

HUOKOISISTA KIINTEISTÄ AINEISTA JA NIIDEN LUJUUDESTA  
ERITYISESTI EI-METALLISIA EPÄORGAANISIA AINEITA SIL-  
MÄLLÄPITÄEN

S.E. PIHLAJAARA

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 5  
No 3 1972 ss. 325-345; Raken-  
teiden Mekaniikan Seura, Hel-  
sinki

---

SUMMARY

On the porous solid materials and their strength with refer-  
ence to inorganic nonmetallic materials. In the article a general  
review of the porous materials, like e.g. concrete and ceramic ma-  
terials, and their strength is presented. The general principles  
described apply to many other porous materials. Especially, the  
definitions and general features of porous materials, for compar-  
ing the strengths of dense materials, the basic bonds of materials,  
the effects of gases and liquids in pores, have been examined. An  
overview of the promising future of porous materials is offered.

YHTEENVETO

Oheisessa katsausluonteisessa tutkielmassa on pyritty anta-  
maan yleiskäsitystä sellaisista huokoisista rakennusaineista ja nii-  
den lujuuksista kuin esim. betoni ja keraamiset aineet. Esitetyt  
yleisperiaatteet soveltuvat kuitenkin useimmiten lukuisiin muihinkin  
huokoisiin aineisiin. Erityisesti on tarkasteltu huokoisten aineiden

määritelmiä ja peruspiirteitä, vertailun vuoksi tiiviittien aineiden lujuuksia, aineiden perussidoksia, huokosissa olevien kaasujen ja nesteiden vaikutusta. Lopuksi on luotu katsausta huokoisten aineiden lupaavaan tulevaisuuteen. - Tutkimusta tulisi yhä enemmän suunnata aineiden mikrorakenteen, mikro-ominaisuuksien ja makro-ominaisuuksien välisten korrelaatioiden selvittämiseen.

## 1. JOHDANTO

Huokoiset aineet muodostavat erittäin vaativan ja mielenkiintoisen tutkimuskohteen. Näiden aineiden tutkimus on kuitenkin kansainvälisestikin tarkastellen niitä aloja, jotka ovat yleisesti ottaen jääneet liian vähäiselle tarkastelulle, jos ei oteta huomioon huokoisille aineille niin tyypillisen läpäisevyysilmiön runsasta ja erittäin monipuolistakin tutkimusta. Valitettavasti on tietämyksemme huokoisten aineiden läpäisevyydestäkin varsin puutteellinen etenkin monien erityyppisten läpäisevyysilmiöitä kuvaavien teorioiden käytännöllisen soveltamisen kannalta. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että erilaisia kaasuja ja nesteitä siirtyä huokosrakenteeltaan mitä erilaisimmissa aineissa monenlaisten "siirtävien voimien" vaikutuksesta, joten ennustuskelpoisia teorioita parametriarvoineen on usein vaikea, jopa mahdotonkin löytää.

Rakennusalan käyttämät monet huokoiset aineet (betonit, laastit, keraamiset aineet, eristysaineet) ovat tavallisesti jääneet syvälistä tutkimusta suorittavien materiaalitutkijoiden toimintakentän ulkopuolelle. Kivi- ja maalajien tutkimus on öljyn- ja vedenetsinnän sekä monien maanviljelysprobleemien vuoksi jo erittäin paljon runsaampaa. Suurelta osalta onkin varsinainen materiaalitiede ollut

metallitiedettä. Rakennusalan materiaalien asema materiaalitieteen kentässä on kuitenkin voimakkaassa nousussa. Tästä ovat osoituksena esim. kansainväliset konferenssit "The Southampton (England) 1969 Civil Engineering Materials Conference" ja The Kioto (Japan) 1971 Conference on Mechanical Behaviour of Materials" sekä kotimainen Tampereen Materiaalifysiikan Seminaari 1972, joissa rakennusalan huokoiset materiaalit ym. ovat metallisten aineiden ja muovien rinnalla mukana. Metallitutkimuksen ylivoima on kuitenkin vielä kiistaton sekä laajuudessa että perusteellisuuksessa.

Huolimatta metallien valtavasta merkityksestä koneiden, laitteiden ja välineiden rakentamisessa, on selvää että rakennusalalla, jonka kansantaloudellinen merkitys on suurimpien joukkoon kuuluva, huokoisilla ei-metallisilla epäorgaanisilla aineilla, erityisesti betonilla, on erittäin keskeinen asema. Lujuudella ja siihen liittyvillä seikoilla on - muodonmuutosten ohella - rakennusteknillisesti ensisijainen merkitys.

Yleiskäsityksen saamiseksi huokoisista aineista olen käsitellyt huokoisen aineen määritelmiä ja peruspiirteitä erillisessä kapaleessa.

Huokoisten aineiden kollektiivinen tarkastelu ja tutkimus on myös johtanut kansainvälisen työryhmän "Pore Structure and Properties of Materials" syntymiseen 1970 Kansainvälisen tutkimus- ja koetuslaitosten liiton (RILEM) piirissä. Hyvän käsityksen tämän kansainvälisen työryhmän toiminnasta antaa matkaraportti [1]. Työryhmän lähiajan tavoitteena on laatia yhteenveto 1) aineen huokosrakenteen määrittämisvoimista ja 2) aineen huokosrakenteen ja ominaisuuksien välisestä riippuvuudesta.

Mainitsen vielä, että olen suomenkielellä aikaisemmin kirjoit-

tanut kolme otsikon aihepiiriin enemmän tai vähemmän liittyvää katsausluentoista tutkielmaa "Katsaus aineen lujuteen haurasmurto-teorioiden pohjalta" 1969 [2], "Johdatusta reologiaan" 1970 [3], "Johdatusta yhdistettyihin aineisiin" 1971 [4]. Viimeksi mainitussa on mm. käsitelty muovikyllästykseen ja kuitujen lisäämisen vaikutusta betoniin.

