata runkoainetta, voidaan tehdä vain 5–15 mm paksuja paneeleja. Tällainen tuote on jo nyt saatavissa Ranskassa useissa eri väreissä, muodoissa ja erilaisilla pintaprofiloinneilla /3/.

Nämä 15 mm paksut ranskalaiset paneelit ovat 2 000 mm pitkiä ja 1 500 mm leveitä. Jotkut niistä on muotoiltu sekä pitkittäis- että poikittaissuunnassa. RPC-paneeleissa on käytetty lisäaineita, joilla on estetty huokosten syntyminen paneelin ulkopintaan. Tuotteen hyvän notkeuden vuoksi tarvitaan vain hyvin vähän tärytystä massan tiivistämisessä tuotteen valmistusvaiheessa. RPC-paneeli valetaan Ranskassa puumuottiin, joka on käsitelty muotinirroitusaaineella. RPC:llä voidaan tuottaa korkealaatuista viimeisteltyä ulkopintaa, joka voidaan maalata. Tähän maalaukseen on käytetty erityistä synteettistä maalaustekniikkaa, joka on samanlaista, kuin autoteollisuuden käyttämä. Se antaa mahdollisuuden moniin eri väreihin.

Tässä erikoismaalaustekniikassa on lämpökäsittely korkeassa lämpötilassa (200 °C) viimeistelyvaiheessa. Lopputulokseksi saadaan yhtenäinen väripinta, joka kestää hyvin aggressiivisessäkin ympäristössä myös UV-säteilyä. Näin parannetaan paneelin kestävyttä hyvien RPC-kestävyysominaisuuksien lisäksi.

Kun verrataan tavanomaisesta betonista tai luonnonkivistä tehtyä paneelia RPC:stä tehtyyn, havaitaan RPC-paneelien pieni paino ja kuitenkin suuret pituus- ja korkeusdimensiot. RPC-paneelien käsittely on helpompaa asennuksen aikana. Asennus voidaan tehdä perinteellisiin runkorakenteisiin, esimerkiksi teräsrunkoon. Hienosäätö asennuksen aikana on myös joustavampaa. Kaikki nämä tekijät johtavat entistä taloudellisempaan julkisivujärjestelmään rakentamisen aikana sekä säästöihin alentuvina huolto-, korjaus- ja uusimiskuluina. Palonkesto-ominaisuuksia kysytään usein myös julkisivuverhouksissa. RPC:n osalta tämä asia vaatii vielä lisätutkimuksia.

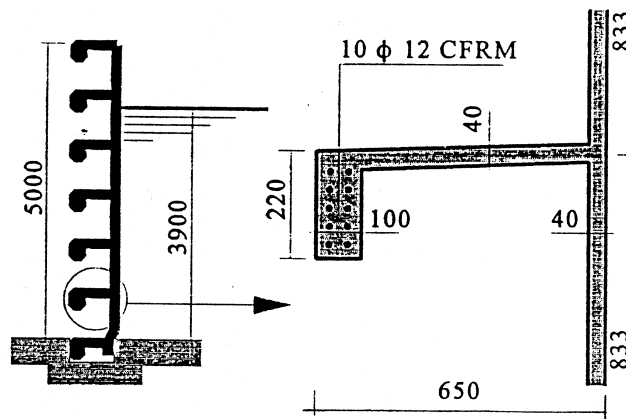
### **3.6 Vesisäiliöt, altaat ja kanavarakenteet**

Kohdassa 3.3 esiteltiin jo RPC:n käyttömahdollisuutta säiliörakenteena esimerkiksi ydinjätteen varastosäiliöt jne. RPC:tä voisi hyödyntää myös tavanomaisemmissa ja ehkä vähemmän vaativissakin säiliörakenteissa kuten vesi- tai öljysäiliöissä. Perusteena ovat RPC:n samat erityisominaisuudet kuten ydinjättesäiliöissäkin eli

- hyvä tiiviys, erittäin vähän huokosia,
- hyvät lujuusominaisuudet,
- korroosionkestävyys,
- rakenteen keveys ja
- helppo muotoiltavuus.

Säiliörakenteissa kannattaa todennäköisesti käyttää esivalmistustekniikkaa ja RPC:n korkeimpia lujuuksia 500–800 MPa.

Säiliörakenteiden lisäksi mainittuja ominaisuuksia tarvitaan usein erilaisissa allasrakenteissa kuten vesi- ja jätevesialtaissa. Myös näissä RPC:n erikoisominaisuudet pääsevät oikeuksiinsa. Yksi RPC:n erikoissovellus on esitetty kuvassa 10. Siinä kanavan teräksinen sulkuportti on suunniteltu korvattavaksi RPC-sulkuportilla.



Kuva 10. Kanavan RPC-sulkuportti /5/.

12 m leveä kanava on suunniteltu suljettavaksi 5 m korkealla RPC-sulkuportilla. Veden korkeus on 3,9 m. Näyttää siltä, että on mahdollista suunnitella RPC-sulkuportti, joka kestää lähes samat kuormat kuin vastaava terässulkuportti. Painoissa on vähän eroa -15 tonnia RPC:n eduksi. RPC-sulkuportin kuormitetuin palkki on esijännitetty 10 Ø 12 CFRM-jäniteillä (hiilikuitujäniteillä).

### 3.7 Puolustusvoimien suojarakenteet

RPC:n yhtenä sovellusalueena rakentamisessa ovat todennäköisesti puolustusvoimien erilaiset suojarakenteet kuten miehistösuojat ja tarvikevarastot. Nykyisin niitä rakennetaan tavanomaisista betoneista tai esimerkiksi teräsohutlevystä.

Linnoitustöiden työmaalla käytetään joko tavanomaista betonivalutekniikkaa, betoni-ruiskutusta tai rakenteet tehdään esivalmisteisista betonielementeistä. Teräsohutlevyrakenteet ovat kilpailukykyisiä betonirakenteiden kanssa erityisesti erilaisissa maanalaisissa kupolirakenteissa. Linnoitustöiden merkitys on vähenemässä miehistön ja varusteiden nopean liikuteltavuuden merkityksen kasvaessa, mutta nopeasti rakennettavia kiinteitä suojarakenteitakin tarvitaan.

RPC:n erityisen hyvät lujuusominaisuudet, rakenteiden keveys ja hyvä korroosionkesto antavat merkittäviä etuja myös erilaisissa suojarakenteissa. Puolustusvoimien suojarakenteiden teossa tärkeitä ominaisuuksia ovat usein myös

- komponenttien esivalmistettavuus,
- rakenteiden valmistuksen nopeus tehtaalla ja työmaalla,
- hyvä räjähdyskuormien kestävyys ja
- "yksinkertainen", jokamiehen helposti oppima valmistustekniikka.

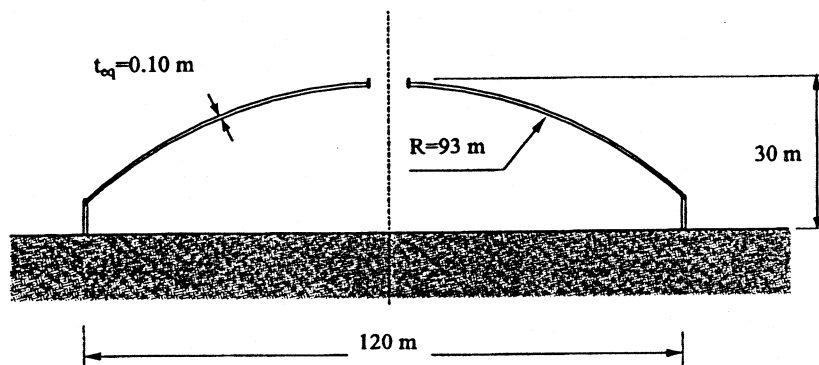
Näihin vaatimuksiin voidaan RPC:n alemmissa lujuusluokissa (200–300 MPa) vastata varsin hyvin. RPC:n räjähdyskuormien kestävyys on osoitettava kokeilla. Tulokset ovat todennäköisesti hyviä, kun ottaa huomioon RPC:n erinomaiset lujuusominaisuudet. RPC-tuotteiden valmistusprosessi ei ole erityisen nopea, vaan vaatii useita tunteja pidemmän ajan kuin perinteellisten betonielementtien valmistus. Tämä ei kuitenkaan muodostune useinkaan RPC:n käytön esteeksi. Palonkestoa vaativissa kohteissa tarvitaan vielä lisätietoa RPC:n ominaisuuksista.

### 3.8 Muut potentiaaliset käyttökohteet rakentamisessa

RPC:lle löytyy useita potentiaalisia käyttökohteita rakentamisessa kuten edelläkin on esitetty. Seuraavassa on vielä lyhyesti esitelty muutamia mahdollisia RPC:n soveltamisalueita, joiden edullisuutta ei ole vielä tarkkaan tutkittu, mutta jotka todennäköisesti ovat potentiaalisia käyttökohteita.

Palonkestoa vaativissa sovelluksissa on kuitenkin ensin selvitettävä RPC:n palonkestominaisuudet, jotka voivat alustavien kokeiden perusteella tulla käyttöä rajoittaviksi.

Ohuet kupoli- ja kuorirakenteet soveltuvat hyvin RPC:n käyttöalueeksi. Kuvassa 11 on suunniteltu RPC200:sta halkaisijaltaan 120 m pallomainen kupolihalli. Rakenne on saateenvarjomainen, ja sen jäykistävät rivat on jälkijännitetty. Kuorirakenteen paksuus on 30 mm. Koko rakennekorkeus (ripa + kuori) on vain 100 mm.



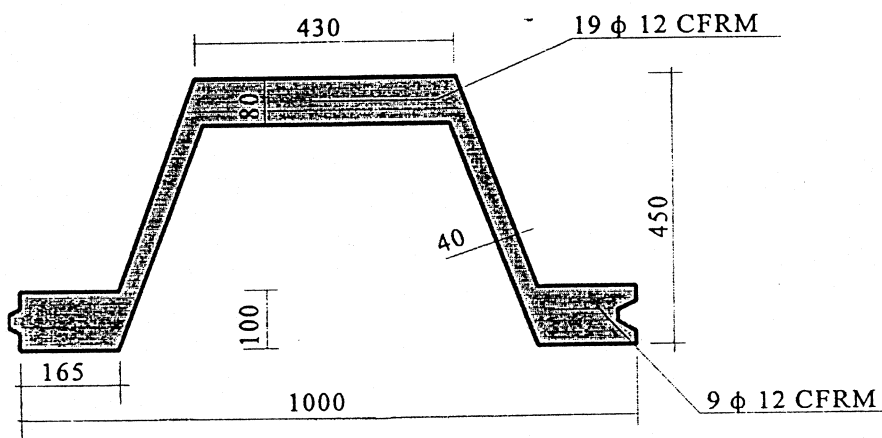
*Kuva 11. Pallomainen kupolihalli /2/.*

RPC:n etuja kupolirakenteessa ovat sen hyvät lujuusominaisuudet ja niistä aiheutuvat rakenteen keveys ja pienet dimensiot.

