

KATSAUS RAKENNUSAINEIDEN VIRUMISEEN JA LUJUUTEEN PITKÄ- AIKAISKUORMITUKSESSA

Rakenteiden Mekaniikka
8 (1975) 2, s. 107...137
Rakenteiden Mekaniikan
Seura, Helsinki

PEKKA KANERVA

YHTEENVETO

Artikkelissa käsitellään rakennusaineiden pitkäaikaismuodonmuutosten syitä ja osoitetaan, että ajan vaikutus muodonmuutoksiin on riippuvainen aineen rakenteesta, jonka vuoksi esimerkkeinä käytettyjen rakennusaineiden rakennetta on jossain määrin selostettu. Kosteuden ja lämpötilan vaikutusta on käsitelty myös lyhyesti. Lisäksi on esitetty joitakin pitkäaikaislujuuteen vaikuttavia näkökohtia. Vaikka artikkeli on kirjoitettu pääasiassa käytännön rakennussuunnittelutehtävissä toimivia insinöörejä silmälläpitäen, siinä on käsitelty myös jonkin verran pitkäaikaiskokeiden suunnittelussa ja suorittamisessa huomioonotettavia seikkoja.

1. JOHDANTO

On yleisesti tunnettua, että useimpien rakennusaineiden muodonmuutokset ovat ajasta riippuvia. Tämä aikariippuvuus on tavallisesti voimassa muodonmuutoksen aiheuttavasta syystä riippumatta. Ta-

vallisimmat muodonmuutosten aiheuttajat ovat ulkoinen kuormitus, kosteuden ja lämpötilan muutokset. Edelleen on tunnettua, että pitkäaikainen kuormitus vaikuttaa rakennusaineiden lujuuteen tavallisimmin alentamalla sitä.

Kirjallisuudessa ja rakennusaineita käsittelevissä normeissa ja muissa suunnitteluohjeissa annetaan ohjeita pitkäaikaismuodonmuutosten arvioimiseksi. Tämän artikkelin tarkoituksena on kuvata syitä, miksi aika vaikuttaa rakennusaineiden muodonmuutoksiin ja lujuuteen. Varsinaisia laskentaohjeita ei pyritä antamaan, vaan tyydytään ilmiön sanalliseen selitykseen. Matemaattisia kaavoja esitetään vain silloin, kun ne esityksen havainnollisuuden vuoksi ovat tarpeen. Lisäksi esitetään pitkäaikaiskokeiden suunnittelussa huomioonotettavia näkökohtia ja joitakin rakenteiden suunnittelua koskevia ohjeita. Käsittelyä ei rajoiteta mihinkään tiettyyn aineeseen, vaan soveltuvin kohdin käsitellään puuta, metalleja, betonia, keraamisia aineita, muoveja ja maa-lajeja.

2. PERUSTEITA

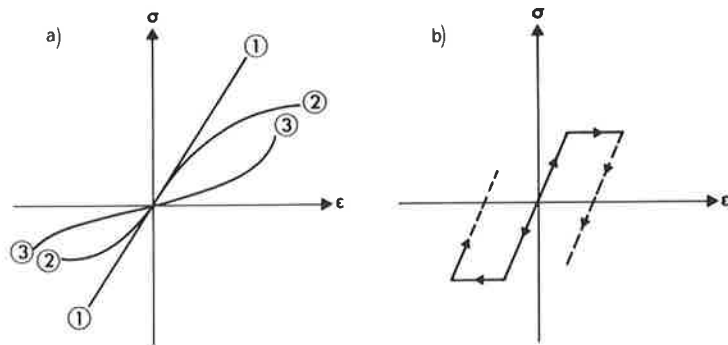
Kiinteät aineet voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- aineet, joiden käyttäytymistä tarkasteltaessa ajan vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon (kuva 1)
- aineet, joiden tarkastelussa aika on otettava huomioon (kuva 2).

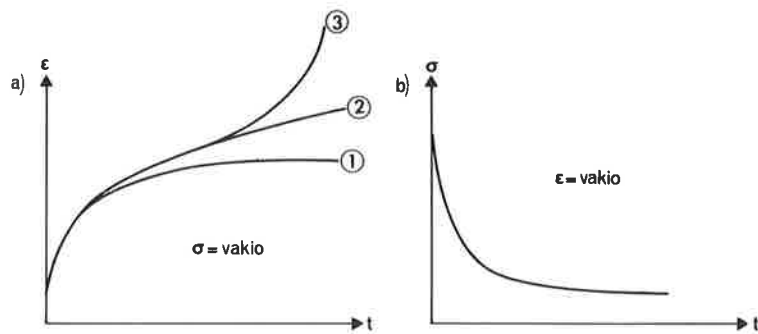
Jälkimmäisen ryhmän aineista muodostavat tärkeän ryhmän viskokimmoiset aineet (kuva 2), joiden käyttäytymisen matemaattista käsittelyä varten on olemassa varsin pitkälle kehitetty teoria, viskokimmoisuusteoria.

Vakiojännityksen alaisena tapahtuvaa muodonmuutoksen kasvua nimitetään viskokimmoisuusteoriassa virumiseksi ja vakio muodonmuutoksen

alaisessa kappaleessa tapahtuvaa jännityksen alenemista relaksaatioksi. Betonin virumisesta käytetään usein nimitystä hiipuma, mutta tässä artikkelissa käytetään sekaannusten välttämiseksi kaikkien aineiden kohdalla nimitystä viruminen.



Kuva 1. a) Kimmoinen aine ①
 ① = lineaarisesti kimminen
 ② ja ③ = epälineaarisesti kimminen
 b) Kimmoplastinen aine.



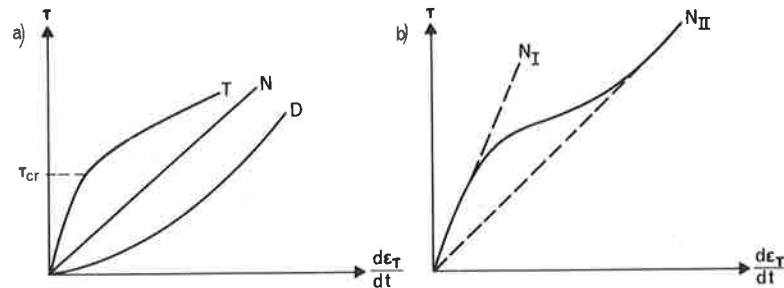
Kuva 2. Viskokimmoinen aine a) Viruminen
 ① primäärinen ② sekundäärinen
 ③ tertiäärinen viruminen ja murtuminen
 b) Relaksaatio

Virumis- ja relaksaatiokokeita tehdään keskisesti vedetyillä tai puristetuilla, väännetyillä tai taivutetuilla koskappaleilla. Koekappaleen jännitystilalla on huomattava vaikutus virumiseen. Vääntökokeissa käytetyissä pyöreissä sauvoissa tapahtuu pelkkää muodonvääristymistä. Vedetyissä koekappaleissa tilavuus pyrkii kasvamaan muodonvääristymisen ohella ja puristetuissa kappaleissa tilavuus pienenee. Mittaamalla keskisesti kuormitetun kappaleen mahdollinen tilavuudenmuutos voidaan päätellä, tiivistyykö vai löyhtyykö koekappale virumisen aikana. Esimerkiksi puristettujen betonikappaleiden tilavuuden on todettu pienentyvän [21]. Tilavuudenmuutoksen suuruuden perusteella voidaan tehdä joitakin päätelmiä virumisen mekanismista.