## 2. HUOKOISEN AINEEN MÄÄRITELMIÄ JA PERUSPIIRTEITÄ

### 2.1 Huokoisen aineen määritelmä

Huokoisessa aineessa on tiiviinaineen ohella jatkuvasti toistuvia, tavallisesti kaasun, höyryn tai nesteen täyttämiä useimmiten erikokoisia tiloja, joita yleisesti kutsutaan huokosiksi. Suuria huokosia voidaan kutsua onteloiksi tai suurhuokosiksi. Huokoisessa aineessa on merkittävä määrä huokosia, joiden halkaisija on suurempi kuin noin 10 Å eli  $10^{-7}$  cm.

### 2.2 Huokoskoon määritelmät

Huokoskoko, jolla tavallisimmin tarkoitetaan pallon- tai lie-riönmuotoiseksi oletetun (muunnetun) huokosen halkaisijaa, usein myös sädettä, vaihtelee varsin vaikeasti kiinnitettävän ylärajan ja nollan välillä, tavallisesti kuitenkin senttimetreistä tai millimetreistä noin kymmeneen ångströmiin (1 ångström = 1 Å =  $10^{-8}$  cm).

Huokoisen aineen huokoskoko ilmaistaan usein yhtälöllä

$$\bar{r} = \frac{2V_p}{S_a} \quad (1)$$

missä  $\bar{r}$  on huokosen keskisäde,  $V_p$  aineen huokostilavuus,  $S_a$  aineen

huokosten kokonaisala (ominaispinta-ala). Tällöin on huokonen oletettu lieriöputkeksi. Jos huokonen oletettaisiin palloksi, olisi yhtälössä luku 2 korvattava luvulla 3.

Huokoskoon jakautuminen ilmoittaa ne huokososuudet kokonaishuokostilavuudesta, joiden säde tai halkaisija on tietyillä väleillä.

### 2.3 Huokoisten aineiden pääryhmittely

Huokoiset aineet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään

1. Kiinteät huokoiset aineet

2. Rakeiset huokoiset aineet

3. Kuitumaiset huokoiset aineet

- Kiinteät huokoiset aineet muodostavat laajan ryhmän, johon rakennustoiminnan kannalta ensisijaisesti kuuluvat betonit, laastit, puu, polttamalla savesta aikaansaadut tiilet (keraamiset aineet) sekä kivilajit.

- Rakeisia huokoisia aineita ovat ensisijaisesti erilaiset maalajit, esim. sora, hiekka, savi ja lisäksi kalliosta murskaamalla saadut rakeiset aineet, esim. sepelit. Tähän ryhmään voidaan katsoa kuuluvaksi myös savesta polttamalla ja rakeistamalla saatu kevytsora, jota käytetään esim. normaalista kevyemmän betonin valmistukseen, eristystarkoituksiin jne. (Huomattakoon, että rakeisten aineiden rakeet voivat olla kiinteitä huokoisia aineita.)

- Kuitumaisiin huokoisiin aineisiin voidaan katsoa kuuluvaksi kuitumaiset eristysaineet, esim. lasivilla ja vuorivilla sekä erityisesti tekstiilit (kankaat) ja paperit.

### 2.4 Huokoskokojen pääryhmittely

Huokoskoot tai osasten eli partikkelien välitilat voidaan ryh-

mittää seuraaviin kolmeen pääryhmään

1. Ontelot: koko suurempi kuin 1 mm eli  $10^{-1}$  cm
2. Kapillaarit: koko mikroskooppinen  $10^{-1} \dots 10^{-5}$  cm tai kolloidinen  $10^{-5} \dots 10^{-7}$  cm (1000...10 Å)
3. Voimatilat: molekyylien tai atomien välitilat, joissa hallitsevat lähivaikutusvoimat: koko pienempi kuin  $10^{-7}$  cm eli 10 Å.

## 2.5 Aineiden pääryhmittely huokoisuuden (tiiviuden) mukaan

Edellisen kohdan 2.4 huomioonottaen voidaan kaikki kiinteät aineet jakaa seuraaviin kolmeen ryhmään

1. Tiiviit aineet, jotka koostuvat vain atomeista tai molekyyleistä ja voimatiloista. Voimatiloihin voi tunkeutua vain alkeishiukkasia, esim. neutroneja.
2. Varsinaiset huokoiset aineet, jotka koostuvat tiiviistä aineista ja kapillaareista tai pääasiassa tiiviistä aineista ja kapillaareista.
3. Onteloaineet, joissa on merkittävässä määrässä - yleensä runsaasti - onteloita (suurhuokosia, ilmatiloja, lokeroita, reikiä).