Kaivantojen tuet voivat olla yksi RPC:n käyttökohteita. Sen etuina ovat mm. kestävyys, säilyvyys ja rakenteen jäykkyys. Kuvassa 12 on esitetty RPC-vaihtoehto taräsponttiseinälle, jota käytetään raskaasti kuormitetuissa rakenteissa. Vastaavan teräspontin profiilin korkeus on 350 mm, leveys 1 000 mm ja paino 170 kg/m<sup>2</sup>. Vastaava RPC-tukipontti painaa 240 kg/m<sup>2</sup> ja sen korkeus on 450 mm. Se on jännitetty 37  $\phi$  12 CFRM-jänteellä. Se ei tarvitse korroosionestokäsittelyä.

Vastaava K65-betoninen jännitetty tukiseinäponti on profiilikorkeudeltaan 600 mm ja painaa 560 kg/m<sup>2</sup>.

Kevyempi teräksinen kaivannon tukiseinäponti, jota käytetään jokien ja kanavien seinämissä, on profiilikorkeudeltaan 190 mm ja painaa 49 kg/m<sup>2</sup>. Sen korroosionestokäsittely lisää painoa jopa 115 kg/m<sup>2</sup> merisatamaolosuhteissa. Vastaava RPC-rakenne on profiililtaan 200 mm korkea ja painaa 165 kg/m<sup>2</sup>. Se on silloin esijännitetty 14  $\phi$  12 CFRM-jänteellä.



Kuva 12. Ponttiseinäprofiili RPC200:sta /5/.

Seuraavaksi luetellaan muutamia mahdollisia RPC:n käyttökohteita rakentamisessa:

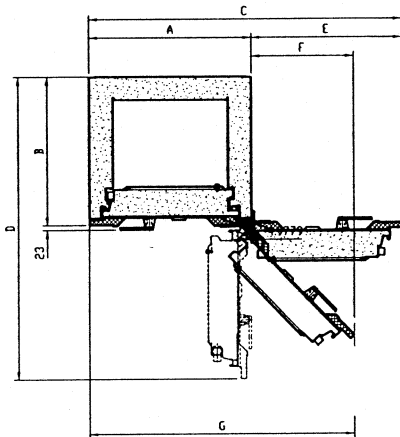
- hoikat pilarit; kantavuus kasvaa, dimensiot ja paino pienenevät,
- paalut ja niiden osat; kantavuus kasvaa, dimensiot ja paino pienenevät,
- väestönsuojien rakenteet; kestävät räjähdyskuormia entistä paremmin,
- pankkiholvit; kestävät räjähdyskuormia entistä paremmin ja niiden murtosuojia paranee,
- turva- ja palo-ovet; kestävät todennäköisesti isku-, räjähdys- ja palokuormia (tutkittava) entistä paremmin, murtosuojaus paranee,
- kaivonkannet; korroosionkesto paranee, rakenne kevenee,

- suojakaiteet maanteiden varsille; korroosionkesto paranee,
- lattialevyt; kulutuksen- ja korroosionkesto paranee,
- tunnelien ja kaivoskuilujen sisäverhoukset; korroosionkesto- ja lujuusominaisuudet paranevat ja
- tietokonekeskusten suojaseinät; lujuusominaisuudet paranevat, murtosuoja paranee.

## 4. Ultralujan betonin käyttökohteet muussa teollisuudessa

### 4.1 Kassakaapit

Kassakaapeissa käytetään betonia seinärakenteen sisällä kassakaapin murto- ja palosuojauksen parantamiseen. Betonityypit vaihtelevat tarpeen mukaan vaahtobetonista (palosuojaukseen) korkealujuusbetoniin (lujuusluokkaan K80 asti). Kuvassa 13 on tyyppillinen kassakaappipoikkileikkaus päämittoineen. Kuvasta 14 nähdään murtosuojatasoon E2 ja E3 kuuluvien kassakaappien seinämien poikkileikkaukset ja niiden betonirakenteen teräslevyjen välissä.



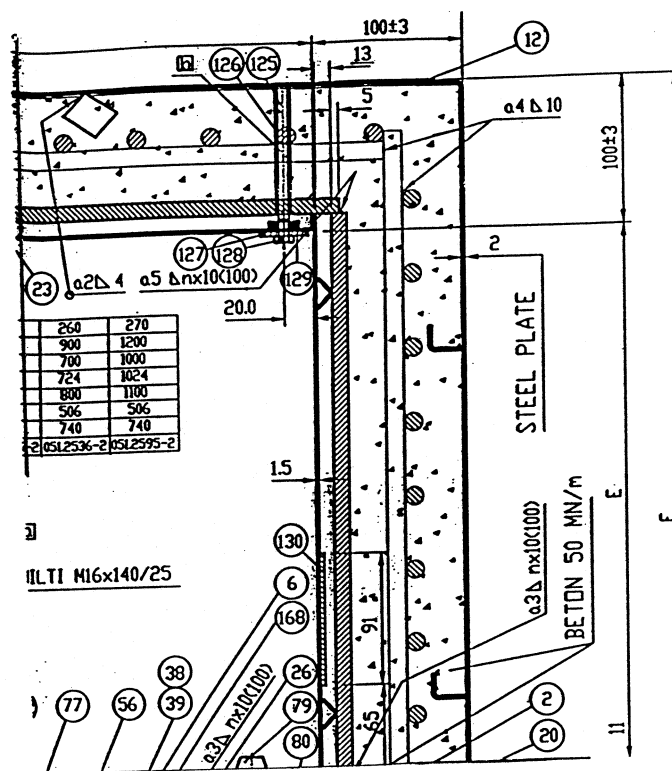
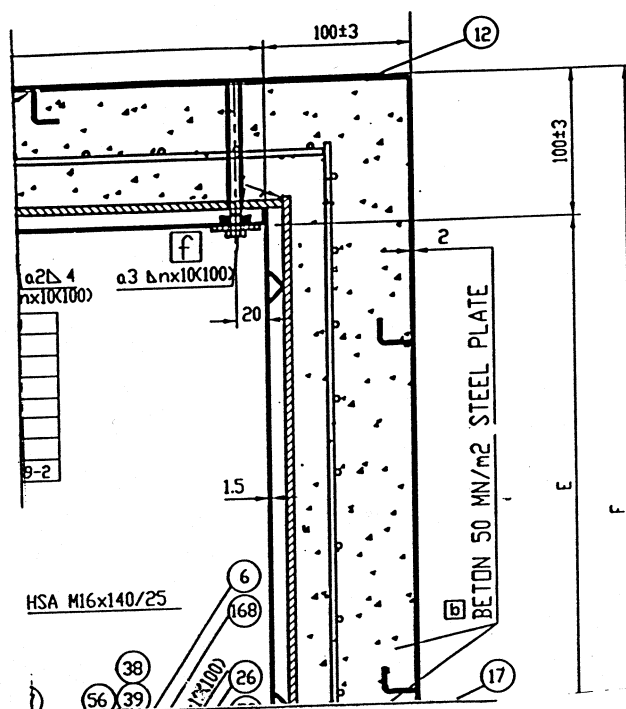
Koko- luokka	Ulkomitat, mm		
	kork.	lev. A	syv. B
225	750	686	628
230	1100	686	628
240	1350	806	673
250	1700	806	673
260	2050	900	768
270	2050	1200	768

Koko- luokka	Oven aukeamisen vaatima tila, mm				
	C	D	E	F	G
225	1316	1280	630	429	1115
230	1316	1280	630	429	1115
240	1555	1450	749	512	1318
250	1555	1450	749	512	1318
260	1744	1630	844	578	1478
270	2344	1930	1144	791	1991

*F ja G ilmaisevat, kuinka paljon ovella pitää olla tilaa aueta, jotta sisälokeroita ja ulosvedettäviä sisustusosia voidaan käyttää esteettömästi.*

*Kuva 13. Kassakaapin poikkileikkaus päämittoineen /9/.*





Kuva 14. Kassakaapin seinärakenne murtosuoja-alueissa E2 ja E3.

Ultralujan betonin avulla on mahdollisuus parantaa kassakaapin murtosuojatasoa. Palo-  
suojan parantuminen ei ole todennäköistä, mutta sekin on ensin tutkittava kokeilla.

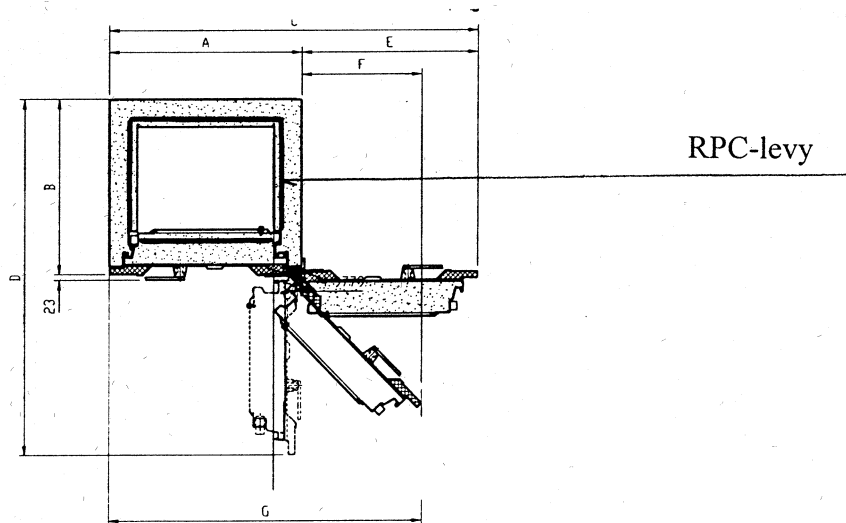
Murtosuojatason parantamiseksi tarvitaan entistä parempaa puristus-, veto- ja leikkaus-  
lujuutta sekä hyvää iskunkestävyyttä. Näiltä osin RPC-betoni vastaa odotuksia. Jos kas-  
sakaapin seinärakenteessa käytetään RPC:tä, on periaatteessa neljä mahdollisuutta:

- koko seinärakenne tehdään RPC:stä,
- teräksisten ulko- ja sisälevyjen väli valetaan RPC:stä,
- teräksisten ulko- ja sisälevyjen välissä osa nykyisestä rakenteesta tehdään RPC:stä tai
- teräksinen sisälevy korvataan RPC-levyllä.