Kiinteät aineet voidaan määritellä esimerkiksi siten, että niillä on kyky säilyttää muotonsa ja vastustaa niihin kohdistuvien ulkoisten voimien vaikutusta. Nesteillä ei taas ole tätä ulkoisten voimien vastustamiskykyä, vaikka jähmeiden nesteiden, kuten lasi ja bitumi, muodonmuutokset tapahtuvatkin hitaasti. Nesteen muuttaessa muotoaan sen molekyylit tai molekyyliyhymät siirtyvät uusiin paikkoihin. Nesteissä molekyyleillä ei ole toisiinsa nähden sellaisia tarkoin määrättyjä paikkoja kuin kiinteissä aineissa. Kun näitä kuormitetaan, niin aineosasten etäisyydet pitenevät tai lyhenevät, mutta muodonmuutoksen ollessa kimmainen aineosasten muodostama hilaverkko säilyy entisellään siten, että osasten viereiset hiukkaset eivät vaihdu kuormituksen aikana. Kun kuormitus poistetaan hilaverkko palautuu välittömästi alkuperäiseen muotoonsa.

Tämän perusteella voidaankin johtaa ensimmäinen ajasta riippuvia muodonmuutoksia koskeva peruslauselma: Jotta ajasta riippuva muodonmuutos olisi mahdollinen, kappaleen aineosasten täytyy siirtyä uusiin paikkoihin joko virtaamalla tai kiertymällä ja liukumalla toisiinsa nähden siten, että niiden paikka aineosien muodostamassa hilaverkossa vaihtuu ja muodonmuutoksen tapahduttua niiden viereiset aineosaset ovat vaihtuneet. Ajasta riippuvaan muodonmuutokseen saattaa liittyä materiaalin vaihtoa ympäristön kanssa. Samanaikaisesti aineessa voi tapahtua kemiallisia muutoksia, kuten betonin hydrataatio ja karbonatisoituminen, jotka muuttavat aineen rakennetta ja tilavuutta ja vaikuttavat siten pitkäaikaismuutoksiin ja tekevät niiden tarkastelun vaikeaksi.

Peruslauselmasta seuraa edelleen, että ajasta riippuva muodonmuutos on useimmiten sitä suurempi, mitä helpommin aineen osaset voivat liikkua toisiinsa nähden. Täten makroskooppisesta muodonmuutosten tarkastelusta joudutaan aineen rakenteen ja sen aineosasten liikkumistarkasteluun. Esimerkkinä tarkastelemme erilaisia nesteitä (kuva 3).



Kuva 3. Nesteen leikkausjännityksen ja vastaavan muodonmuutosnopeuden välinen yhteys.

- a) Perustapaukset N = Newtonin neste
 T = tiksotrooppinen neste
 D = leikkauslujeneva neste
- b) Esimerkki monimutkaisemmasta nesteestä
 N_I = ensimmäinen newtonilainen vaihe
 N_{II} = toinen newtonilainen vaihe

Ns. Newtonin nesteessä viskoosisuus on riippumaton leikkausmuodonmuutoksen nopeudesta ja vaikuttava leikkausjännitys saadaan kaavasta

$$\tau = \eta \cdot \frac{de_{\tau}}{dt} \quad (1)$$

jossa η = viskositeetti = vakio

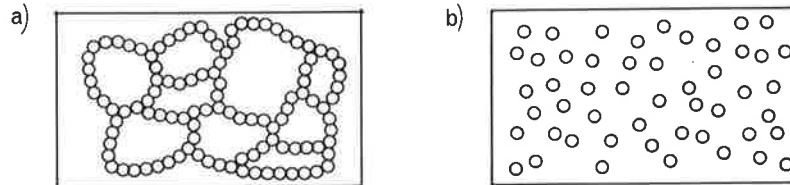
Tiksotrooppisia ovat nesteet ja usein kiinteiden hiukkasten ja nesteiden seokset, suspensiot, joiden viskositeetti alenee isotermisesti leikkausmuodonmuutosnopeuden kasvaessa ja palautuu alkuperäiseen arvoonsa, kun neste on jälleen lepotilassa.

Leikkauslujenevia (dilatant, shear-thickening) ovat nesteet ja suspensiot, joiden viskositeetti kasvaa isotermisesti leikkausmuodonmuutosnopeuden kasvaessa ja alenee jälleen nesteen saavutettua lepotilan. Ilmiöön voi liittyä tilavuuden muutos.

Tiksotropian syynä on nesteen sisältämien kiinteiden hiukkasten tai ketjumaisten molekyylien muodostama lepotilassa jatkuva rakenne tai verkko, jossa kiinteiden hiukkasten väliset vetovoimat vastustavat nesteen leikkausmuodonmuutosta (kuva 4). Kun leikkausmuodonmuutosnopeus ja samalla leikkausjännitys saavuttavat tietyn arvon τ_{cr} , tämä jatkuva rakenne hajoaa nesteessä kelluviksi hiukkasiksi ja viskositeetti alenee. Lepotilassa hiukkaset muodostavat uudestaan jatkuvan rakenteen. Tämän tyyppinen käyttäytyminen on ominaista hienojakoisille, vesipitoisille maalajeille, kuten savi, hiesu ja hieta. Yleisin käytännön sovellutus on maalajien ja tuoreen betonimassan tiivistäminen täryttämällä, jolloin aineen viskositeetti alenee suuren liikeno- peuden johdosta.

Leikkauslujenemisen syynä on se, että nesteen ollessa lepotilassa siinä olevat kiinteät hiukkaset ovat tasaisesti jakaantuneet nesteeseen eivätkä kosketa toisiaan. Hiukkasten välinen neste toimii hitaassa muodonmuutoksessa kiinteiden hiukkasten välissä kitkaa alentavana voiteluaineena ja viskositeetti on pieni. Leikkausmuodonmuutosnopeuden kasvaessa hiukkaset joutuvat satunnaisesti kosketuksiin tois-

tensa kanssa ja muodostavat satunnaisesti jatkuvan rakenteen, jossa hiukkasten välinen kitka vastustaa leikkausmuodonmuutosta ja viskositeetti kasvaa. Liikkeen päätyttyä hiukkaset hajaantuvat uudestaan nesteeseen ja viskositeetti alenee. Kerman erottaminen maidosta separaattorilla perustuu leikkauslujenemiseen.



Kuva 4. a) Tiksotrooppinen neste lepotilassa tai leikkauslujittuva neste liiketilassa.
b) Tiksotrooppinen neste liiketilassa ja leikkauslujittuva lepotilassa.

Yleisesti voidaan todeta, että virumisen tai relaksaation edellytyksenä rakennusaineilta vaaditaan jokin seuraavista ominaisuuksista:

- rakennusaine on neste tai suspensio
- rakennusaine on nesteen ja jatkuvan kiinteän aineen seos
- rakennusaine koostuu neulamaisista, levymäisistä tai kuitumaisista osista, jotka voivat taipua, liukua tai kiertyä toisiinsa nähden
- rakennusaine koostuu jatkuvasta verkkomaisesta tai kennomaisesta runkorakenteesta ja sen välitiloissa sijaitsevasta nestemäisestä aineosasta, joka hidastaa kuormituksen aiheuttamaa runkorakenteen muodonmuutosta
- kuormitus aiheuttaa muutoksia rakennusaineen kiderakenteeseen ja sitä kautta ajasta riippuvia muodonmuutoksia
- kuormitus aiheuttaa rakennusaineeseen pieniä paikallisia halkeamia,

joiden muodostuminen tasoittaa paikalliset jännityshuiput ja aiheuttaa rakenteen tilavuuden ja muodon muutoksia.