## 2.6 Huokosten jatkuvuus ja epäjatkuvuus

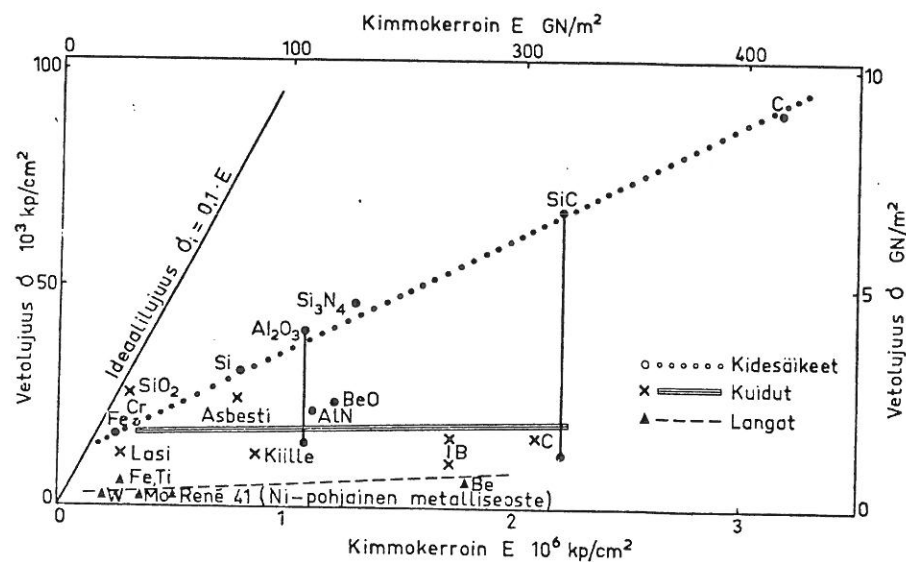
Huokokset voivat olla huokoisessa aineessa toisiinsa liittyneitä tai toisistaan väliseinämillä eristettyjä, toisin sanoen jatkuvia tai epäjatkuvia. Huokosrakenteen jatkuvuudella tai epäjatkuvuudella on suuri merkitys kaasun, höyryn tai nesteen siirtymisessä huokoisessa aineessa tai sen läpi. Toisesta päästään suljettuja huokosia voidaan kutsua pullohuokosiksi (inkbottle pores, dead end pores).

## 3. TIIVIIDEN AINEIDEN LUJUUS. IDEAALINEN TEOREETTINEN LUJUUS

Kun kahta atomitasoa vedetään irti halkaisemalla aine atomitasojen välistä voidaan osoittaa, että ideaaliseksi vetolujuudeksi saadaan likiarvona [2]

$$\sigma_i = 0,1 E \quad (2)$$

missä  $E$  on aineen kimmokerroin. Tämä ideaalilujuus on tavallisesti useita dekaadeja reaaliaineiden murtolujuutta suurempi. Huono yhteensopivuus johtuu tiiviissäkin reaaliaineessa olevista vioista tai halkeamista, jotka aiheuttavat paikallisia jännityshuippuja, jotka ovat ideaalilujuuden luokkaa. Virheettömimmässä muodossa ainekappaleet ovat käytännössä silloin, kun niiden mitat ovat pienet ja valmistuksessa on voitu käyttää tarkkaa tekniikkaa. Lujimpia ainekappaleita ovatkin siis kidesäikeet (englanniksi whiskers), kuidut ja langat, joiden lujuuksien nykytilanteesta antaa käsityksen oheinen kuva 1 [5].



B 2087

Kuva 1. Aineen ideaalilujuuden ja lujimpien ainekappaleiden eli kidesäikeiden, kuitujen ja lankojen lujuuden vertailua kimmokertoimen funktiona. Calow & Moore [5].

Kidesäikeiden, kuitujen ja ohuiden lankojen käyttöarvo on kuitenkin usein pienempi kuin lujuuksista voisi päätellä, koska niiden pinta vicittuu helposti fysikaalisista tai kemiallisista syistä. Kun lisäksi hinta on varsin korkea, näiden aineiden soveltaminen yhdistettyjen aineiden esim. huokoisten aineiden vahvistavana aineosana on usein vaikea ja monitahoinen optimointiprobleema.

Yhtälön (2) ja kuvan 1 tarkastelu osoittaa, että tiiviin aineen suurimmat lujuudet ovat suuruusluokaltaan 10000...100000 kp/cm<sup>2</sup>. Erään talonrakennustekniikassa tärkeän huokoisen aineen, sementtikiven (betonin oleellisimman aineosan), kimmokerroimen ollessa suuruusluokkaa 10<sup>5</sup> kp/cm<sup>2</sup>, saadaan tämän mukaan tiiviille sementtikivelle lujuusarvoksi yhtälön (2) mukaan vähintään 10000 kp/cm<sup>2</sup>, koska huokoisuuden vähentyessä myös E kasvaa esim. seuraavan yhtälön mukaan [6]

$$E_p = E_0 e^{-BP} \quad (3)$$

missä B on parametri ja E<sub>0</sub> kimmokerroin, kun huokososuus P = 0. Valmistettaessa sementtikiveä korkean paineen alaisena on saavutettu yli 3000 kp/cm<sup>2</sup>:n lujuuksia ja ekstrapoloimalla voitu todeta nollahuokoisuutta vastaavan puristuslujuuden olevan noin 4000 kp/cm<sup>2</sup> [7]. Niinkin mutkikkaassa moniminerallisessa aineessa kuin sementtikivi, jossa mikrovikojen todennäköisyys on suuri, näyttää siis olevan mahdollista saavuttaa suuruusluokalleen 0,5·10<sup>4</sup> kp/cm<sup>2</sup> puristuslujuuksia.

#### 4. SIDOKSET

Huokoisen aineen, niinkuin yleensäkin aineen, lujuus riippuu sen aineosasten välisistä sähköisistä sidoksista [2]. Sidokset voidaan jakaa kahteen pääryhmään

1. Vahvat primäärisidokset eli kemialliset sidokset
2. Edellisiä heikommat sekundäärisidokset eli fysikaaliset sidokset eli van der Waals'n sidokset

Huokoisessa aineessa on yleensä kaikenlaisia sidoksia, mutta voidaan todeta, että huokoisen aineen lujuuden muodostumisen kannalta sekundäärisidokset ovat erittäin merkittäviä, jopa usein ensisijaisen määrääviä, joskin huokoisen aineen aineosasten eli partikkelien sisäisiä sidoksina ovat tavallisesti primäärisidokset.