Jos kassakaapin seinä tehdään kokonaan RPC:stä, ongelmana on lähinnä se, että seinän  
läpi murtautumiseen tarvitaan periaatteessa vain yksi työkalu. Jos murtautumiseen tar-  
vittava aika on tällöin hyvin pitkä, murtosuojaus on kuitenkin onnistunut.

Jos RPC:tä valetaan kassakaapin teräksisten ulko- ja sisälevyjen väliin kuten nyt tavan-  
omaista betonia, voidaan murtosuojatasoa parantaa. Tällöin on kysymys rakenteen hin-  
nasta ja RPC:n korkeimpien lujuusluokkien vaatimista erikoislaitteista. Lujuusluokkiin  
200–250MPa päästään tavanomaisellakin valmistustekniikalla, mutta siitä korkeampiin  
tarvitaan erikoislaitteita.

RPC:stä voitaisiin tehdä hyvin korkeastakin lujuusluokasta erikoislaitteilla ohut levy  
(paksuus 5–8 mm), joka asennetaan kassakaapin perinteellisen seinärakenteen sisään  
lähelle sisäpintaa (kuva 15). Tällöin tämä esivalmisteinen RPC-levy todennäköisesti  
lisäisi kassakaapin murtosuojausta. RPC:n läpi murtautumiseen tarvittaisiin mahdolli-  
sesti oma työkalu, ja ainakin murtautuminen hidastuisi oleellisesti RPC-levyn ansiosta.



*Kuva 15. Esivalmistainen RPC-levy kassakaapin seinärakenteessa.*

Esivalmistainen RPC-levy voisi olla myös kassakaapin sisälevynä, jolloin se toimisi myös valumuottina.

## 4.2 Paperikoneen telat

RPC:tä voidaan mahdollisesti käyttää myös paperikoneiden puristinteloissa.

Paperikoneen puristintelana on yleensä graniitista tehtyä massiinen tela. Telan pituus on esimerkiksi 6 000–10 000 mm ja halkaisija 1 400 mm. Puristintelana on kokeiltu myös teräksistä telaa, ja betonitelankin rakennetta on mietitty. Puristintela sijaitsee paperikoneen keskiosassa viiran ja kuivatussylintereiden välissä. Puristintelan tarkoituksena on poistaa vettä kosteasta paperirainasta.

Graniittitela painaa noin 60 000 kg. Paperikoneella ajetaan nykyisin yli tuhannen metrin minuuttivauhdilla. Tällöin telaan kohdistuu valtavia voimia, jotka saattavat räjäyttää graniittisen puristintelan. Prosessissa kivitelaan syntyy suuria lämmönvaihteluita, kun paperiraina katkeaa, mikä tapahtuu yleensä kolmesti vuorokaudessa. Nopeasti pyörivä kivitela ei aina kestä tällöin syntyviä jyrkkiä lämmönvaihteluita, vaan voi jopa räjähtää. Asiaan vaikuttavat myös graniitin sisäiset mikrohalkeamat.

Teräksinen puristintela kestää prosessissa syntyvät suuret lämpötilaerot, mutta sen ongelmana on paperin herkkä liimautuminen telaan. Kivistä märkä paperiraina irtoaa helposti.

Betonia on käytetty paperikoneen puristintelassa graniittitelaan tulevan teräsakselin kiinnijuottamisessa.

Graniittisia puristinteloja valmistetaan Suomessa noin 200 miljoonalla markalla vuosittain.

RPC:n etuja paperikoneen puristintelassa ovat seuraavat seikat:

- Betonitelasta paperi irtoaa hyvin.
- RPC:n hyvät lujuusominaisuudet takaavat, että RPC-tela kestää todennäköisesti telalle tulevat räsätykset graniittitela paremmin.
- RPC-tela on kevyempi kuin sen kilpailijat.
- RPC-telan valmistuskustannukset ovat pienemmät kuin sen kilpailijoilla.

RPC-telan ominaisuuksien varmistamiseksi tulisi tehdä ensin pienimuotoisella prototyypillä kokeita ja sen jälkeen vielä täysimittakaavaisella RPC-telalla.

RPC-telan sisäosa voitaisiin tehdä vaihtoehtoisesti myös valuraudasta. Tällöin vain telan uloin kerros esim. 100 mm:n paksuudelta valmistettaisiin RPC:stä.

RPC-telan ulkopinta kiilloitetaan vaadittuun sileyteen. Ongelmana RPC-telan valmistuksessa ainakin alkuvaiheessa olisi se, että betonin käyttö koneenrakentamisessa asettaa betonituotteen valmistajalle korkeammat laatuvaatimukset kuin mihin on perinteisesti totuttu. Paperinvalmistuksessa lienee myös muita sovellusmahdollisuuksia RPC:lle.

### **4.3 Kaatopaikkajyrät**

Kaatopaikkajyriensä teloissa RPC voisi korvata nykyiset teräsrakenteet joko osittain tai kokonaan. Tätä sovellusta voisi verrata hyvin edellisessä kohdassa esiteltyyn paperikoneen telaan. RPC:n etuja tässä sovelluksessa ovat mm.

- lujuusominaisuudet,
- hyvä korroosionkestävyys sekä
- edulliset valmistus- ja kokonaiskustannukset.

Kaatopaikkaympäristössä korostuvat RPC:n hyvät korroosionkesto-ominaisuudet erilaisia aggressiivisiä kaatopaikkakemikaaleja vastaan.

## 4.4 Muut potentiaaliset käyttökohteet

RPC:n potentiaalisia käyttösovelluksia muualla kuin rakennusteollisuudessa on ainakin seuraavilla alueilla.

*Erilaiset säiliöt.* Edellä esiteltiin jo RPC:n käyttömahdollisuutta ydinvoimajätteen varastointiin (kohta 3.3). RPC:n hyville lujuus- ja korroosionkesto-ominaisuuksille on todennäköisesti käyttöä myös muiden jätesäiliöiden sekä vesi- ja öljysäiliöidenkin alueella.

*Dieselmoottorien runkoja* on laboratoriossa tehty tavanomaisesta betonista (silikaattivalu) mm. Aachenin yliopistossa Saksassa. RPC:n erikoisominaisuudet (hyvä lujuus ja korroosion kesto, hinta / ominaisuudet) tuovat sille lisää kilpailukykyä myös tähän sovellukseen, jos RPC:n korkeiden lämpötilojen kestävyys osoittautuu riittäväksi.

*Pesukoneissa* on betonia käytetty perinteellisesti vastapainona. RPC:n käyttöä pesukoneissa voi perustella mm. sen suuremmalla tiheydellä (pienempi tilavuus) ja paremmalla lujuudella.

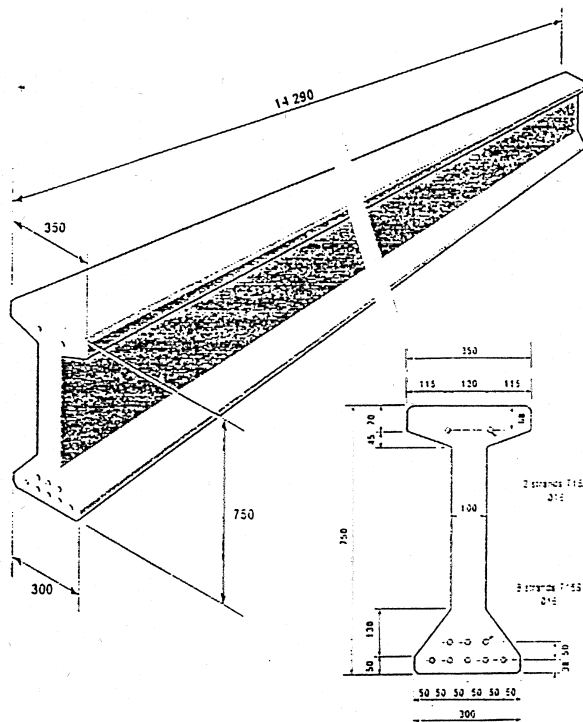
*Lentokoneiden siirtolaitteissa* lentokentällä käytetään jo nykyisin ultralujasta betonista tehtyä erikoislaakeria hyvien lujuus- ja kitkaominaisuuksien sekä edullisen hinnan vuoksi. RPC:n käyttö tässä sovelluksessa onnistunee siis varsin hyvin.

## 5. Suunnitteluohjeet

RPC:n ominaisuuksien, kuten materiaalin parantuneiden mekaanisten ominaisuuksien ja käytön ilman tavanomaisia passiivirauδοitteita, täysimittaista hyödyntämistä varten tarvitaan suunnitteluohjeet. Ranskassa ovat valmistuneet viime vuonna suunnitteluohjeet RPC200:sta tehdyille palkeille /5/. Näiden ohjeiden ensimmäinen sovelluskohde oli Cattenomin ydinvoimalan jäähdytystornin palkit (kuva 16). Nämä RPC200:n suunnitteluohjeet on laadittu jännebetonipalkkeja varten. RPC:n käyttöä tässä kohteessa puolsivat erityisesti rakenteiden keveys ja hyvät säilyvyysominaisuudet.

Ranskalaisten ohjeiden mukaan RPC:tä voi käyttää ilman passiivisiä raudotteita. Ohjeet perustuvat sekä kokeelliseen mitoitukseen että voimassa oleviin lakeihin. Ensimmäiset koepalkit valmistettiin jo vuonna 1994. Kokeissa on ollut sekä jänne- että teräsbetonipalkkeja. Palkkien mekaanisten kokeiden (taivutus- ja leikkaukset) lisäksi tehtiin myös säilyvyyskokeita (pitkäaikaiskokeita) erittäin aggressiivisissa oloissa mm. jännepuuston suojabetonikerroksen määrittämiseksi. Varmuuskertoimeksi palkin taivutuksessa päädyttiin arvoon 2 (koearvo/suunnitteluohjeen arvo = 2) ja leikkauksessa arvoon 4.

Palonkestävyydessä ranskalaisten suunnitteluohjeissa on vielä todennäköisesti puutteita.



Kuva 16. RPC-palkki Ranskassa ydinvoimalan katossa /5/.

Muita suunnitteluohjeita ollaan todennäköisesti laatimassa, koska RPC on jo materiaali-na tullut kaupallisellekin tasolle ainakin Ranskassa ja Yhdysvalloissa.

## 6. Koevalut

### 6.1 Koevalujen massat ja valmistustekniikka

Tässä esitutkimuksessa valmistettiin muutamia RPC-koekappaleita laboratoriossa autoklaavin ja kuumapuristimen (paine ja lämpö yhtäaikaan) avulla sekä paineen ja sen jälkeen korkean lämpökäsittelyn avulla. RPC:n alimmissa lujuuksissa käytettyä tavantomaista valmistustekniikkaa, lämpökäsittely 90 °C:ssa ilman puristavaa painetta, ei tässä yhteydessä tutkittu.