Joissakin aineissa esiintyy vain yksi virumista aiheuttava ominaisuus ja joissakin useita. Jälkimmäisten käyttäytyminen pitkäaikaiskuormituksessa on usein hyvin vaikeasti selvitettävissä.

Kun kuormitus poistetaan, osa muodonmuutoksesta palautuu heti kimmoisesti ja osa hitaasti. Hitaasti palautuvan osan suuruus ja kappaleeseen jäävän pysyvän muodonmuutoksen suhteellinen suuruus riippuu virumisen mikromekanismista.

Lämpötilan ja kosteuden muutosten aiheuttamat tilavuuden ja muodonmuutokset ovat samalla tavoin ajasta riippuvia, kuin kuormituksen aiheuttamat, jos rakennusaine on yhdistetty aine, jonka komponenteilla on eri suuret lämpölaajenemis- ja kosteudenlaajenemiskertoimet. Eri suuret laajenemiset aiheuttavat tällöin rakennusaineeseen jännityksiä, jotka viruvat ja relaxoituvat samoin kuin kuorman aiheuttamat jännitykset.

Kuormituksen suuruuden vaikutusta tarkasteltaessa voidaan otaksua likimäärin, ettei kuormitus aiheuta aineeseen murtumista eikä halkeamista. Käyttäen hyväksi tilastollista mekaniikkaa voidaan osoittaa [6], että virumisen alussa muodonmuutosnopeus saadaan kaavasta

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = C_1 \sinh \frac{\sigma}{C_2} \quad (2)$$

jossa C_1 ja C_2 = vakioita ja

σ = vaikuttava jännitys.

Jos suhteellinen viruminen ajan funktiona on jännitystasosta riippumaton, virumismuodonmuutoksen loppuarvo on suoraan verrannol-

linen muodonmuutosnopeuteen virumisen alussa ja riippuu siten jännityksestä kaavan (2) mukaisesti.

Pienillä jännityksen arvoilla \sinh -funktiota voidaan approksimoida suoralla, kuten käytännön virumislaskelmissa tavallisesti tehdään.

3. KITEISTEN AINEIDEN VIRUMINEN

Kiteiset aineet ovat aina kiinteitä aineita. Tässä esityksessä ne jaetaan kiteitä koossapitävien, kiteen perusaineen atomien tai molekyylien välisten vetovoimien alkuperän perusteella kahteen ryhmään:

- metallit, joissa atomien välinen pääasiallinen sidos on ns. metallinen sidos
- epämetalliset kiteiset aineet

Perusaineiden atomien lisäksi kiteissä on tavallisesti erilaisina epäpuhtauksina vieraiden aineiden atomeita ja molekyyliä. Lisäksi kiteessä on poikkeamia säännöllisestä rakenteesta eli kidevirheitä, jotka yhdessä epäpuhtauksien kanssa vaikuttavat huomattavasti kiteiden ominaisuuksiin. Toinen huomattavasti aineen ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on peruskiteistä kasvamalla muodostuneiden rakeiden koko, muoto ja keskinäinen sijainti sekä rakeiden rajapinnoille erkautuneet epäpuhtaudet.

Metalleille on ominaista niiden täydellinen muokattavuus, jolla tarkoitetaan sitä, että suuret leikkausmuodonmuutokset eivät aiheuta aineen rikkoutumista, vaan toistensa ohi liukuneet aineosat kykenevät muodostamaan sidokset uusien atomien ja kiteiden kanssa.

Koska metalleissa ei ole nestekomponenttia, niin mahdolliset virumismekanismit ovat seuraavat:

- jos kiteiden muodostamat rakeet ovat lujia, mutta raerajat pehmeät, niin aineen viruessa rakeet pyörivät ja liukuvat toisiinsa nähden. Tämän vuoksi pienirakeiset metallit, kuten korkealuokkaiset teräkset, viruvat enemmän kuin sama aine suurirakeisena
- tertiäärinen viruminen alkaa, kun raerajoille muodostuu halkeamia
- kiteet voivat virua siten, että jokin kiteen muodonmuutosta estävä atomi siirtyy kiteessä toiseen paikkaan, useimmiten kidekuution keskeltä kiteen pintaan, jolloin kide voi muuttaa muotoaan enemmän raerajituksen suunnassa. Tämä atomien siirtyminen tapahtuu diffundoitumalla, jonka vuoksi ilmiötä nimitetään diffuusiovirumiseksi tai itse-diffuusioksi. Diffuusiovirumista ei pidä sekoittaa nesteen virumisvirtaukseen
- kiteiden rakennevirheet, dislokaatiot, aiheuttavat erikoisesti korkeissa lämpötiloissa kiteiden leikkautumismuodonmuutoksen johdosta hitaan myötämisen, jonka tuloksena viruva aine saattaa lujittua. Tämä ns. dislokaatioviruminen on yksi syy siihen, että ne metallit, joiden sulamislämpötila on alhainen, viruvat voimakkaasti jo huoneenlämpötilassa. Usein näillä ei ole myöskään selvää myötörajaa, vaan myötäminen alkaa jo pienillä jännityksillä, kuten lyijyssä.

Edellisen perusteella ovat virumiselle erikoisen alttiita sellaiset teräkset, joissa lujuutta on kohotettu seostamalla jotain rakeiden kasvua ehkäisevää ainetta ja joiden käyttölämpötila ja jännitys on korkea. Lämpötilan vaikutus on niin huomattava, että tavalliset metallit ovat suuren virumisen vuoksi kelpaamattomia käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa. Toisaalta tätä virumista käytetään hyväksi poistettaessa jännityshuippuja metallirakenteista kohottamalla rakenteen lämpötilaa eli hehkuttamalla. Tulipalossa syntyvä kuormitetun rakenteen pysyvä muodonmuutos johtuu juuri lämpötilan nousun nopeuttamasta virumisesta.

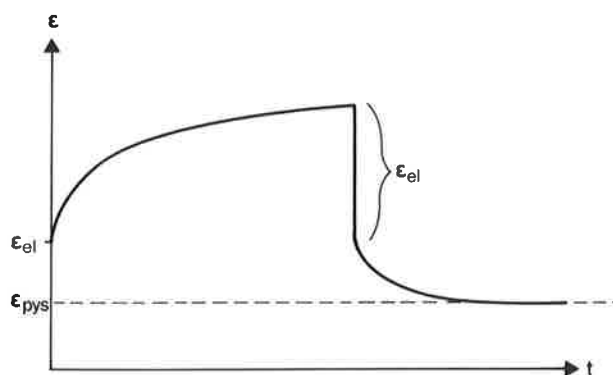
Epämetallisia kiteitä koossapitävät sidokset ovat joko ionisia, positiivisen ja negatiivisen ionin välisiä vetovoimia, kovalenttisia samanlaisten, elektronegatiivisten atomien välisiä sidoksia tai sekundäärisiä, vetysidoksen tai van der Waalsin voimien muodostamia sidoksia. Näille kaikille on yhteistä se, että sidosvoimat ovat tarkoin suuntautuneet toisin kuin metalleissa, joiden sidosvoimat ovat joka suuntaan yhtä suuret. Tästä epämetallisten kiteiden sidosvoimien suuntautuneisuudesta seuraa, että niiden kidemuoto on tarkoin määrätty eivätkä atomit tai ionit voi siirtyä toiseen paikkaan kiteessä kuten metalleissa. Tästä atomien ja molekyylien "liikkumattomuudesta" seuraa, että epämetallisten kiteisten aineiden viruminen on hyvin pieni. Ainoastaan hyvin lähellä sulamispistettä viruminen kasvaa huomattavan suureksi. Virumista pienentäviä tekijöitä ovat vielä kiteiden sisältämät epäpuhtaudet ja huokokset, jotka estävät dislokaatioiden liikettä. Paikallisten mikrohalkeamien muodostuminen on eräs mahdollinen keraamisten aineiden virumisen mekanismi. Vähäisen virumisen vuoksi epämetalliset kiteiset aineet, kuten keraamiset aineet, ovat käyttökelpoisia korkeissa lämpötiloissakin.