Koska van der Waals'n sidoksilla on huokoisten aineiden lujuuteen merkittävä tai ratkaiseva osuus, tarkastelemme seuraavassa lyhyesti kahden toisiaan lähellä olevan makroskooppisen ainepinnan välistä sidosta eli näiden pintojen välistä van der Waals'n vetovoimaa, joka siis ei ole gravitaation eikä kemiallisen sidoksen aikaansaama eikä siis kahden molekyylin välinen van der Waals'n sidos ( $F = a/r^7$ ). Tälle esim. levyjen väliselle vetovoimalle voidaan kirjoittaa yhtälö [8]

$$F = A/H^3 \quad (4)$$

missä A on parametri ja H levyjen välinen etäisyys. Parametri on aineen ja eräiden muidenkin tekijöiden funktio ja etäisyyden H tulee olla selvästi molekyylikokoa suurempi. Kvartsilevyparille pätee likimain seuraava yhtälö

$$F = \frac{5 \cdot 10^{-12}}{H^3} \text{ N/m}^2 \quad (5a)$$

eli

$$F = \frac{5 \cdot 10^{-17}}{H^3} \text{ kp/cm}^2 \quad (5b)$$

kun H on ilmaistu cm:nä.

Seuraavassa taulukossa on tarkasteltu edellisen yhtälön mukaisia kahden kvartsilevyn välisiä vetovoiman arvoja.

H Å	F kp/cm <sup>2</sup>	Huomautuksia
10	50000	Kolloidikoon alaraja
30	1800	Sementtikiven osasten keskim. väli
100	50	
300	0,2	
1000	0,1	Kolloidikoon yläraja

Yllä olevasta taulukosta nähdään selvästi huokoisten dispersien aineiden osasten läheisyyden vaikutus näiden aineiden lujuuteen. Tavallisen portlandsementtikiven rakenneosasten keskimääräiseksi väliksi (huokosten keskikooksi) on todettu noin 30 Å, ominaispinta-alaksi noin 200 m<sup>2</sup>/g, vähimmäishuokoisuudeksi noin 29 % (läsnä vain hydraattivettä) ja lujudeksi noin 1000 kp/cm<sup>2</sup>. Näin ollen yhtälö (5b) näyttää antavan suuruusluokalleen oikean arvon tälle monenlaisista kalsiumsilikaattihydraateista koostuvalle sementtikivelle, jossa on myös partikkelien välisiä kemiallisia sidoksia.

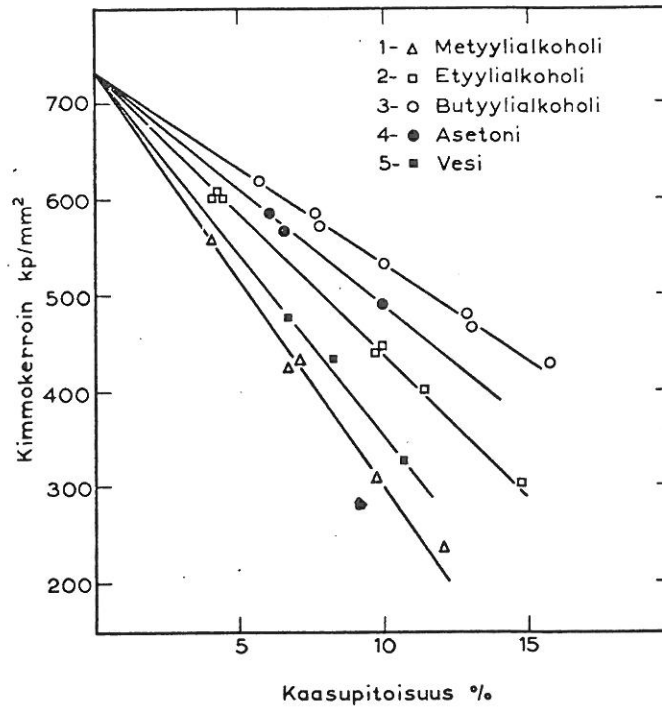
Mielenkiintoista lienee todeta, että sementti- ja kipsijauheiden hiukkasten liittymistä toisiinsa eli niiden välisiä vetovoimia (koheesiota) tutkittaessa on havaittu, että niiden koheesioraja on noin 20 μ eli 2·10<sup>-3</sup> cm [8]. Osasten halkaisijan ollessa tätä pienempi voidaan havaita osasten takertumista toisiinsa, mutta osasten ollessa suurempia on koheesion vaikutus pakkaukseen mitätön.

##### 5. HUOKOSISSA OLEVIEN KAASUJEN JA NESTEIDEN VAIKUTUS OMINAISUUKSIIN, ERITYISESTI LUJUUTEEN. KUIVUMISLUJITTUMINEN

Huokoisten aineiden ominaisuudet ja niissä tapahtuvat ilmiöt

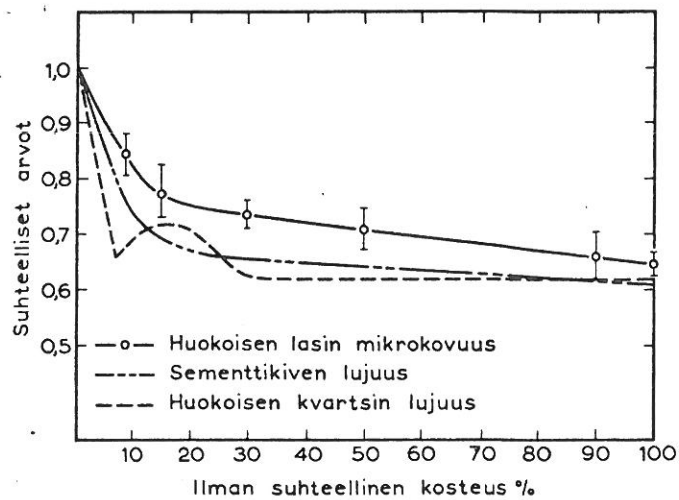
riippuvat usein varsin ratkaisevasti huokosissa olevan kaasun, höyryn tai nesteen lajista ja määrästä (kuva 2) [10], joka taas vuorostaan riippuu ympäristön kaasun, höyryn tai nesteen paineesta. Huokospintoihin enemmän tai vähemmän voimakkaasti kiinnittyneet molekyyli-  
lajit, niiden ja pinnan molekyylien vuorovaikutus sekä niiden toiminta voivat olla niin merkittäviä, että huokospinnoilla ja huokosissa olevaa ainetta, esim. vettä, on pidettävä usein huokoisen aineen oleellisena aineosana. Erityisen merkittävä vaikutus on silloin, kun kaasun ja aineen välillä tapahtuu voimakkaita kemiallisia reaktioita; esim. sementtipohjaisissa aineissa (betoni, asbestibetonituotteet ym) voi ilman sisältämän hiilidioksidin vaikutus olla erittäin merkittävä [9].