Autoklaavivalmistuksessa käytetyn massan koostumus on esitetty taulukossa 8. Sementtinä käytettiin valkosementtiä sen vaatiman pienen vesimäärän vuoksi.

*Taulukko 8. Autoklaavivalmistuksessa käytetyn massan koostumus.*

<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin määrä, kg/m<sup>3</sup></b>
Vesi	185
Sementti (valkosementti)	705
Silika	230
Kvartsi-hiekka	1010
Murskattu kvartsi	210
Supernotkistin	34,5 (litraa)
Teräskuidut	140

Autoklaavilla valmistettiin koekappaleita 215 °C:n lämpötilassa ja 2 MPa:n paineessa lämpökäsittelyajan ollessa kaksi vuorokautta. Osalle koekappaleista tuli 0,01 MPa:n paine heti massan muottiinvalun jälkeen. Autoklaaviin koekappaleet (70 x 70 x 70 mm<sup>3</sup> ja prismoja 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>) asetettiin 4:n tai 12 tunnin ikäisenä.

Autoklaavin avulla tehtiin myös onnistuneita ohuita (8 ja 12 mm paksuja) RPC-levyjä, (kuva 17) taulukon 8 massalla. Niitä voitaisiin käyttää esimerkiksi erilaisina seinälevyinä.



*Kuva 17. Ohutlevy RPC:stä.*

Kuumapuristimella (kuva 18) valmistettiin (400 °C:ssa ja 50 MPa:n paineessa 24 tuntia) koekappaleita taulukon 9 massasta tavoitteena huippulujuus. Näiden koekappaleiden valmistuksessa suunniteltiin käytettäväksi kaasunpaineeseen perustuvaa kuumapuristinta. Siinä paine jakautuu tasan koekappaleen ulkopinnalle. Laite on varsin kallis ja sen ongelmana on rikkoutumisvaara, jos käytetään vettä sisältävää materiaalia. Näin tässä hankkeessa päädyttiin mekaaniseen puristimeen, jossa on koekappaleen samanaikainen puristus ja lämmitys.





*Kuva 18. RPC:n valmistusta kuumapuristimella.*

*Taulukko 9. RPC:n koostumus kuumapuristinvalmistuksessa.*

<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin määrä, kg/m<sup>3</sup></b>
Vesi	181
Sementti (valkosementti)	955
Silika	220
Murskattu kvartsi	372
Supernotkistin	18
Teräskuidut	602
Teräsjauhe	1423

Taulukon massasta tehtiin myös koekappaleita paineen (50 MPa vain lyhytaikaisesti 20 °C:ssa) ja sen jälkeen korkean lämpökäsittelyn (400 °C 24 tuntia, alkusäilytys 2 vuorokautta 20 °C:ssa, sitten 60 °C:ssa 2 vuorokautta ja 2 vuorokautta 110 °C:ssa) avulla.

## 6.2 Kovettuneen RPC:n ominaisuudet

Nämä RPC-koekappaleiden lujuustulokset ovat yksittäisten koekappaleiden arvoja ja osoittavat siten vain suuruusluokan. Autoklaavilla tehtyjen koekappaleiden lujuustulokset on esitetty taulukossa 10.

*Taulukko 10. Autoklaavi-koekappaleiden lujuus (MPa), taulukon 8 massa.*

<b>Koekappale</b>	<b>Taivutusvetolujuus, MPa</b>	<b>Puristuslujuus, MPa</b>
Prisma	50	
Kuutio		
– ei alkupainetta		225
– alkupaine		223

Käytetyllä pienehköllä alkupaineella ei ollut oleellista merkitystä. Muuten tulokset vastaavat kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.

Ilman autoklaavia ja lämpökäsittelyä taulukon 8 massalla saavutettiin 155 MPa:n puristuslujuus.

Suurin puristuslujuus 250 MPa saavutettiin taulukon 8 massalla ilman painetta, kun alkusäilytys 110 °C:ssa oli 1 vrk ja jatkolämpökäsittely 200 °C:ssa 1 vrk.

Huippulujuuksiin tähtäävistä koekappaleista taulukon 9 massalla kuumapuristimella saatiin vain 96 MPa:n puristuslujuus.

Lyhytaikaisella paineella ja sen jälkeisellä lämpökäsittelyllä korkeassa lämpötilassa (400 °C) päästiin taulukon 9 massalla vain 110 MPa:n puristuslujuuteen. Taulukon 8 massalla (lisäksi notkistinta kaksinkertainen määrä) päästiin siis parhaimmillaan vain 250 MPa:n puristuslujuuteen kuten edellä esitettiin. Kirjallisuudessa esitettyyn usean sadan MPa:n puristuslujuuden tasoa ei nyt tehdyillä alustavilla kokeilla vielä saavutettu. Jatkotutkimuksessa taulukon 9 massalla painetta tulisi olla koko lämpökäsittelyn ajan.

## 7. Jatkotutkimussuunnitelma

Tämän esitutkimuksen perusteella on seuraavassa esitetty ehdotus RPC-betonien ja niiden käyttösovellusten jatkotutkimuksesta. Tähän aiheeseen on kansainvälistäkin kiinnostusta, joten siitä on mahdollista tehdä esimerkiksi EU-hanke.

### Johdanto

RPC-betonit ovat osoittautuneet mm. lujuusominaisuuksiltaan (puristuslujuus 200–800 MPa) erinomaisiksi. RPC:n palonkesto-ominaisuudet on tärkeä alue, joka vaatii jatkotutkimuksia. RPC:n palo-ominaisuudet saattavat rajoittaa niiden käyttöä merkittävästi. Huolimatta RPC:n tavanomaista betonia korkeammasta hinnasta taloudellisia käyttöalueita RPC-betoneille on sekä rakentamisen alueella että muussa teollisuudessa, esimerkiksi sillat ja niiden osat, putket, palkit, julkisivupaneelit, säiliöt ja kassakaapit. Tutkimuksessa keskitytään RPC:n lujuusluokkiin 200–400 MPa, joiden valmistustekniikka on oleellisesti helpompaa ja halvempaa kuin korkeammilla lujuuksilla.

RPC-teknologialla on myös vientiedellytyksiä. Kysymykseen tulee lähinnä taitotieto-, valmistuslaite- ja valmistustekniikkamyyni. RPC-tuotteiden keveyden vuoksi niiden kuljetus ja myynti ulkomaille on myös todennäköistä.

### Tavoitteet

Tavoitteena on RPC-betonin tiedollinen käyttöönottovalmius erityyppisissä käyttökohdeissa sekä rakenteiden (puristuslujuus 200–400 MPa) suunnittelu- ja valmistusohjeet kahdelle erilaiselle tuotteelle.

Hankkeen tavoitteena on myös kyseisen uuden tekniikan vientihankkeiden valmistelu lähinnä RPC-rakenteiden taitotieto- ja tuotantolaitteventinä.

### Tehtävät

Tavoitteena oleva RPC-betonin käyttövalmiuden hankkiminen käsittää päätutkimusprojektin ja useita yrityskohtaisia tuotekehitysprojekteja. Niiden välillä on jatkuva vuorovaikutus siten, että pääprojektin tuloksia hyödynnetään tuotekehitysprojekteissa ja tuotekehitysprojektit antavat tarpeita ja palautetta pääprojektille. Tuotekehityshankkeille haetaan erikseen hankekohtaisesti tuotekehitysavustusta, ja niiden tulokset ovat julkisia vain erikseen sovittavilta osin.

Pääprojektin tehtäviä ovat seuraavat:

1. RPC:n perusominaisuustietojen täydentäminen ja varmentaminen kokeilla. Niihin kuuluvat seuraavat erilaisissa käyttökohteissa yleisesti tarvittavat ominaisuudet ja niiden määrittämenetelmät:
  - lujuus- ja muodonmuutos-ominaisuudet, tarvittavilta osin myös pitkäaikaisominaisuudet,
  - lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet ja
  - palotekniset ominaisuudet.
2. Massan koostumuksen optimointi.
3. Valmistusmenetelmien jatkotutkimus:
  - valmistus perinteellisellä menetelmällä
  - valmistus autoklaavilla.
4. Materiaalien ja rakenteiden laadunvalvonta-ohjeen laatiminen tehtaille ja työmaille tärkeimpiin käyttökohteisiin.
5. Rakennesuunnitteluohjeen laatiminen.
6. Ympäristövaikutusten arvio, mukaan lukien kierrätys ja sivutuotteet.
7. Projektin koordinointi ja johtaminen.

### Aikataulu

Tutkimus voidaan aloittaa välittömästi ja se kestää 1,5–2 vuotta.

### Riskit

Suomessakin on jo kokemuksia erikoislujista betoneista ja erikoissovelluksista sekä muutamista koeobjekteista ulkomailla mm. Kanadassa ja Ranskassa jo RPC:stäkin.

VTT:ssä on tehty esitutkimus RPC:n käytöstä ja luotu valmiuksia ultralujien betonien tutkimukseen. Uusiin tuote- ja materiaaliratkaisuihin sisältyy kuitenkin käyttöönotto-sovelluksissa valmistusteknisiä ja toimivuusriskejä, jotka minimoidaan välttämättömällä määrällä laboratorio- ja kenttäkokeita sekä teoreettisia tarkasteluja ja niiden perusteella laadittavilla tuote- ja käyttökohteilla laadunvarmistusohjeilla ennen laajennettua käyttöä. Koerakenteissa riskit hallitaan tilapäisohjeilla ja tehostetulla seurannalla.

## 8. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin RPC-betoneja ja niiden mahdollisia käyttösovelluksia. Ulkomailla, kuten Ranskassa ja Kanadassa, on RPC-betoneja käytetty jo varsin mittavissa koerakenteissa kuten silloissa ja ydinvoimaloiden palkeissa. Suomessa niiden tutkimus on vasta alkuvaiheissaan.

RPC:n mahdolliset sovellusalueet perustuvat sen erikoisominaisuuksiin kuten hyviin lujuusominaisuuksiin (puristuslujuus 200–800 MPa), hyvään korroosionkestävyyteen ja säilyvyyteen erinomaisen tiivyyden ansiosta ja rakenteiden keveyteen. Toisaalta RPC:n tavanomaista kalliimmat materiaalit ja erikoinen valmistustekniikka korkeissa lujuusluokissa sekä vielä ratkaisemattomat palonkestävyysongelmat rajoittavat sen käyttöä.

Valmistustekniikka rajoittaa RPC:n käyttöä niin, että ainakin alkuvaiheessa on järkevää pyrkiä vain puristuslujuusluokkiin 200–300 MPa ja käyttää joko perinteistä betonirakenteiden valmistustekniikkaa tai autoklaavivalmistusta. Tällöin on kysymys esivalmistustekniikan käytöstä.