4. AMORFISTEN JA YHDISTETTYJEN AINEIDEN VIRUMINEN

Kiteisille aineille on ominaista, että niillä on selvä rajoitettu sulamispiste, jossa ne muuttuvat kiinteästä nesteeksi. Amorfisille, ei-kiteisille kiinteille aineille on ominaista, että ne lämpötilan noustessa pehmenevät vähitellen ilman selvää sulamispistettä. Sen sijaan niille määritellään pehmenemislämpötila, jonka yläpuolella ne ovat erittäin pehmeitä, melkein plastisia tai paremminkin viskoplastisia ja siis käyttökelvottomia kantaviin rakenteisiin.

Syynä tähän käyttäytymiseen on niiden rakenne; ne koostuvat

joko pitkistä ketjumaisista molekyyleistä, kuten useat muovit, tai kolmiulotteista avaruusverkoista. Esimerkkejä muovien virumiskäyristä on esitetty viitteessä [8]. Virumisen aikana syntynyt muodonmuutos palautuu kokonaan, kun kuormitus poistetaan, mikäli kuormitus ei ole aiheuttanut aineeseen pysyviä rakennemuutoksia. Palautuminen tapahtuu ajan funktiona samoin kuin viruminenkin (kuva 5).



Kuva 5. Muodonmuutoksen palautuminen kuormituksen poistamisen jälkeen.

Useimmat muovit ovat yhdistettyjä aineita, koska niissä on polymeerien muodostamia pitkiä ketjumaisia molekyyliä ja viskoosi täyteaine, joka sijaitsee ketjumolekyylien välisissä tiloissa. Yleensä kaikki tällaiset yhdistetyt aineet, joiden toisena komponenttina on viskoosi neste ja toisena kimmoisen aineen muodostama jatkuva, taipuisa runko, käyttäytyvät kuormitettaessa viskokimmoisesti tai viskoplastisesti, rungon osien taipuessa tai suoristuessa kuormituksen alaisena ja nestemäisen komponentin "virratessa" kimmoisen rungon välitiloissa. Jos kimmoinen runko on jatkuva, ei-metallinen ja kiteinen, kuten tiilissä, viskokimmoisuutta ei esiinny, vaikka rungon välitilat olisivat veden täyttämät. Jos kimmoisen aineosan muo-

doštama runko ei ole jatkuva, niin sen osat voivat liukua toisiinsa nähden kuormituksen aikana. Tällöin osa liikettä vastustavasta voimasta koostuu osien välisestä kitkasta.

Esimerkkinä yhdistetyn aineen virumisesta voidaan tarkastella betonin virumista. Kimmoinen, mutta epäjatkuva runko muodostuu kiviaineksesta. Kovettunut sementtikivi on viskokimmoinen aineosa, jonka viskoosisuus riippuu sen tiiveydestä, sen sisältämästä vesimäärästä ja hydratoitumattoman sementin määrästä eli sementtikiven kovettumisasteesta. Täysin hydratoitunut sementtikivi koostuu neulas- ja levymäisistä tobermoriittikiteistä ja niiden välisissä tiloissa sijaitsevasta vedestä. Sementtikiveä kuormitettaessa tobermoriittikiteet taipuvat ja kiertyvät ja liukuvat toisiinsa nähden niiden välisen veden toimiessa kitkaa alentavana voiteluaineena. Jos vettä ei ole, kiteiden väliset vetovoimat lukitsevat kiteet paikoilleen eikä virumista tapahdu.

Hydratoitumaton ja veteen liukenematon sementti ei keraamisena aineena osallistu virumiseen. Sementtihiukkasen pintaosan liuetessa veteen sementtihiukkasen siihen asti kantama kuormitus siirtyy muille aineosille ja syntyy pieni muodonmuutos. Veteen liuennut sementti muodostaa veden kanssa viskoosin, virumista edistävän aineosan, joka kulkeutuu sementtikiven sisällä kohtaan, jossa jännitys on pieni ja kovettuu sinne.

Sementtikiven viruessa kuormitus siirtyy kiviainesrakeiden kannettavaksi, kuten mittauksin on todettu. Kun kuormitus poistetaan kiviainesrakeet pyrkivät jännityksettömään tilaan ja "venyttävät" täten kokoonpuristunutta sementtikiveä. Edellisen perusteella voidaan päätellä, että betoniin jäävä pysyvä muodonmuutos on sitä suurempi, mitä alhaisempi betonin kovettumisaste on kuormitushetkellä [12].

Toisaalta sementtikivi viruessaan tasoittaa jännityshiippujaan kiviainesten ympärillä, jonka vuoksi betonin lujuus kasvaa kohtuullisessa pitkäaikaiskuormituksessa enemmän kuin pelkkä hydrataatio edellyttää.

Edelleen voidaan päätellä, että täysin kuiva betoni ei viru mainittavasti puristuskuormituksessa veden muodostamien liikemahdollisuuksien puuttuessa. Jos betonin kiviainesrakeet ovat suorassa kosketuksessa toisiinsa, puristetun betonin viruminen voi aiheutua vain kiviaineksen keskinäisen liukumisen ja samanaikaisen betonin poikittaisen laajenemisen ansiosta.

Erityisesti vedetyn betonin virumiseen vaikuttavat myös betonin mikrohalkeamat, joita muodostuu betonin kovettuessa kiviaineksen ja sementtikiven väliseen rajapintaan. Mikrohalkeamien kasvu kuormituksen vaikutuksesta aiheuttaa betonin tilavuuden kasvua ja lisää pysyviä muodonmuutoksia.

Toisena esimerkkinä tarkastellaan puun virumista. Puuta voidaan pitää yhdistettynä aineena, joka koostuu kiteisestä, putkimaisia kuituja tai kennoja muodostavasta selluloosasta, viskoosista ligniinistä sekä puun soluihin ja putkistoihin imeytyneestä vedestä.

Kuormituksen ollessa syiden suuntainen vetoviruminen tapahtuu kuormaa kantavien selluloosakuitujen keskinäisenä liukumisena ja kuorman siirtymisenä ligniiniltä selluloosakuiduille. Kuormituksen ollessa syihin nähden poikittaista puristusta virumisen mekanismi on osaksi sama kuin edellä, mutta lisäksi esiintyy kennomaisten solujen "litistymistä". Veden vaikutusta käsitellään seuraavassa luvussa.