Huokoisten aineiden lujuus riippuu useimmiten merkittävästi, usein ratkaisevastikin, huokosissa olevan aineen lajista ja määrästä (kuva 3) [10]. Kun huokostäyttöaineina ovat kaasut, höyryt ja nesteet, niin voidaan todeta huokoisen aineen lujuuden olevan suurin tyhjiössä silloin kun huokospinnat (hiukkaspinnat) ovat puhtaina. Tämä perustuu kahteen pääseikkaan: ensinnäkin pintojen vapaa energia on suurin tyhjiössä, jolloin uusien pintojen synnyttämiseen tarvitaan eniten energiaa; toiseksi huokosissa olematon aine ei voi erottaa aineen rakeneosia kauemmaksi toisistaan. Huokosissa olevan aineen toimiessa muuttavana rakenneosana, joka erottaa rakennepartikkeleita, välittää kuormitusta, muuttaa kitkaolosuhteita ja kantaa kuormaa, tämä aine voi, sen laji ja määrä, vaikuttaa ratkaisevasti huokoisen aineen lujuuteen. Esim. täysin kuivan betonin puristuslujuuden on todettu eräissä tapauksissa olevan kaksi kertaa niin suuri kuin täysin märän betonin lujuus (ks. kuvaa 3). Hyvänä esimerkkinä tästä kuivumislujittumisesta ovat myös savet, huokoiset lasit ja jokapäiväisestä ympäristöstä tut-



B 2088

Kuva 2. Esimerkkejä ympäristökaasujen vaikutuksesta huokoisen aineen ominaisuuksiin (kimmokerroimeen) Zhurkov'n mukaan Feldman & Sereda'n esittämänä [10].



B 2089

Kuva 3. Huokoisen lasin mikrokovuuden, sementtikiven ja huokoisen kvartsin lujuuden riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta tasapainotilassa eräiden koetulosten mukaan. Feldman & Sereda [10].

tu leipä. - Asian monimutkaisuuden vuoksi ei yleistä teoriaa, hyväistä yrityksistä huolimatta, ole vielä onnistuttu löytämään. - Mainittakoon vielä, että nestetäyttöisen huokoisen aineen jännitystilän luonne voi olla aivan toinen kuin vastaavan kuivan aineen jännitystilän luonne; esim. kuivan huokoisen aineen yksiakselinen jännitystila muuttuu nestetäyttöisenä kolmiakseliseksi.

Betonin kuivumislujittumista allekirjoittanut on tarkastellut monissa tutkielmissa ja esittänyt tästä koetuloksia [11...14]. Kokeet muodostuvat pitkäaikaisiksi, koska kosteustasapainon saavuttamiseen pienilläkin koekappaleilla kuluu pari vuotta. Näin ollen kertyy koetuloksia hitaasti. Kuva 4 esittää ennakkotuloksia viimeisistä koesarjoista. Kunnollisen teorian muodostaminen kuivumislujittumisesta ja vettymisheikkenemisestä vaatii paljon enemmän koetuloksia kuin mitä tällä hetkellä on käytettävissä. Mielenkiintoisen tarkastelumahdollisuuden on tarjonnut yhtälö [24], [25]

$$\left(\frac{S}{S_t}\right)^2 = 1 - \frac{1}{k s_t} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (6)$$

missä  $S_t$  on huokoisen aineen lujuus ja  $s_t$  pintaenergia tyhjiössä tasapainotilassa sekä  $S$  osoittaa lujuuden pientymisen kosteuspitouuden kasvusta seuraavan paisumisen  $\Delta l/l$  funktiona. Parametri  $k$  voidaan laskea huokoisen aineen ominaispinta-alan, tiheyden ja kimmokerrotoimen avulla [25].

## 6. HUOKOISTEN AINEIDEN OMINAISUUKSIEN HISTORIARIIPPUVUUDESTA JA IRREVERSIBILITEETISTÄ

Hienohuokoisissa aineissa, joiden partikkeli- ja huokoskoot ovat pieniä ja siis ominaispinta-ala on suuri, ominaisuudet osoittautuvat olevan historiariippuvaisia ja usein vielä palautumattomasti

eli irreversiibelisti. Tämän tyyppisillä aineilla sanotaan olevan muisti. Betonin osalta on näitä asioita käsitelty varsin laajasti kirjoituksessa [15]. Käytännössä tämä merkitsee tavallisesti sitä, että tällaisten huokoisten aineiden ominaisuudet muuttuvat kuormitus-, lämpötila-, kosteus- yms. vaihteluissa. Tavallisesti muutos näkyy pysyvänä muodonmuutoksena, mutta käytännöllisesti katsoen huokoisen aineen kaikkien muidenkin suureiden arvot, myös lujuusarvot, muuttuvat, toiset enemmän, toiset vähemmän ja toiset enemmän irreversiibelisti ja toiset vähemmän irreversiibelisti. Muutokset ovat kuitenkin usein niin merkittäviä, että niiden huomiotta jättäminen voi tehdä tutkimustyön arvon kyseenalaiseksi. Tutkimustyön suuntaaminen aineiden rakenteen ja ominaisuuksien pysymättömyyden selvittämiseen on tekniikan kehittyessä yhä enemmän tarpeen.