Korkeita materiaalikustannuksia korvaavat mm. rakenteen keventynyt paino, pienemmät dimensiot, ainakin osa perinteellisestä raudoituksesta (esim. leikkausraudoitus) voidaan usein jättää pois, ja hyvät säilyvyysominaisuudet, jotka vähentävät kunnossapitokustannuksia. Näin RPC-rakenteista voi tulla myös taloudellisesti edullisia. Taloudellisuus on arvioitava sovelluskohtaisesti.

RPC:n mahdollisia sovellusalueita on sekä rakentamisen että muun teollisuuden alueilla. Jos RPC:n palonkestävyysominaisuuksia ei saada hyviksi, sen käyttö rajoittuu vain niihin rakenteisiin, joissa ei palonkestävyys ole rajoittava tekijä, kuten siltoihin. Rakentamisessa RPC:n muita mahdollisia sovellusalueita ovat mm. putket, palkit, julkisivupaneelit, altaat ja kanavarakenteet, puolustusvoimien suojarakenteet, pilarit, paalut, turvaovet, kaivonkannet, suojakaiteet maanteiden varsille, kaivantojen tuet, suojaseinät sekä tunnelien ja kaivoskuilujen sisäverhoukset. Muussa teollisuudessa RPC:n potentiaalisia sovellusalueita ovat mm. kassakaapit, paperikoneen telat, kaatopaikkajyrät, erilaiset säiliöt, pesukoneet ja dieselmoottorien rungot.

Jatkotutkimuksissa on tarpeen ensin selvittää RPC:n palonkestävyyden parantamismahdollisuudet, koska palonkesto vaikuttavaa oleellisesti RPC:n soveltamismahdollisuuksiin. RPC:n jatkotutkimuksia varten on tässä hankkeessa laadittu jatkotutkimussuunnitelma.

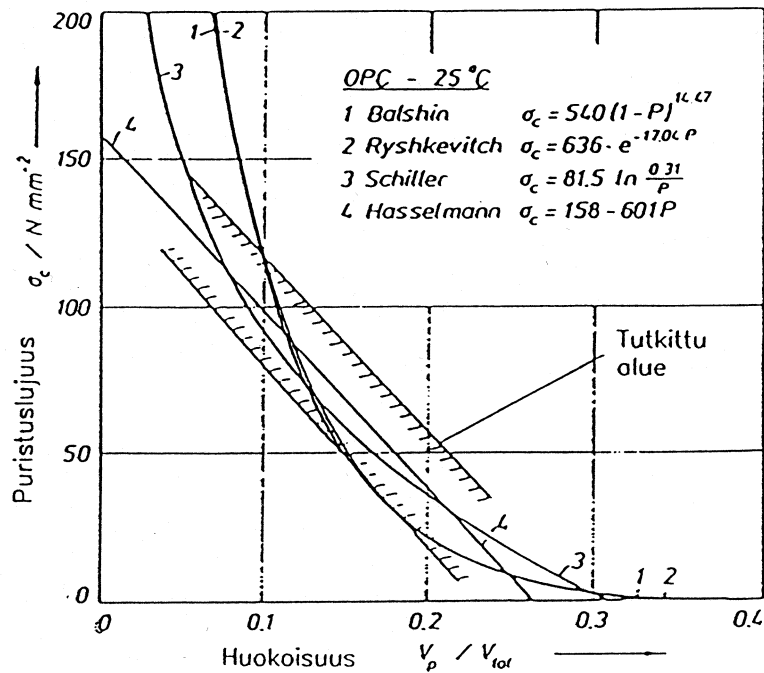
## Lähdeluettelo

1. Blais, P. & Couture, P. Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure. PCI-Journal S/1999, s. 60–71.
2. Cheyrezy, M. Structural applications of RPC. Concrete J/1999, s. 20–23.
3. Dowd, W. & Dauriac, C. Reactive powder concrete. The construction specifier D/1996, s. 47–50.
4. Utilation of high strength/high performance concrete. Proceedings, volume 3. Symposium 1996, Paris, France. S. 1343–1413.
5. International symposium on high-performance and reactive powder concretes. Volume 3. Sherbrooke, Canada 1998. 236 s.
6. Kronlöf, A. Runkoaineen ja sementtikiven yhteistoiminta betonissa. Teknillinen korkeakoulu 1991. Lisensiaattityö. 100 s.
7. Richard, P. & Cheyrezy, M. Composition of reactive powder concretes. Cement and concrete research, 7/1995, s. 1501–1511.
8. Bonneau, O. & Lachemi, M. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. ACI Materials Journal, J/1997, s. 286–290.
9. Kaso Oy:n kassakaappien tuote-esitteet. 1999.
10. Bonneau, O. et al. Reactive powder concretes: From theory to practice. Concrete International, April 1996, 3 s.
11. Gilliland, S. Reactive powder concrete (RPC), a new material for prestressed concrete bridge girders. Building an international community of structural engineers structures congress. New York 1996. (Kongressijulkaisu.) 7 s.

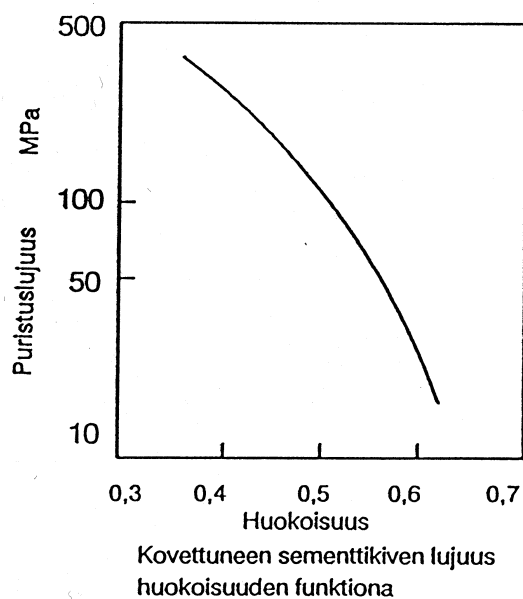
# Liite 1. Erikoislujia betoneita

Erikoislujia betoneita on kehitetty jo 80-luvulla, mutta kirjallisuudesta on tietoa suhteellisen niukasti.

Korkean lujuuden saavuttaminen edellyttää sementtikiven alhaista huokoisuutta. Huokoisuus koostuu sekä varsinaisista ilmahuokosista että vesitäytteisistä kiinteän materiaalin välitiloista. Huokoisuutta alennetaan sekä poistamalla mekaanisesti ilmahuokosia että pienentämällä massan vedentarvetta partikkelikokojakaumaa optimoimalla ja notkistimia käyttämällä. Partikkeleiden välisiä etäisyyksiä pienennetään myös erilaisten mekaanisten tiivistysmenetelmien avulla. Huokoisuuden ja lujuuden välistä yhteyttä kuvaamaan on esitetty monia malleja, joista esimerkkejä on esitetty kuvissa 1 ja 2. Tii-  
viin sementtikiven lisäksi erikoislujissa betoneissa käytetään lujia runkoaineita.



Kuva 1. Sementtikiven lujuus huokoisuuden funktiona (Rössler et al. 1985).



Kuva 2. Sementtikiven lujuus huokoisuuden funktiona (Bache). Koe suoritettu pienillä, 1 cm<sup>3</sup> kokoisilla sylintereillä. Tiivistyksessä käytettiin sekä voimakasta painetta että täryä ja saavutettiin 350 MPa lujuus. Mainittu huokoisuus on huokoisuus ennen hydrataatiota.

Kjell E. (1985) Löland on esittänyt taulukon erikoislujuista betoneista ja niiden tärkeimmistä ominaisuuksista.

Taulukko 1. Erikoislujuja betoneita (Löland, 1985).

Tyyppi	Sideaine	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Puristus- lujuus MPa	Vetolujuus GPa	Kimmo- moduuli MPa
*)					
Densit	Sem+sil	2 500 2 900	130 270	30	100
Ceramite	Sem+sil	2 500 2 800	150 280	30	100
**)					
Nims	Sem-polym	2 500	200	60	40
Dash 47	Sem+sil	3 500	350	25	80

\*) Dsp:n toinen nimi

\*\*) Perustuu Mdf:ään



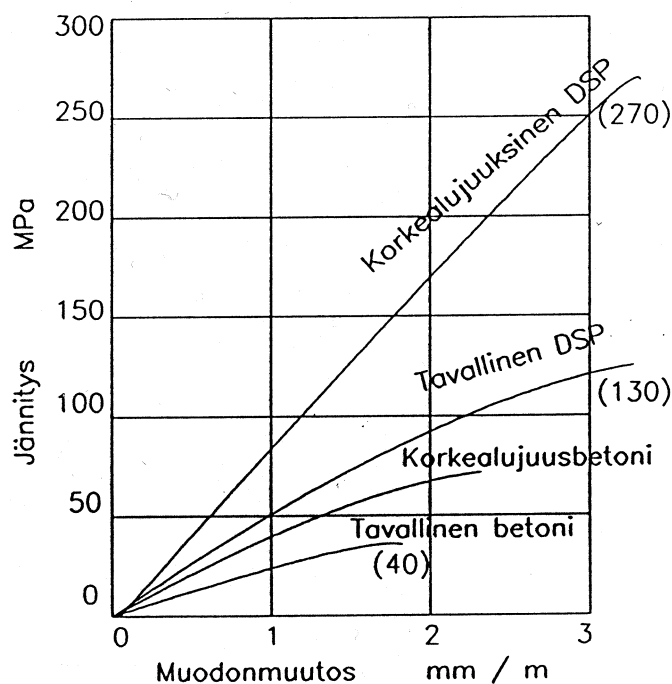
## Dsp

Tanskassa Aalborg portlandin sementti- ja betonilaboratoriossa kehitetyissä Dsp-betoneissa (Dsp Densified System containing homogenously arranged ultrafine Particles) saavutetaan 250 MPa:n lujuus (esitetty taulukossa Densit-nimisenä). Materiaalin sideaine koostuu portlandsementistä ja silikasta. Runkoaineena käytetään kalsinoitua bauksiittia, jonka lujuus on korkea, mutta korkea hinta ja tiheys (3 000–5 000 mk/tn, 3,5 kg/dm<sup>3</sup>) rajoittavat käyttöä (Bache 1981). Vaihtamalla runkoaine kvartsiksi lujuus puutoaa 150 MPa:iin. Korkean lujuuden saavuttaminen edellyttää sideaineelta erittäin alhaista vedentarvetta. Dsp-pastan (sementti + silika) vedentarve on vain 0,13–0,15, jolla välillä parta muuttuu jäykästä juoksevaksi. Betonissa vesi-sideainesuhde on vain 0,16–0,18. Yleensä portlandsementtiä ja silikaa käytettäessä vedentarve on korkeampi. Aalborgilla kokeissa käytetyn sementin poikkeuksellisen alhainen vedentarve ilmeni tutkijoille vasta myöhemmin muita sementtityyppejä kokeiltaessa.