5. KOSTEUDEN VAIKUTUS VIRUMISEEN

Rakennusaineen sisältämälää vedellä on seuraavat neljä eri

vaikutusta virumiseen:

- veden imeytyminen tai poistuminen rakennusaineesta aiheuttaa siinä tilavuuden laajenemista tai pienenemistä, joka summautuu ulkoisen kuormituksen aiheuttamiin tilavuuden- ja muodonmuutoksiin. Jos kosteudenmuutos ja kuormitus aiheuttavat samansuuntaisen tilavuudenmuutoksen, ne vahvistavat toisiaan ja jos eri suuren, ne jarruttavat toisiaan. Vahvistustapauksessa resultoiva muodonmuutos on aina suurempi kuin yksinään tapahtuvien muodonmuutosten summa
- aineosasten välissä sijaitsevat vesikerrokset loitontavat osasia toisistaan, jolloin niiden väliset sidosvoimat pienenevät ja osat liikkuvat helpommin toisiinsa nähden vesikerroksen vastustaessa tätä liikettä viskoosina aineena
- rakennusaineen kosteuden muuttuessa vesi liikkuu aineen sisällä. Jos aineessa on vetysidoksia esim. molekyyliketjujen välillä, niin tämä veden siirtyminen saattaa siirtää myös vetysidosten paikkoja, jolloin molekyyliketjut voivat helpommin liukua toisiinsa nähden ja virumismuodonmuutos kasvaa kosteudenvaihteluiden johdosta
- vesi saattaa osallistua kuormien kantamiseen hydrostaattisen paineen avulla, kuten maalajien huokosvedenpaine tai tuoreen puun soluissa syntyvä solunesteen paine. Tällöin vesi virtaa pienemmän paineen suuntaan ja aiheuttaa täten virumismuodonmuutoksen.

Tarkasteltaessa veden vaikutusta virumisen nopeuteen, joudutaan tutkimaan veden siirtymismahdollisuuksia aineen sisällä. Jos aineessa on riittävän suuria "reikiä" ja huokosia, vesi voi kulkea niitä pitkin kapillaarisesti, jolloin veden liike voi olla hyvinkin nopea veden diffuusioon verrattuna. Diffuusiolla tarkoitetaan veden yksittäisten molekyylien siirtymistä aineosien väliin ja kapillaarisella imeytymisellä veden imeytymistä nesteenä pintajännityksen ja

adheesio-avulla.

Diffuusionopeuteen vaikuttavista tekijöistä saadaan likimääräinen kuva tarkastelemalla diffuusiota kiinteän aineen sisään diffundoituvan aineen konsentraation pysyessä vakiona lähtöalueella ja vastaanottavan kappaleen ollessa puoliäärettömän. Silloin saadaan diffundoituneen aineen pitoisuudelle C_x kaava [23].

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3)$$

jossa t = aika

C_x = diffundoituvan aineen pitoisuus pisteessä x

C_s = " " " " lähtöalueella

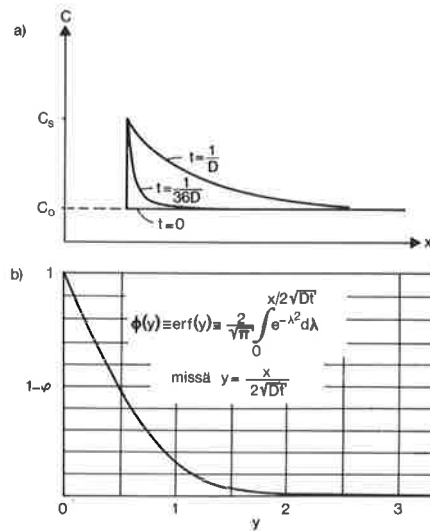
C_0 = " " " " äärettömän

kaukana sen aineen sisällä, johon diffuusio tapahtuu

(kuva 6)

D = diffusiokerroin (tässä tapauksessa vesihöyryn johtavuus)

erf = Gaussin virhefunktio (kuva 6 b)



Kuva 6. a) Kaavassa (3) käytetyt merkinnät.
b) Gaussin virhefunktio.

Jos kaavaan (3) sijoitetaan $x:n$ tilalle rakenteen paksuuden puolikas saadaan ensimmäinen likiarvo diffuusiolle aineen sisästä ulkopintaan. Kysymyksessä on likiarvo, koska diffuusion tapahtuessa aineen sisältämän diffundoituvan aineen pitoisuus laskee ja samalla diffuusionopeus laskee.

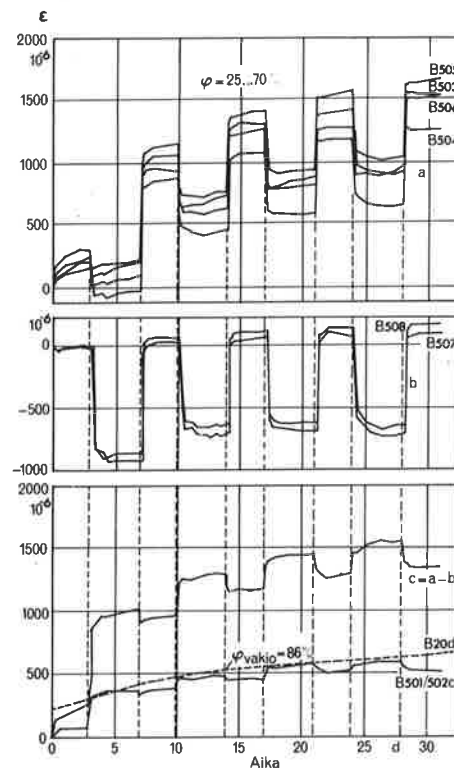
Virhefunktion muodon perusteella on selvää, että kappaleen paksuudella on huomattava vaikutus diffuusion etenemiseen ja sen vuoksi myös kosteudenmuutoksen aiheuttamaan tilavuudenmuutokseen ja virumiseen. Tämä seikka on otettu huomioon mm. betonin virumisen arvioinnissa.

Veden ei aina tarvitse siirtyä virumisen aikana aineesta ulos, vaan huokosissa aineissa kuten betoni ja kevytsorabetoni vesi voi siirtyä eniten kuormitetuista kohdista myös tyhjiin huokosiin ja kevytsorarakkeisiin, jolloin veden siirtymismatka on lyhyt ja viruminen nopeampaa. Tämän vuoksi puristettu betoni viruu nopeammin kuivuessaan kuin vesisäilytyksessä, koska suurimmat kapillaarihuokokset tyhjenevät nopeasti betonin kuivuessa lyhentäen täten diffundoituvan veden siirtymismatkaa. Mitä huokoisempaa betoni on, sen nopeampaa viruminen. Koska huokoisuus alentaa betonin lujuutta, niin samaa kuormituslujuussuhdetta käytettäessä huokoisemman betonin kuormitus on pienempi kuin tiiviimmän, jonka vuoksi päädytään siihen yllättävään lopputulokseen, että tiiviimmän ja löyhemmän betonin suhteellinen viruminen (ns. hiipumaluku) ovat samaa suuruusluokkaa samaa kuormitusastetta käytettäessä.

Puuhun nähden tilanne on toinen. Veden kulkiessa syihin nähden kohtisuoraan, se etenee diffundoitumalla ja sen vuoksi hitaasti. Veden imeytyessä puihin syiden suuntaan veden kulku on kapillaarista, koska syiden suunnassa puussa on ne putkistot, jotka huolehtivat nes-

teiden kulkemisesta puun kasvaessa. Tämän vuoksi puun kostuminen ei ole niin koosta riippuvaa kuin betonin, koska kapillaarinen veden imeytyminen on useimmiten mahdollista.

Kosteudenmuutosten suurta vaikutusta puun virumiseen havainnollistaa kuva 7, jossa on esitetty syiden suuntaan vedetyn puun viruminen kosteutta jaksottaisesti muutettaessa. Puun kostuminen aiheuttaa selvää virumismuodonmuutoksen kasvua, joka ei palaudu puun jälleen kuivussa. Ilmiötä on selitetty selluloosakuitujen välisten vetysidosten siirtymisellä kosteudenmuutosten aiheuttamien veden siirtymisten mukana.