## 7. LUJUUDEN RIIPPUVUUS HUOKOISUUDESTA

Huokoisen aineen lujuudelle ovat määräävinä 1) edellä kappaleessa 4 selostetut sidokset, jotka ovat sitä heikompia, mitä kauempana aineosaset ovat toisistaan ja 2) sidosten määrä ainemäärään nähden ja se, että 3) huokokset (halkeamat) aikaansaavat jännityshuippuja. Tästä seuraa, että huokoisten aineiden lujuus on ratkaisevasti riippuvainen huokoisuudesta eli kääntäen aineen tyhjätilan täyttöasteesta. Lujuuden riippuvuus huokoisuudesta voidaan usein ilmaista seuraavan yksinkertaisen yhtälön avulla [16]

$$S_p = S_o (1 - P)^n \quad (7)$$

missä  $S_p$  = huokoisen aineen lujuus, kun huokoisuus on  $P$

$S_o$  = tiiviin aineen lujuus, kun  $P = 0$

$P$  = huokoisuus tilavuusosina

$n$  = valittava parametri

Monien hauraiden tai likimain hauraiden aineiden (esim. keraamisten aineiden, kipsin, betonin ja hauraiden metallien) lujuuden on voitu todeta likimain puolittuvan aina kun huokoisuus kasvaa 10 %. Tällainen riippuvuus voidaan ilmaista edellä esitetyn yhtälön avulla, kun  $n \sim 6$  eli

$$S_P = S_0(1 - P)^6 \quad (8)$$

Kuva 5 esittää yhtälön (8) mukaan käsiteltyjä kivilajien puristuslujuuksia. Muitakin yhtälöitä on esitetty kuvaamaan lujuuden riippuvuutta huokoisuudesta. Esimerkiksi keraamiselle aineille [6], [18]

$$S = S_0 e^{-nP} \quad (9)$$

missä  $n$  on parametriluku, joka vaihtelee 4...7. Edelleen on monikiteisille alumiineille esitetty yhtälön (9) kaltainen yhtälö

$$S = B e^{-bP} \quad (10)$$

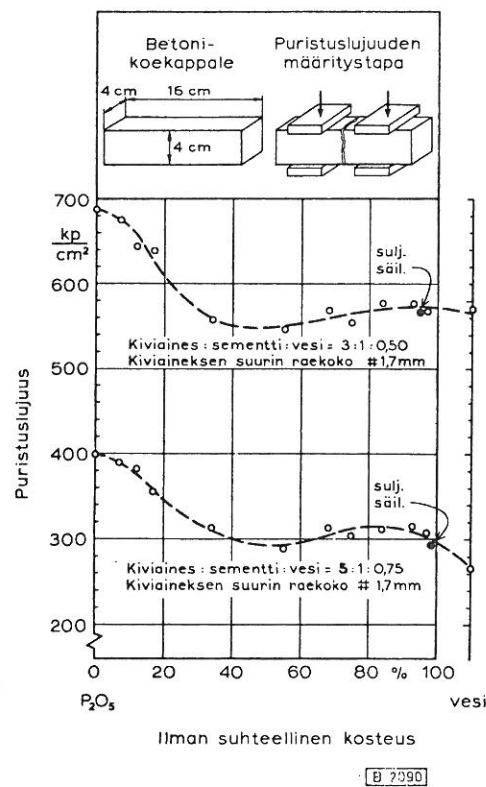
missä  $B$  ja  $b$  ovat sopivasti valittuja parametrejä.

On selvää, että paitsi huokostilavuutta  $P$ , myös huokosten koko, muoto ja laji sekä niiden jakautumat vaikuttavat lujuuteen. Edellä esitetyt vapaat parametrit siis ovat niistä riippuvaisia. Seuraava yhtälö esittää erään riippuvuuden, jossa parametrit  $A$  ja  $B$  ovat valinnaisia ja edellä mainituista tekijöistä riippuvia

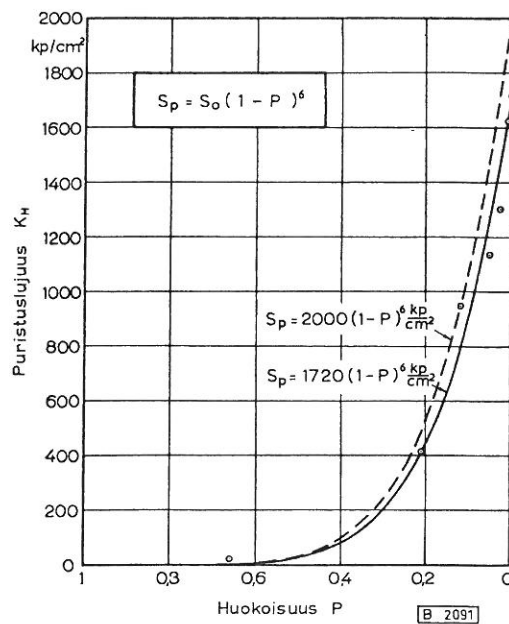
$$S = S_0(1 - AP + BP^2) \quad (11)$$

Samanlaisen riippuvuuden on todettu pätevän myös kimmokertoimelle. Yhtälön on todettu pätevän erityisesti monikiteisille keraamisille aineille.