Taulukossa 2 on eräitä esimerkkejä Dsp-betonien ominaisuuksista ja kuvassa 3 jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen.

*Taulukko 2. Dsp-betonien ominaisuuksia.*

Betoni/laasti tyyppi Runkoaineen max.koko	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Puristus- lujuus MPa	Vetolujuus GPa	Kimmo- moduuli MPa
Graniitti 16 mm	2 500	124,6	5 200	68 000
Diabaasi 16 mm	2 666	168,1	4 890	65 000
Kalsinoitu baukiitti 10 mm	2 878	217,5	6 150	109 000
Kalsinoitu bauksiitti 4 mm	2 857	268,3	6 153	108 000



Kuva 3. Tavallisen betonin ja Dsp-materiaalin jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen. Kaksi ylintä käyrää esittävät 4 mm bauksiitti-Dsp-laastia ja tavallista runkoainetta käyttämällä tehtyä Dsp-laastia.

### Dash 47

Dash-47-betonissa saavutetaan jopa 345 MPa puristuslujuus (Wise et al. 1984). Materiaalin kiinteistä komponenteista 58 p-% on terästä. Sideaine koostuu portlandsementistä, hienosta kvartsista ja silikasta (61,6 p-%, 30 p-% ja 8,4 p-%), joten materiaalin hinta muodostuu sekä runkoaineen että sideaineen osalta suhteellisen korkeaksi. Tiheys on myös korkea.

Metallikappaleiden epäsäännöllinen muoto parantaa tartuntaa, mikä puolestaan lisää sitkeyttä ja kasvattaa lujuutta puristuksessa.

Tekijät epäilevät, että korkeassa kuivauslämpötilassa saattaa tapahtua hydrotermistä autoklaavireaktiota muistuttava reaktio, jossa kalsiumhydroksidi reagoi piidioksidin kanssa.

### Mdf

Englannissa ICI on kehittänyt Mdf-betonin (Macro defect free), jonka taivutusvetolujuus voi olla 150 MPa. Mdf-betoni ei sisällä lainkaan runkoainetta. Materiaali koostuu

sementistä, vedestä ja polymeeristä. Veden määrä on 0,12–0,20 ja polymeerin 0,03–0,15 (Birchall et al. 1982) sementin painosta.

Materiaali sekoitetaan valssissa, josta tuleva levy taitetaan ja kierrätetään uudestaan valssiin. Tuotteen kovettamista paineen alaisena suositellaan. Tuote on levy, jolla on kerroksellinen rakenne.

Lähde:

Kronlöf, A. Runkoaineen ja sementtiaineen yhteistoiminta betonissa. Licensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu 1991. 100 s.

## Liite 2. RPC-betonin palonkestävyys

Ulla-Maija Jumppanen  
VTT Rakennustekniikka, Palotekniikka

### Yleistä

Tässä esitetään erikoislujien RPC-betoneiden palonkestävyyteen liittyviä BE-1158/BRPR-CT95-0065/HITECO-projektissa tehtyjä tutkimuksia ja niiden tuloksia. Tutkimus tehtiin vuosina 1996-1999.

Projektissa tutkittiin korkealujuuksisten (HPC) ja erikoislujien (UHPC) betoneiden palonkestävyyttä. Tutkittiin näiden eri betoneiden termisten, mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuutta ja erityisesti lohkeilutaipumusta ja pyrittiin selvittämään lohkeilun riippuvuutta eri tekijöistä. Lisäksi tehtiin palokokeita erityyppisille rakenteille kuormitettuina ja ilman kuormaa.

UHPC-betoneita oli kahta tyyppiä: CRC, jonka valmistaja on Aalborg (Tanska), ja RPC, jonka valmistaja on Bouygues (Ranska).

Tutkimukset tehtiin seuraavissa tutkimuslaitoksissa:

- termiset ominaisuudet: CSTB (Ranska)
- mikrorakennetutkimukset, permeabiliteetti: CSIC (Espanja)
- mekaaniset ominaisuudet: Imperial College (Englanti), IBMB (Saksa), ja Milan Polytechnic (Italia)
- palokokeet erikokoisilla koekappaleilla: VTT.

### RPC-betonia koskevat tutkimukset HITECO-projektissa

#### 1. Betonin valinta

Tutkimuksen alussa tehtiin VTT:ssä alustavia palokokeita, joissa pyrittiin löytämään mahdollisimman hyvin palonkestävä RPC-resepti. Alustavissa palokokeissa tutkittiin 11 eri RPC-betonia, joiden lujuudet olivat 178–345 MPa (11 x 220 lieriö).

Betoneissa oli käytetty teräskuituja paitsi betonissa RPCe ja betonissa RPCk oli lisäksi polypropyleenikuituja. Koekappaleiden lämpökäsittely oli erilainen ja vaihteli välillä "ilman lämpökäsittelyä" (RPCf)-----"10 päivää 250 °C ja 2 päivää 400 °C" (RPCCh ja RPCi). Koekappaleet säilytettiin kuukauden ikäisestä testaukseen saakka ilmastointihuoneessa 23±2 °C , 50±5 % RH ja säilytyksen aikana seurattiin painonmuutosta (kuivuamista). Todettiin, että painonmuutos oli hyvin hidasta.

Ennen polttokokeita määritettiin puristuslujuus (100 mm kuutio) ja kosteuspitoisuus (105 °C). Kuivumista 105 °C:ssa seurattiin viiden kuukauden ajan, eikä silloinkaan oltu saavutettu tasapainotilaa, ts. kuivuminen oli hyvin hidasta. Koekappaleiden ikä oli testattaessa 10–22 viikkoa ja kosteuspitoisuus 0,6–3,7 paino-%.

Kokeissa kustakin betonista prisma (100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup>) koestettiin ilman kuormaa 30 min standardipalossa (ISO 834). Betonit RPCh-RPCK koestettiin myös 2 h standardipalossa. Kokeen aikana havainnoitiin lohkeilua ja kokeen jälkeen määritettiin jäännöslujuus.

Kaikki muut paitsi RPCh, RPCi ja RPCk lohkeilivat voimakkaasti. Lohkeilu alkoi 3–6 min kuluttua kokeen alkamisesta ja jatkui kokeen loppuun saakka. Koekappaleista oli kokeen päättyessä jäljellä vain kasa betonimurusia paitsi RPCj:stä, josta jäi jäljelle suurempi kappale. Jäännöslujuus voitiin määrittää ainoastaan betoneista RPCh, RPCi ja RPCK, jotka eivät lohkeilleet. Tarkoitus oli mitata myös kosteushäviö kokeessa, mutta lohkeilun vuoksi sitä ei voitu mitata kuin betoneista RPCh, RPCi ja RPCK.

Seuraavassa taulukossa on esitetty palokokeiden tulokset (kosteushäviö kokeen aikana, jäännöslujuus ja lohkeilu) sekä referenssikokeiden tulokset (kosteuspitoisuus, tiheys, lujuus (100 mm kuutio)).

RPC betonien alustavat kokeet.

Koekappale Valu	Koe /Ikä (vko)	Kosteus häviö (%)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Lujuus (N/mm <sup>2</sup> , %)	Lohkeilu
BOUYGUES					
<b>RPC/a</b> 1750	1 (ISO),0,5 h, 11.07.96/16	-	-	-/- res.	+++
23.03.96 1751	23.07.96 Kosteus/Lujuus	1,2	2503	207,6	
1752					
<b>RPC/b</b> 1753	1 (ISO), 0,5 h: 11.07.96/16	-	-	-/- res.	+++
23.03.96 1754	23.07.96 Kosteus/Lujuus	1,3	2468	237,2	
<b>RPC/c</b> 1961	2 (ISO), 0,5, 23.07.96/12	-	-	-/- res.	+++
30.04.96 1962	23.07.96 Kosteus/Lujuus	1,3	2456	214,6	
<b>RPC/d</b> 1964	2 ISO), 0,5 h, 23.07.96/12	-	-	-/- res.	+++
30.04.96 1965	23.07.96 Kosteus/Lujuus	0,6	2420	264,4	
1966					
<b>RPC/e</b> 3248	9 (ISO), 0,5 h, 09.10.96/11	-	-	-/- res.	+++
22.07.96 3249	10.10.96 Kosteus/Lujuus	0,9	2374	149,8 (p)	
<b>RPC/f</b> 3257	9 (ISO),0,5 h, 09.10.96/11		-	-/- res.	+++
22.07.96 3258	10.10.96 Kosteus/Lujuus	3,1	2494	157,4 (p)	
<b>RPC/g</b> 3260	9 (ISO), 0,5 h, 09.10.96/11		-	-/- res.	+++
3262	10.10.96 Kosteus/Lujuus	3,1	2486	208,0 (p)	
<b>RPC<sup>h</sup>/400<sup>s</sup>'</b> 3933	16 (ISO), 0,5 h, 9.02.97/22	-	2370	109,5 (p) / 60 % res.	No
17.09.96 3934	17(ISO) 2,0 h 20.02.97/22	4,5	2262	14,9 (p)/8,2 % res.	No
3935	19.02.97 Kosteus/Lujuus	0,4	2368	182,4 (p)	
<b>RPC<sup>i</sup>/400<sup>m</sup>'</b> 4068	16 (ISO), 0,5 h 19.02.97/20	1,5 (?)	3517	274,9 (p)/103% res.	No
01.10.96 4069	17/(ISO) 2,0 h 20.02.97/20	0,9	3539	52,0 (p)/19,5 % res.	No
4070	19.02.97 Kosteus/Lujuus	0,4	3570	266,7 (p)	
<b>RPC<sup>j</sup>/ Wollastonite</b> 4214	16 (ISO) 0,5 h 19.02.97/18		-	- / 0 % res.	+++
14.10.96 4215					
4216	19.02.97/ Kosteus/Lujuus	3,1	2480	203,9 (p)	
<b>RPC<sup>k</sup>/A2.0% 0.22</b> 5203	16 (ISO) 0,5 h 19.02.97/10	1,4	2336	77,0 (p)/54,8 % res.	No
09.12.96 5204	17/(ISO) 2,0 h 20.02.97/10	6,3	2220	17,5 (p)/12,4 % res.	No
5205	19.02.97/ Kosteus/Lujuus	3,7	2369	140,6 (p)	

Jatkotutkimuksiin valittiin betoni kaksi betonia RPC/200 ja RPC/AF,

	<b>RPC/200</b>	<b>RPC/AF</b>
<b>Sideaine</b>	1	1
<b>Hiekka 0-0.25 mm</b>	0,88	0,88
<b>Teräskuidut</b>	0,17	0,17
<b>Polypropyleenikuidut</b>		0,012
<b>Vesi</b>	0,12	0,14
<b>Lämpökäsittely</b>	90 °C	90 °C
<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2491	2509
<b>f<sub>c,28d</sub> (MPa)</b>	180	173
<b>E (GPa)</b>		61

## 2. Palonkestävyyskokeet lyhyillä pilareilla

Seuraavassa vaiheessa tehtiin palonkestävyyskokeita lyhyillä pilareilla standardin ISO 834 mukaan. Koekappaleet olivat raudoittamattomia pilareita (200 x 200 x 900 mm<sup>3</sup>) ja betonilla (RPC/AF) täytetty putkipilari (Ø 273 mm, pituus 900 mm). Koekappaleisiin oli asennettu termoelementtejä lämpötilan mittausta varten. Lisäksi oli tehty kustakin betonista samanlainen pilari ilman termoelementtejä puristuskapasiteetin määrittämistä varten normaalilämpötilassa ja vertailukoekappaleita (200 x 200 x 500 mm<sup>3</sup>) kosteuden ja lujuuden määrittämistä varten.