Kuva 7. Puun viruminen syiden suuntaisessa vedossa kosteuden vaihdellessa 25-70 % välillä.

Käyrät a = koko venymä

" b = kost. muutosten aiheuttama venymä

" c = virumiskäyrä

Puun virumiseen kosteudenvaihtelujen alaisena liittyy sellainen mielenkiintoinen ilmiö, että puun viruessa kosteudenvaihtelujen alaisena virumisen aikana syntynyt muodonmuutos jää pysyväksi, jos kuormitus poistetaan puun ollessa kuivan. Jos puu sen jälkeen kostuu tai joutuu kosteuden vaihtelujen alaiseksi, se pyrkii kohti alkuperäistä muotoaan ja syntynyt virumismuodonmuutos häviää vähitellen. Sama ilmiö on tunnettu paperinvalmistuksessa, jossa paperi prässätään suoraksi ja kuivataan, jolloin sen muoto säilyy, mutta, jos paperi kostuu, se hakeutuu kohti alkuperäistä muotoaan ja "kärpistelee".

6. LÄMPÖTILAN VAIKUTUS VIRUMISEEN

Lämpötilan vaikutusta virumisnopeuteen ja muihin fysikaalis-kemiallisiin prosesseihin voidaan kuvata Arrheniuksen yhtälöllä

$$\varepsilon = k_1 e^{-\frac{k_2}{T}} \quad (4)$$

jossa k_1 ja k_2 ovat vakioita

T = lämpötila kelvineissä.

Arrheniuksen yhtälön merkitystä voidaan havainnollistaa toteamalla, että se ilmaisee matemaattisesti säännön: "Kemiallisen prosessin nopeus nousee kaksinkertaiseksi lämpötilan noustessa 10 astetta". Tämä lämpötilan vaikutus on johdettavissa suoraan molekyylien lämpöliikkeestä, ns. Brownin liikkeestä, tilastollisen mekaniikan keinoin.

Yhtälö (4) on voimassa, jos aineessa ei tapahdu rakennemuutok-

sia lämpötilanmuutosten tai kuormituksen johdosta, eikä tapahdu aineenvaihtoa rakenteen ja ympäristön välillä. Sovellettaessa yhtälöä (4) viskokimmoisen aineen viskoosiin osaan saadaan esimerkiksi

$$\sigma = v \cdot \dot{\epsilon} = \eta_0 \cdot e^{-\frac{k_2}{T}} \dot{\epsilon} \quad (5)$$

Lämpötilan nousun alentaessa viskoosin osan viskositeettia viruminen on nopeampaa, jonka vuoksi korotettua lämpötilaa käytetään lyhentämään virumiskokeiden suorittamiseen tarvittavaa aikaa. Ylä- ja alarajan käytettävälle koelämpötilalle asettavat ne lämpötilat, joissa aineessa alkaa tapahtua rakennemuutoksia. Tätä aika-lämpötila superpositioperiaatetta on selostettu tarkemmin viitteessä /8/.

Lämpötilan vaikutus diffuusiiovirumiseen voidaan ottaa huomioon muuttamalla diffuusiokerrointa lämpötilan funktiona Arrheniuksen yhtälön mukaisesti

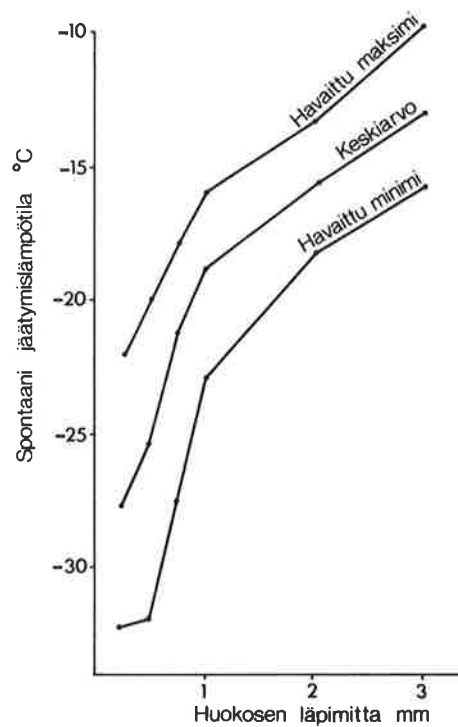
$$D = D_0 e^{-\frac{k_3}{T}} \quad (6)$$

Yhtälöllä (6) on vain rajoitettu pätevyysalue silloin, kun virumiseen yhdistyy aineen kuivuminen, jolloin diffundoituvan aineen määrä laskee kuivumisen yhdistyessä.

Edellisen perusteella lämpötilan lasku hidastaa virumista siksi, kun aineen rakenne alkaa muuttua jonkin muutoslämpötilan saavuttamisen johdosta. Rakennusaineiden virumisen kannalta on olemassa kaksi merkittävää alempaa lämpötilaa:

- muovien kohdalla mainittu pehmenemislämpötila, jonka alapuolella virumisnopeus laskee olennaisesti

- rakennusaineen sisältämän veden jäätymislämpötila, joka vaihtelee rakennusaineen huokoskoon vaihteluiden mukaan (kuva 8). Kuva 8 tarkasteltaessa on huomattava, että siinä on esitetty puhtaan veden jäätyminen lasin muodostamisessa huokosissa. Jos vettä ympäröivä aine on jokin muu tai vedessä on joitakin liuenneita aineita, lämpötilojen lukuarvot muuttuvat, vaikka periaate "mitä pienempi huokonen, sitä alempi jäätymislämpötila" säilyykin.



Kuva 8. Veden spontaani jäätymispiste kapillaarihuokosen läpimitan funktiona [4].

Rakennusaineen sisältämän veden jäätyessä aikaisemmin kiinteään aineeseen ja nesteeseen muodostama yhdistetty aine muuttuu kiinteään aineeseen ja kiteisen jään seokseksi, jonka virumisominaisuudet riippu-

vat jään virumisesta, joka on niin vähäistä huokosissa aineissa, että virumisnopeus laskee olennaisesti. Betonin virumisen voidaan otaksua pysähtyvän kokonaan. Ulkona olevissa suurissa teräsbetonirakenteissa suoritettut mittaukset tukevat otaksumaa.

Jään sulaessa lämpötilan noustessa sulamisprosessin aikana tapahtuu veden siirtymistä, joka nopeuttaa virumista. Mittauksissa onkin todettu teräsbetonirakenteiden virumisen olevan nopeinta keväällä. Myös rakenteen kuivuminen keväällä on puristettujen rakenteiden virumista nopeuttava tekijä.

7. VIRUMINEN AJAN FUNKTIONA

Virumisen riippuvuutta ajasta tarvitaan ennustettaessa rakenteen käyttäytymistä myöhempinä ajankohtina. Tavallisesti pyritään määrittämään taipuma tiettyinä ajankohtana esim. 50 vuoden kuluttua tai laskemaan muodonmuutos ajan funktiona määritettäessä esim. jännitetyn betonirakenteen jännitystilaa.