Puuttumatta tässä betonin lujuuden ja huokoisuuden väliseen riippuvuuteen todettakoon, että sitä viime aikoinakin edelleen käsitelty mm. [16], [18...21]. Pienentämällä betonin huokoisuutta käyttämällä tiivistettäessä korkeita paineita (500...7000 kp/cm<sup>2</sup>) on



Kuva 4. Lähes kaksi vuotta suljetusti esisäilytetyjen betoni-laastikoekappaleiden puristuslujuustulosten riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta (ei karbonatisoitumista) esituloksien (100 viikkoa) mukaan. Pihlajavaara & Pihlman, maaliskuu 1972.



Kuva 5. Puristuslujuuden  $S_p$  ja huokoisuuden P välisten potenssilain soveltaminen noin 100 kivilajin keskimääräisiin tuloksiin. Verbeck & Helmuth'n mukaan. Pihlajavaara [4].

päästy sementtikivikoekappaleilla noin 3000 kp/cm<sup>2</sup> lujuuteen [7].

#### 8. LUJUUDEN RIIPPUVUUS AINEEN RAKENNEOSASTEN KOOSTA JA HUOKOISUUDESTA

Lujuuden on myös voitu todeta riippuvan aineen rakenneosasten koosta ja monikiteisille alumiineille on osoittautunut sopivaksi yhtälö

$$S = SD^{-n} \quad (12)$$

missä D on rakeen tai kiteen tai yleensä partikkelin koko sekä A ja n sopivasti valittuja parametrejä. Rakeen koon pienetessä siis lujuus kasvaa. Voidaankin käsittää, että esim. sementin ja veden välisen hydrataatioreaktion ensisijaisena tarkoituksena olisi suurten sementtirakeiden saattaminen erittäin pieniksi hydrataatiotuotepartikkeleiksi. Tämä ilmiö on voitu myös todeta jauhamalla kvartsia yhä pienempirakeiseksi ja valmistamalla näistä jauheista puristeita. Sementin hydrataatiotuotteista (sementtikivestä) on hienoksijauhamalla ja puristamalla saatu alkuperäiseen sementtikiveen verrattavaa sementtikiveä [22].

Yhdistämällä "raekoon" ja huokoisuuden vaikutus on päädytty seuraavaan käyttökelpoiseksi osoittautuneeseen yhtälöön [17]

$$S = S_0 D^{-n} e^{-mP} \quad (13)$$

missä n ja m ovat sopivasti valittuja parametrejä.

Osasista koostuvien aineiden mallien rakentelusta esitettävään erinomaisena esimerkkinä tanskalaisen Bachen tutkielma [23], jossa hän päätyy seuraavaan teoreettiseen malliin

$$\frac{SD^{1/2}}{sE} \cdot \frac{D}{d} = f(P) \quad (14)$$

missä S on lujuus, D osasten koko, s pintaenergia, d osasten tartuntapinnan lineaarinen pituus, E kimmokerroin ja funktio  $f(P)$  huokoisuuden P funktio.

#### 9. HUOKOISTEN AINEIDEN TULEVAISUUDESTA

Huokoiset eristysaineet, joissa huokoisuus esim. lisää lämmön-eristävyyttä tai keveyttä tai molempia, tai edistää vesihöyrynläpäisevyyttä, säilyttänevät tulevaisuudessakin asemansa, vaikka uusia aineyhdistelmiä syntyykin aika-ajoin. Niillä huokoisilla aineilla, jotka jonkin muun tehtävänsä, esim. lämmöneristävyyden tms. ohella toimivat kuormaa kantavina rakenneaineina, näyttää olevan selvä tehtävänsä ainakin lähitulevaisuudessa. Rakennusteknisesti tärkeimpiä huokoisia aineita eli puuta ja betonia, jotka ovat jo varsin monipuolisia ja joita on runsaasti saatavana (varsinkin betonia) yhä laajenevaan rakennustoimintaan, pyritään kehittämään yhä monipuolisemmaksi silmälläpitäen niiden kolmea päätehtävää

- lujuutta, eristävyyttä ja kestävyyttä  
sekä lisäksi keveyttä, taloudellisuutta, yleistä käyttökelpoisuutta, luotettavuutta ja huollettavuutta. Jos perusainetta ei syystä tai toisesta voida kehittää, yritetään sen ominaisuuksia muuntaa edullisemmaksi eri aineosilla. Keveämpiin ja silti vielä varsin lujiin rakenteisiin on päästy korvaamalla betonin aineosista varsin raskas kallioperäinen kiviaines kevyellä poltetulla savisoralla, ns. kevytsoral-la. Muovikyllästeinen puu ja muovikyllästeinen betoni ovat jo osittain sivuuttaneet kokeiluvaiheen, vaikkakin niiden kalleus on ainakin toistaiseksi vakava este niiden laajalle käytölle. Muovikyllästys on nimenomaan parantanut merkittävästi mainittujen aineiden lujuus- ja kestävyysominaisuuksia pienentämällä huokoisuutta. Kuitube-

toni (lankabetoni) on myös jatkuvan kehittelyn alaisena ja muutamia käytännön sovellutuksiakin on jo suoritettu. Muovikyllästeisen betonin ja kuitubetonin sekä varsinkin näiden yhdistelmän lukuisat ominaisuudet ovat moninkertaisesti parantuneet verrattuna tavallisen betonin vastaaviin ominaisuuksiin. Edelleen pyritään tavallisen betonin korkeimmat lujuudet saamaan noin  $1000 \text{ kp/cm}^2$ :iin.

Rakennusteollisuuden suuren volyymin vuoksi näyttää mahdottomalta, että betoni ja puu menettäisivät valta-asemansa - päinvastoin lukuisien eri tarkoituksiin soveltuvien yhdistettyjen aineiden aineosina niiden soveltamisalue tulee laajenemaan.