Koekappaleita säilytettiin VTT:ssä koestukseen asti ilmastointihuoneessa 23±2 °C , 50±5 % RH ja säilytyksen aikana seurattiin painonmuutosta (kuivumista).

Ennen polttokokeita määritettiin pilarin puristuskapasiteetti normaalilämpötilassa (N<sub>20°C</sub>) ja sen jälkeen pilarin kosteuspitoisuus määritettiin pilarin keskeltä otetusta näytteestä (kuivattamalla 105 °C:ssa). Kosteusnäytteitä kuivatettiin 5 kk, eikä paino ollut vielä kukaan vakioitunut. Painonmuutos (kuivuminen) oli hyvin hidasta, mikä osoittaa alhaista permeabilitettä ja samalla suurempaa lohkeiluriskiä.

Referenssikokeet RPC/AF, RPC/200S

Valupäivä	Koekappale	Koe/Ikä (vko)	$N_{u200C}$ (kN/mm)	$f_c/s^*$ (MPa)	Kosteus (% w/w)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
<b>RPC/AF</b>						
12.06.97	200x200x900	15.09 97/14 $N_{u200C}$	>4900		3,4	
13.06.97	Ref.200 $\phi 100 \times 100$	11.09.97/13 Lu- juus Kosteus, Tiheys		180/9,9	2,5-3.0	2513
13.06.97	ref.200 $\phi 100 \times 100$	26.11.97/23 Kosteus			2,6-2,9	
<b>RPC/AF liittopilari</b>						
21.07.98	5577 $\phi 273$	28.08.98 $N_{u200C}/5.5$	>5805			
<b>RPC-200S</b>						
30.06.98	5554 200x200	28.08.98 $N_{u200C}/8$	4830		1,8-2,6	

Palokokeet pilareille tehtiin VTT Rakennustekniikan palolaboratorion malliuunissa (1,5 x 1,5 x 1,5 m<sup>3</sup>) siten, että uunin aikälämpötilariippuvuus oli standardin ISO 834 mukainen. Ennen koetta mitattiin pilarin kosteus (% RH) pilarin keskellä noin 100 mm pohjasta Vaisalan mittarilla. Kokeen aikana mitattiin lämpötiloja koekappaleen sisällä ja pinnalla. Pilarin pituuden muutos mitattiin pilarin kahdella vastakkaisella puolella.

Kullekin pilarityypille tehtiin ensin 100 min pituinen koe kuormittamattomana. Sen jälkeen tehtiin kokeet kuormitetuille RPC/AF-pilarille ja RPC/AF-täytteiselle putkipilarille. Kuorma oli 2000 kN (kuormituslaitteen kapasiteetti) ja epäkeskeisyys oli 7 mm.

Kuormittamattomassa RPC/AF -pilarissa alkoi lohkeilu 7 minuutin kuluttua ja se jatkui kokeen loppuun saakka. Pilarista lohkesi jatkuvasti ohuita kerroksia betonia. Kuormitetussa pilarissa lohkeilu alkoi 6 min kuluttua ja eteni kerroksittain, kunnes 49 min kuluttua kokeen alkamisesta räjähdysmäinen lohkeilu aiheutti pilarin sortumisen. Molemmissa kokeissa pilari alkoi liekehtiä noin 30 min kuluttua kokeen alkamisesta polypropyleenikuitujen palaessa, mikä aiheutti pilarin lämpötilojen nopeamman nousun. RPC/AF täytteisessä putkipilarissa ei tapahtunut lohkeilua, ja kuormitetun pilarin palonkestävyys oli 159 min.

RPC/200S-pilari testattiin ainoastaan kuormittamattomana, koska jo siinä kokeessa 6 minuuttia kokeen alkamisen jälkeen alkanut erittäin voimakas etenevä lohkeilu aiheutti pilarin rikkoutumisen jo 28 minuutin kuluttua. Pilarista oli jäljellä ainoastaan pieni osa ja loppu oli kasa pieniä jyväsia.

RPC/AF-täytteisessä putkipilarissa ei tapahtunut lohkeilua ja kuormitetussa kokeessa (2000 kN,  $e = 7$  mm) pilarin palonkesto-aika oli 153 min. Kuorma oli kuormituslaitteen maksimikuorma ja siitä syystä pilarin kuormitustaso oli alhainen (<0.34).



Seuraavassa taulukossa on esitetty tiedot palokokeista. Taulukossa on esitetty koeaika, joka kuormitettuna koestetuilla pilareilla on niiden palonkestoaika. Lisäksi taulukossa on esitetty lohkeilun voimakkuus käyttäen symbolia "+". Symbolien lukumäärä ilmoittaa lohkeilun voimakkuuden. Yksi "+" ilmaisee vähäistä esim. vain nurkissa tai pinnassa tapahtuvaa lohkeilua. Neljä symbolia "++++" tarkoittaa ja räjähdysmäistä lohkeilua tai hyvin voimakkaasti etenevää jatkuvaa lohkeilua

*Palokokeet (ISO) RPC/AF- ja RPC/200S-pilareille ja RPC/AF-täytteiselle putkipilarille.*

Valupäivä	Koekappale	Koe/Ikä (viikkoja)	Kuorma/e (kN/mm)	Kosteus (% RH)	Koeaika (min)	Lohkeilu/Alku (min)
<b>RPC/AF</b>						
12.06.97	200x200	<b>21 (ISO)</b> 15.09.97/13,5	-	99	<b>100</b>	+++ /7
12.06.97	200x200	<b>28 (ISO)</b> 05.12.97/25	2000/7	92	<b>49</b>	++++ /6
<b>RPC/AF liittopilari</b>						
21.07.98	Ø273	<b>30 (ISO)</b> 08.09.1998/7	-		<b>100</b>	No
21.07.98	Ø273	<b>31 (ISO)</b> 15.09.1998/8	2000/-		<b>153</b>	No
<b>RPC-200S</b>						
30.06.98	200x200	<b>29 (ISO)</b> 03.09.98/9	-	95	<b>28</b>	++++ /6

+ Lohkeilun voimakkuus

### Jäännöslujuus

Kuormittamattomina 100 min ajan koestetusta RPC/AF-pilarista määritettiin neljän päivän kuluttua jäännöskapasiteetti. Se oli 1157 kN, mikä on 23% normaalilämpötila kapasiteetista ( $N_{u20^{\circ}C}$ ).

### **3. RPC-200 säiliö**

Projektissa tehtiin palokoe RPC säiliölle. Koekappale oli 1 500 mm korkea säiliö, jonka ulkohalkaisija oli 1000 mm ja seinämän paksuus 120–135 mm. Säiliön sisäpintaan oli asennettu venymäliuskoja ja betoniin termoelementtejä. Säiliö oli täytetty hiekalla.

Säiliö testattiin 10 min standardin ISO 834 mukaisissa palo-olosuhteissa VTT Rakenustekniikan palolaboratorion horisontaaliuunissa. Säiliö oli ripustettu uuniin teräskehikossa 300 mm kannen alapuolelle siten, että se oli altistettu palolle joka puolelta. Heti polttimoiden sammuttua koekappale nostettiin pois uunista.

Kokeen aikana mitattiin venymiä säiliön sisäpinnalla sekä lämpötiloja.

Palokokeessa betoni alkoi lohkeilla 3,5 min kuluttua kokeen aloittamisesta. Lohkeilu alkoi alanurkista ja jatkui kiihtyen koko kokeen ajan (10 min). Betoni lohkeili 1-3 mm paksuisina kerroksina. Kun polttimot sammutettiin, lohkeilu lakkasi.

Kokeen jälkeen havaittiin, että koko pinnalta betonia oli lohjennut 1-3 mm paksuisina liuskoina noin 5-10 mm paksuudelta. Betoniin ei ollut syntynyt näkyviä halkeamia.

#### 4. Yhteenveto lohkeilukäyttäytymisestä

Kaikissa standardin ISO 834 mukaisissa palokokeissa RPC-betonit lohkeilivat, poikkeuksena betonitäyteinen putkipilari, jossa teräskuori ilmeisesti hidasti kuumenemistä siten, ettei lohkeilua esiintynyt. RPC-betonin, kuten myös projektissa tutkitun toisentyypin UHPC-betonin, lohkeilu poikkesi tyypillisestä normaalilujuuksisessa tai korkealujuuksisessa betonissa esiintyvistä lohkeilusta siinä, että lohkeilu oli jatkuvaa etenevää lohkeilua, joka alkoi nopeasti (3–7 min kuluttua kokeen alkamisesta) ja jatkui koko kokeen ajan. Betoni lohkesi pieninä palasina tai ohuina kerroksina.

#### 5. Materiaalitutkimukset

Projektissa tutkittiin RPC/AF:stä seuraavia ominaisuuksia:

Normaali lämpötila:

- Puristuslujuus	
- Kimmokerroin	
- Poisson'n vakio	
- Halkaisuvetolujuus (MPa)	27,4
- Kokonaishuokoisuus (vesi) %	2,85
- Suhteellinen tiheys	2,47
- Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK), kyllästetty	978 (RPC/AF) 879 (RPC-200)
- Lämmönjohtavuus (W/mK), kyllästetty ja kuiva	2,35

Korkea lämpötila:

- Lämpölaajeneminen
- Transienttivenymä
- Jännitysvenymä
- Suora veto, jännitysvenymä

Mikrorakenne:

- TG, DTG
- Elohopeaporosimetria
- Typpiadsorptio/desorptio
- Permeabiliteetti (happi, typpi)
- XRD
- Mikroskopia: SEM

Kosteusjakautuma:

- Kosteusjakautuma -  $\gamma$ -Ray Spect.