Koska viruminen voi tapahtua monen eri mekanismin yhteisvaikutuksesta ja koska ympäristöolosuhteet, lämpötila ja kosteus, vaikuttavat siihen voimakkaasti, on ymmärrettävää, että eräitä poikkeuksia lukuunottamatta yleensä ei ole kyetty kehittämään virumisen mekanismiin perustuvia virumis-aika-funktioita, vaan on tyydytty etsimään koetuloksia mahdollisimman hyvin kuvaavia matemaattisia lausekkeita. Tavallisimmat näistä ovat potenssifunktioita, eksponenttifunktioita tai niiden summia. Esim. puupalkkien virumisen kuvaamiseen on käytetty yhtälöä [14]

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot k_1 t^{k_2} \quad (7)$$

jossa vakioilla on arvot

$$k_1 = 1.3$$

$$k_2 = 0.3$$

$$E_0 = \text{puun kimmokerroin lyhytaikaiskuormituksessa}$$

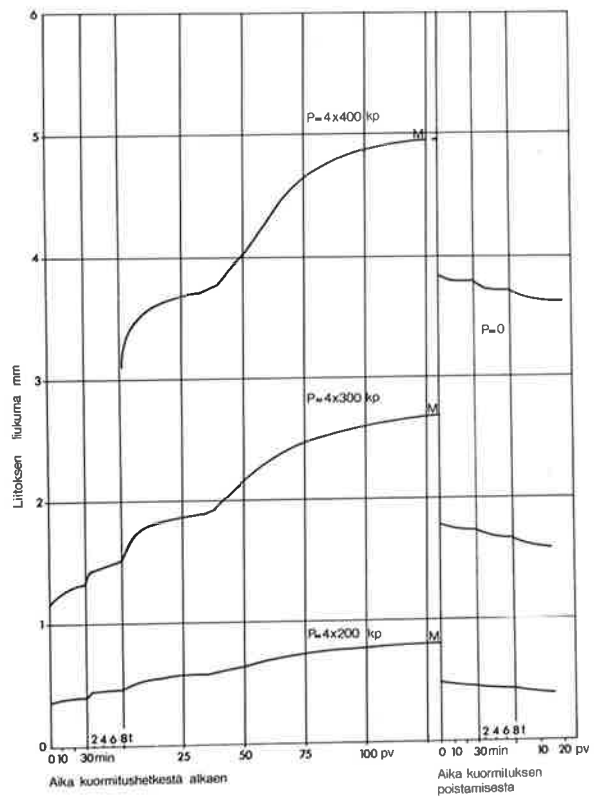
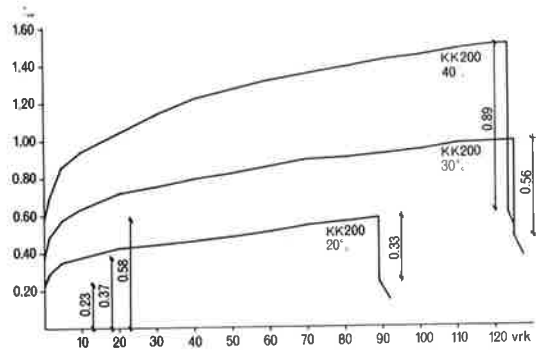
Yhtälön (7) mukaan puupalkin taipuma kasvaa 1 vuoden kuluttua 1.3-kertaiseksi, 10 vuoden kuluttua 2.5-kertaiseksi ja 5-kertaiseksi 100 vuoden kuluttua. k_2 :lla on aina 1:tä pienempi arvo, jolloin (7) esittää juuri lauseketta, jonka mukaan ϵ kasvaa ajan mukana hidastuvalla nopeudella äärettömäksi. Eksponenttifunktiota käytetään betonille muodossa

$$\epsilon = k_3 \cdot \sigma \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \quad (8)$$

tai muodossa

$$\epsilon = k_4 \cdot \sigma \left[1 - e^{-k_5 \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right)} \right] \quad (9)$$

Virumisen lisäksi tarvitaan rakenteiden suunnittelussa myös tiedot rakenteen muodonmuutoksen palautumisesta kuormituksen poistamisen tai vähentämisen jälkeen. Palautuvan muodonmuutoksen riippuvuus ajasta on yleensä samanmuotoinen kuin virumismuodonmuutoksenkin. Palautuvan muodon muutoksen suhteellinen suuruus riippuu virumisen mikromekanismista ts. virumisen aikana tapahtuvista rakennemuutoksista. Kuvassa 9 on esitetty esimerkkejä eri aineiden palautuvista muodon muutoksista.



Kuva 9 a) KeyytSORabetonin muodonmuutoksen palautumisen kuormituksen poistamisen jälkeen.
 b) Naulaliitoksen palautuva muodonmuutos.

Kuvassa 9 kiinnittää huomiota se, että kevytsorabetonissa heti kuorman poistamisen jälkeen tapahtuva kimmainen muodonmuutos on noin 1.5-kertainen verrattuna kuormituksen alkuhetkellä syntyneeseen kimmoiseseen muodonmuutokseen. Tavallisen betonin kimmainen muodonmuutos on pitkäaikaiskuormitusta poistettaessa lujuuden- ja kimmokertoimen kasvun verran pienempi kuin kuormitettaessa tapahtuva muodonmuutos. Kevytsorabetonin kimmokertoimen aleneminen saattaa aiheutua kevytsorakeiden rikkoutumisesta betonin viruessa ja puristuessa kokoon. Maulaliitoksen kohdalla palautuva kimmainen muodonmuutos on hiukan pienempi kuin muodonmuutos kuormituksen alussa. Hitaasti palautuva muodonmuutos on pienempi kuin virumismuodonmuutos.

Virumisfunktioiden johtamisessa käytetään usein hyväksi ns. reologisia malleja, joiden avulla johdettu virumisyhtälö sovitetaan koetuloksiin mallin parametrien avulla (kts. viitteet [1], [8], [9], [10], [11], [15], [24] ja [25]).

Reologisten mallien etuna voidaan pitää sitä, että on suhteellisen helppoa johtaa tiettyä mallia vastaavat virumis- ja relaksaatiofunktiot. Lisäksi voidaan helposti tutkia esim. kuormitusnopeuden tai kuorman poistamisen vaikutuksia.

8. PITKÄAIKAISLUJUUS

Rakennusaineiden pitkäaikaislujuuden käsitettä ei ole tarkkaan määriteltä ja nykyään sillä tarkoitetaan seuraavia neljää eri asiaa:

- suurinta pitkäaikaista vakiojännitystä, jonka rakennusaine murtumatta kestää. Tämä on aina pienempi kuin lyhytaikaislujuus. Puun ja betonin pitkäaikaislujuudet määritellään usein tällä tavalla ja saadaan 80...90 % lyhytaikaislujuudesta
- sitä lujuutta, joka rakennusaineella on pitkäaikaisen kohtuullisen

- suuruisen vakiokuormituksen jälkeen
- sitä lujuutta, mikä rakennusaineella on pitkän ajan kuluessa tapahtuneiden kuormituksen ja ympäristöolosuhteiden muutosten sekä aineessa itsessään mahdollisesti tapahtuneiden kemiallisten muutosten jälkeen
 - viruminen saattaa aiheuttaa rakenteessa suuria muodonmuutoksia, jotka johtuvat jännitysten kasvuun ja lopulta murtumiseen. Esim. hoikka epäkeskisesti puristettu pilari.