Huokoisia rakennusaineita siis on, tulee olemaan ja tarvitaan runsaasti rakennusalan sovellutuksia varten ja niiden käyttö tulee monipuolistumaan. Rakennusalan huokoisten ja muiden materiaalien tutkimus- ja kehitystyön prioriteettiasemassa tullevat olemaan yhdistetyt aineet.

Tämän artikkelin kirjoittaja haluaa kiittää Suomen Akatemian Valtion teknillistieteellistä toimikuntaa, jonka myöntämä varttuneen tieteenharjoittajan apuraha on mahdollistanut tämän työn.

#### Kirjallisuutta

- [1] Fagerlund, G., Reserapport över möte med RILEM's arbetsgrupp "Pore structure and properties of materials" in Bristol and Watford, 21-23 Juni 1971. Lund. 1971. Tekniska Högskolan i Lund, Avd. byggnadsmateriallära.
- [2] Pihlajavaara, S.E., Katsaus aineen lujuuteen haurasmurtoteorioiden pohjalta. Rakenteiden mekaniikka 2 (1969) 2, s. 81-85.

- [3] Pihlajavaara, S.E., Johdatusta reologiaan. Rakennustekniikka 7/26 (1970) 9, s. 497-505.
- [4] Pihlajavaara, S.E., Johdatusta yhdistettyihin aineisiin. Rakennustekniikka 8/27 (1971) 5, s. 379-385.
- [5] Calow, C.A. & Moore, A., Reinforcement of metals with ceramic whiskers and fibres. Composites (1971) December, p. 231-236.
- [6] Davidge, R.W. & Evans, S.G., Strength of ceramics. Review paper. Materials science and engineering 6 (1970) 5, p. 281-298.
- [7] Halvorsen, U.A. & Samuelsson, P., Engelsk betongteknik av idag. Cement och betong (1971) 4, s. 419-432.
- [8] Powers, T.C., The properties of fresh concrete. New York, John Wiley, 1968. 664 p.
- [9] Pihlajavaara, S.E., Betonin karbonatisoitumisesta. Rakennustaito 65 (1970) 9, s. 337-338.
- [10] Feldman, R.F. & Sereda, P.J., A new model for hydrated portland cement and its practical implications. Ottawa 1970. National Research Council of Canada, Division of Building Research. Research paper No. 454.
- [11] Pihlajavaara, S.E., On the interrelation of the moisture content and strength of mature concrete, and its reversibility. An investigation on the drying-hardening and wetting-weakening of concrete. Helsinki 1964. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus. Sarja III-Rakennus 76. 44 s.
- [12] Pihlajavaara, S.E., Notes on the effects of moisture on the strength changes in concrete. Hydration-hardening, drying-hardening, wetting-weakening, freezing-hardening, and thawing-weakening of concrete. RILEM/CIB symposium on moisture problems in buildings. Otaniemi 1965. Report 1-1. 11 s.
- [13] Pihlajavaara, S.E., Festigkeitserhöhung bei Austrocknung und Festigkeitsverminderung bei Durchfeuchtung des Betons. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17 (1968) 6, s. 1572-1974.
- [14] Tiusanen, K. & Pihlajavaara, S.E., The strength of extremely dry and wet mature concrete. An experimental study on the effect of vacuum-wetting, high-pressure-wetting and oven-drying on the strength of concrete. Helsinki 1969. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus. Sarja III-Rakennus 139. 24 s.
- [15] Pihlajavaara, S.E., History-dependence, ageing, and irreversibility of properties of concrete. International conference on structure, solid, mechanics, and engineering design in civil engineering. Southampton 1969. Paper 66. Proceedings, London, Wiley-Interscience, 1971, p. 719-741.

- [16] Auskern, A., A model for the strength of cement-polymer and concrete polymer systems. New York 1969. Brookhaven National Laboratory. Publication BNL 13 493.
- [17] Conrad, H., Mechanical behavior of ceramic materials. Deformation and fracture related to design and use. Chapter III in Searcy & Ragone & Colombo (editors), Chemical and mechanical behavior of inorganic materials. New York, Wiley-Interscience, 1970.
- [18] Popovics, S., Effect of porosity on the strength of concrete. Journal of materials 4 (1969) 2, p. 356-371.
- [19] Lawrence, P. & Majumdar, A.J. & Nurse, R.W., Application of Mackenzie model to the mechanical properties of cement pastes. Cement and concrete research 1 (1971) 1, p. 75-99.
- [20] Beaudoin, J.J. & MacInnis, C., Effect of admixtures on the strength-porosity relationship of portland cement paste. Cement and concrete research 1 (1971) 1, p. 3-11.
- [21] Martin, R.B. & Haynes, R.R., Theoretical analysis of the effects of air voids in concrete. J. Am. Concr. Inst. 68 (1971) 1, p. 35-41.
- [22] Sereda, P.J. & Feldman, R.F. & Swenson E.G., Effect of sorbed water on some mechanical properties of hydrated portland cement pastes and compacts. Washington 1966. Highway Research Board. Special report 90.
- [23] Bache, H.H., Model for strength of brittle materials built up of particles joined at points of contact. Journal of the American ceramic society 53 (1970) 12, p. 654-658.
- [24] Pihlajavaara, S.E., On the main features and methods of investigation of drying and related phenomena in concrete. Helsinki 1965. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Julkaisu 100. 142 s.
- [25] Wittmann, F., Zum Einfluss der Oberflächenenergie auf die Festigkeit eines porösen Stoffes. Zeitschrift für angewandte Physik 25 (1968) 3, s. 160-163.

S.E. Pihlajavaara, fil.tri, VTT:n tutkija