### **Mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa**

Betonin mekaanista käyttäytymistä tutkittiin sekä vakio- että muuttuvissa lämpötiloissa. Kokeissa kuumennusnopeus oli 2 °C/min.

#### Puristus

Puristetun betonin jännitysvenymäkäyrät vakiolämpötilassa määritettiin sekä korkeissa lämpötiloissa (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 °C) että jäähtymisen jälkeen (jäännösarvot). 2 °C/min. Kuormitus kuumennuksen aikana oli 0 % tai 20 % kylmälujuudesta.

Lujuus ja kimmokerroin laskivat korkeissa lämpötiloissa vähemmän RPC/AF:-betonissa kuin korkealujuus-betonissa. Puristuslujuus 500 °C:ssa kuormittamattomalla betonilla oli 75 % (700 °C:ssa 55 %) ja kuormitetulla (20%) betonilla 48 %. Kimmokerroin laski suhteellisesti nopeammin kuin puristuslujuus. Kimmokerroin oli kuormittamattomalla betonilla 500 °C:ssa 45 % (700 °C:ssa 25 %) ja kuormitetulla (20 %) betonilla 500 °C:ssa 52 %.

#### Jäännöslujuudet

#### Veto

Jännitys-venymäkäyrät vedossa määritettiin lämpötiloissa 20, 105, 300 ja 500 °C sekä vastaavat jäännösarvot. Kuumennuksen aikana betonia ei kuormitettu.

Vetolujuus oli 600 °C:ssa noin 40 % kylmävetolujuudesta. Jäännösvetolujuudet olivat hieman suuremmat kuin kuumavetolujuudet. Vetolujuuden pieneneminen korkeissa lämpötiloissa oli suhteellisesti pienempi kuin korkealujuusbetonilla (C90), huom. teräskuitujen vaikutus. Kimmokerroin laski nopeammin kuin vetolujuus (600 °C:ssa alle 20 % kylmäarvosta).



Tekijä(t) Ratvio, Juha			
Nimeke <b>Ultralujan betonin käyttösovellukset. Esitutkimus.</b>			
Tiivistelmä <p>Julkaisussa käsitellään ultralujien betonien, erityisesti RPC-betonien (Reactive Powder Concrete) ominaisuuksia, valmistustekniikkaa ja käyttösovelluksia. Tässä esitutkimuksessa tehtiin myös koekappaleita RPC-massasta.</p> <p>RPC:n menestymisen mahdollisuudet perustuvat sen erikoisominaisuuksiin kuten hyviin lujuusominaisuuksiin (puristuslujuus 200–800 MPa), hyvään korroosionkestävyyteen ja säilyvyyteen erinomaisen tiivyyden ansiosta sekä rakenteiden keveyteen. Toisaalta RPC:n käyttöä rajoittavat tavanomaista kalliimmat materiaalit ja erikoinen valmistustekniikka korkeissa lujuusluokissa sekä vielä ratkaisemattomat palonkestävyysongelmat.</p> <p>Valmistustekniikka rajoittaa RPC:n käyttöä niin, että ainakin aluksi on järkevää pyrkiä vain puristuslujuusluokkiin 200–300 MPa ja käyttää joko perinteistä betonirakenteiden esivalmistustekniikkaa tai sitten autoklaavivalmistusta.</p> <p>RPC:n mahdollisia sovellusalueita on sekä rakentamisen että muun teollisuuden aluilla. Jos palonkestävyysominaisuuksia ei saada hyviksi, rajoittuu RPC:n käyttö vain niihin rakenteisiin, joiden palonkestävyys ei ole rajoittava tekijä. Tällainen käyttökohde on esimerkiksi kävelysilta. Palonkestävyyttä on mahdollista parantaa muovikuitujen avulla, mutta asia vaatii vielä tutkimusta. RPC:n mahdollisia sovellusalueita rakentamisessa ovat siltojen lisäksi mm. putket, palkit, julkisivupaneelit, kanavarakenteet ja puolustusvoimien suojarakenteet. Muussa teollisuudessa RPC:n potentiaalisia sovellusalueita ovat mm. kassakaapit, kaatopaikkajyrät ja erilaiset säiliöt.</p>			
Avainsanat ultra strength concrete, high strength concrete, utilization, compression strength, corrosion resistance, durability, reactive powder concrete, RPC, mechanical properties, manufacturing			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5788-3 (nid.) 951-38-5789-1 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinumero R9SU00565	
Julkaisu-aika Helmikuu 2001	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 45 s. + liitt. 13 s.	Hinta B
Projektin nimi Ultralujan betonin käyttösovellukset		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), VTT	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. +358 9 4561  
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 2078  
VTT-TIED-2078

Author(s) Ratvio, Juha			
Title <b>Preliminary study of ultra strength concrete applications</b>			
Abstract <p>Properties, manufacturing and use applications of ultra high strength concrete, especially RPC-concretes (Reactive Powder Concrete), are studied in this publication. In this preliminary study were also made samples of RPC-material. Success possibilities of RPC are based on its special properties like good strength properties (compression strength 200–800 MPa), good corrosion resistance and durability due to excellent compactness and lightness of constructions. But more expensive materials than usually and special manufacturing technique on the top of strength classes and still unresolved fire endurance problems confine its use.</p> <p>Manufacturing technique of RPC confines its use so, that least in the beginning it is practical to try come to compression strength classes 200–300 MPa and to use traditional precast concrete technique or autoclave-manufacturing.</p> <p>Possibly application areas of RPC can be found in building construction and in other industry. If the fire resistance properties of RPC are not got good, its use will be confined only to those constructions, in which the fire resistance is not a limiting factor like in bridges. There are possibilities to improve the fire resistance with plastic fibres, but it must be studied at first. Possible applications areas for RPC in building construction in addition to bridges are among other things pipes, beams, facade panels, canals and military structures. In other industry potential applications of RPC are, among other things, safes, landfill compactors at dumping places and different containers.</p>			
Keywords ultra strength concrete, high strength concrete, utilization, compression strength, corrosion resistance, durability, reactive powder concrete, RPC, mechanical properties, manufacturing			
Activity unit VTT Building and Transport, Building Materials and Products, Wood Technology, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5788-3 (soft back ed.) 951-38-5789-1 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Project number	
Date February 2001	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 45 p. + app. 13 p.	Price B
Name of project Ultralujujan betonin käyttösovellutukset		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes), Technical Research Centre of Finland (VTT)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

## VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

### VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 1994 Leppänen, Pekka, Pulakka, Sakari, Saari, Mikko & Viitanen, Hannu. Life-cycle-cost optimised wooden multi-storey apartment building. Nordic Wood, Phase 2, Project P-2. Final report. 1999. 73 p.
- 1997 Jokinen, Petri, Lahtinen, Reima & Lehmus, Eila. Teräsrakenteiden suojaus kaariruiskutetulla sinkkipinnoitteella. 1999. 50 s. + liitt. 14 s.
- 2001 Haakana, Maarit & Soitinaho, Ulla. Kiinteistöhoitohenkilöstön motivointi energiansäästöön. Kokemukset koulukohteista. 1999. 43 s. + liitt. 14 s.
- 2002 Andstén, Tauno, Juutilainen, Hemmo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Test method for actuating and safety devices of portable fire extinguishers. Nordtest Project No. 1435–99. 1999. 40 p. + app. 25 p.
- 2003 Vainio, Terttu, Riihimäki, Markku & Mäkelä, Pekka. Rakennuskustannusindeksi 2000. 1999. 70 s. + liitt. 2 s.
- 2005 Baroudi, Djebar, Kokkala, Matti & Weckman, Henry. Savuilmamaisimien toiminta-aikojen laskentaohjelma PALDET 2.1S. 1999. 37 s. + liitt. 1 s.
- 2013 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriski-tarkastelussa. 2000. 213 s. + liitt. 55 s.
- 2025 Riihimäki, Markku & Lehtinen, Erkki. Talopakettit asuinrakentamisessa. Valmisosien yleisyys toimituksissa. 2000. 44 p.
- 2027 Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti. Vyöhykemalliohjelman CFAST-kelpoisuuden arviointi. 2000. 51 s. + liitt. 14 s.
- 2028 Kokkala, Matti. Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu. Toiminnallinen lähestymistapa. 2000. 63 s. + liitt. 15 s.
- 2029 Helenius, Antti. Shear strength of clinched connections in light gauge steel. 2000. 40 p. + app. 13 p.
- 2030 Rantamäki, Jouko, Kääriäinen, Hannu, Tulla, Kauko, Viitanen, Hannu, Kalliokoski, Pentti, Keski-kuru, Timo, Kokkoti Helmi & Pasanen, Anna-Liisa. Rakennusten ja rakennusmateriaalien homeet. 2000. 40 s. + liitt. 6 s.
- 2041 Viirola, Heli & Raivio, Paula. Portlandsementin hydrataatio. 2000. 61 s.
- 2047 Leivo, Markku. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus. 2000. 13 s. + liitt. 25 s.
- 2048 Kuosa, Hannele. Älykkäät betonit ja betonirakenteet. 2000. 35 s. + liitt. 9 s.
- 2049 Lehtinen, Jari. Rakennushankkeen turvallisuusjohtaminen. Korkea rakennuskohde. 2000. 77 s. + liitt. 16 s.
- 2051 Karhu, Vesa & Loikkanen, Kaisu. Japanese and Chinese construction and facilities management software markets. Preliminary study. 2000. 58 p. + app. 4 p.
- 2053 Luoma, Marianna & Pasanen, Pertti. Ilmanvaihtojärjestelmien puhdistus 15 toimistorakennuksessa. Puhdistuksen ja säädön vaikutus toimistotilojen kanavien puhtauteen, ilmanvaihtuvuuteen, tuloilman laatuun ja työntekijöiden työoloihin. 2000. 43 s. + liitt. 6 s.
- 2054 Riihimäki, Markku & Lehtinen, Erkki. Luonnonkiviteollisuuden markkinat. 2000. 57 s. + liitt. 19 s.
- 2056 Kuosa, Hannele & Vesikari Erkki. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus. 2000. 141 s.
- 2070 Nieminen, Jyri & Salonvaara, Mikael. Hygrothermal performance of light steel-framed walls. 2000. 26 p.
- 2072 Paiho, Satu, Leskinen, Mia & Mustakallio, Panu. Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen energiatietoisien käytön apuvälineenä. 2000. 63 s.
- 2075 Häkkänen, Helinä, Britschgi, Virpi & Kanner, Heikki. Nuorten aikomus hankkia ajokortti. 2000. 71 s. + liitt. 4 s.
- 2076 Leivo, Markku & Holt, Erika. Betonin kutistuma. 2001. 57 s.
- 2078 Ratvio, Juha. Ultralujan betonin käyttösovellukset. Esitutkimus. 2001. 45 s. + liitt. 13 s.