Lisäksi tulisi veto- ja puristuslujuus erottaa toisistaan, koska pitkäaikainen vetokuormitus alentaa melkein kaikkien rakennusaineiden lujuutta, mutta kohtuullinen pitkäaikainen puristuskuormitus saattaa jopa lisätä lujuutta esim. eräät maalajit ja normaalibetoni. Pitkäaikaisen vedon lujuutta alentava vaikutus johtuen usein nopeutuneesta korroosiosta, koska vieraat, korroosiota aiheuttavat aineet voivat tunkeutua helpommin "toisistaan eroon venytettyjen" rakenteen atomien väliin ja osaksi mikrohalkeamista, joiden muodostumiselle vetokuormitus on suotuisampi kuin puristus.

Ensimmäisen ranskalaisen viivan kohdalla mainittu lujuuden aleneminen johtuu aineen epähomogeenisuudesta ja siitä, että murtumiseen liittyvän työn suorittamiseen tarvitaan aina aikaa. Kuormitettaessa murtuvat ensin heikoimmat osat ja sen jälkeen lujemmat. Kuormituksen ollessa pitkäaikainen, alhaisempi kuormitustaso riittää aiheuttamaan heikoimpien osien murtumisen.

Toisen ranskalaisen viivan kohdalla mainittu pitkäaikaislujuus saattaa olla suurempi tai pienempi kuin lyhytaikaislujuus riippuen siitä, lujittavatko vai heikentävätkö virumisen aiheuttamat rakennemuutokset ainetta.

Kolmannessa kohdassa on kysymys kuormitus- ja ympäristöolosuhteiden vaihteluiden yhteisvaikutuksesta, joka saattaa silloin tällöin

johtaa pieniin paikallisiin vaurioihin rakennusaineessa. Kun näitä vaurioita kertyy tarpeeksi ajan kuluessa, rakenne murtuu jo kohtalaisen kuormituksen vaikutuksesta.

Ympäristön kosteuden aleneminen on yleensä vaarallisempaa kuin kostuminen johtuen seuraavista syistä:

- estetty tai vaikeutettu kutistuminen aiheuttaa rakenteeseen vetojännityksiä ja vetolujuus on useimmiten pienempi kuin puristuslujuus
- rakennusaineen kimmokerroin kasvaa aineen kuivuessa, jolloin syntyvät jännitykset suurenevät
- kuivumista edeltävä kostuminen ja tilavuuden laajeneminen työntää rakennusosan kiinnikkeet usein kauemmas toisistaan, jonka vuoksi kutistumisen aiheuttama vetojännitys kasvaa
- aineen kyky pienentää jännityksiä relaksaation avulla alenee aineen kuivuessa
- rakennusaineen sisältämä vesi tai muu neste voi suljetuissa huokosissa ottaa vastaan enemmän puristusjännitystä kuin vetoa
- pitkäaikainen veto saattaa johtaa lujuutta alentavien mikrohalkeamien muodostumiseen.

Neljännessä kohdassa on kysymyksessä osaksi rakenteen geometriset ominaisuudet ja osaksi rakennusaineen virumisnopeus ja virumisen suuruus. Rakenneosien lujuutta määritettäessä olisi pitkäaikaiskuormituksen vaikutus itse rakennusaineen lujuuteen otettava huomioon.

Rakennusaineiden pitkäaikaislujuuden kohdalla voidaan todeta, että tällä hetkellä puuttuvat jopa tärkeimpien rakennusaineiden kuten puun ja betonin pitkäaikaislujuuden määritelmät ja pitkäaikaislujuuden standardoidut koetustavat, jonka vuoksi esim. ao. normien laatiminen on vaikeaa ja käytäntö epäyhtenäinen. Edelleen puuttuu kokonaan esim. ympäristöolosuhteiden vaihtelun vaikutuksen standardoidut koe-

tusmenetelmät, jotka esim. rakennuksen ulkokuoreen tai siltoihin käytettävien rakennusaineiden kohdalla ovat ehdottoman tarpeelliset.

9. LOPPUPÄÄTELMÄT

Edellä esitetyn perusteella voidaan tehdä seuraavat loppupäätelmät:

1. Useimpien rakennusaineiden virumisen mekanismi on monimutkainen, mutta riippuu aineen rakenteesta, johon on "kirjoitettuna" kaikki aineen ominaisuudet, joten tutkimalla aineen rakenne lyhyt-aikaiskokeissa voitaisiin periaatteessa hankkia pitkäaikaiskäyttäytymisen ennustamisessa tarvittava lähdeaineisto.
2. Ilman virumismekanismien tutkimista rakennusaineen käyttäytymistä pitkäaikaiskuormituksissa ei voida luotettavasti selvittää.
3. Aineen viruminen vetokokeessa saattaa poiketa paljon sen virumisesta puristuskokeessa, jonka vuoksi olisi aina tehtävä veto-, puristus- ja leikkausvirumiskokeita samalla materiaalilla. Leikkausvirumis- eli muodonvääristymisvirumiskokeet voitaisiin tehdä esim. ohutseinäisen ympyräputken vääntökokeina.
4. Virumismekanismien tutkimista häiritsevät usein virumiskokeen aikana tapahtuvat kemialliset muutokset tai aineenvaihto koekappaleen ja sen ympäristön välillä. Nämä haitat ovat vähäisemmät dynaamisissa kokeissa, joissa mm. värähtelyn vaimenemisen avulla mitataan virumisfunktion vakioita.
5. Virumis- ja relaksaatiokokeissa olisi muodonmuutosten lisäksi mitattava aina painon- ja tilavuudenmuutokset.
6. Virumiskokeiden yhteydessä tulisi aina tutkia kuormituksen poistamisen vaikutusta, koska se saattaa paljastaa jotain virumisen mekanismista.

7. Kuormitusvaihteluiden lisäksi aina kannattaisi tutkia ympäristöolosuhteiden vaihteluiden vaikutusta.
8. Rakennusaineiden pitkäaikaislujuuden käsite tulisi määrittellä ja standardoida sen määrittämiskokeet.
9. Rakennusuunnittelijan tulisi ottaa huomioon, että vain teräs ja tiili eivät sanottavasti viru normaalilämpötiloissa.
10. Rakennesuunnittelijan tulisi ottaa huomioon, että kosteuden ja lämpötilanmuutosten aiheuttamat muodonmuutokset ja vaikutus kuormituksen aiheuttamiin muodonmuutoksiin ovat usein suuremmat kuin lyhytaikaiskuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset ja vaatia rakennusaineiden ja -tarvikkeiden valmistajia suorittamaan asian selvittämiseksi tarvittavat tutkimukset.

KIRJALLISUUTTA

- 1 Cederwall, Kr. Time-dependent behaviour of reinforced concrete structures. National Swedish Building Research Document D3: 1971.
- 2 Dintenfass, L., Thixotropy in Complex Suspensions and the Thixotropic Recovery Time. Proceedings of the fifth international Congress on Rheology Volume 2 University of Tokio Press 1970 ss. 281...293.
- 3 Eimer, C., Rheological Approach to Problems of Cumulative Damage and Strength. Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des sciences techniques, Volume XX No 3 1972 ss. 255...261.
- 4 Eirich, Fr. (toim.) Rheology. Vol. 3. Luku 7. Weyl ja Ormsby: Atomistic Approach to the Rheology of sand-water and of clay-water mixtures. Academic Press, New York 1960 ja Vol. 4. Luku 8. Bauer ja Collins: Thixotropy and Dilatancy. ss. 423...459. Academic Press London 1967.
- 5 Eriksson, L. ja Noren, B., Der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 23 (1965) ss. 201...209.

- 6 Freudenthal, A., The Inelastic Behavior of Engineering Materials and Structures. John Wiley and Sons. New York 1950.
- 7 Hummel, Wesche, Brand: Der Einfluss der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungalters auf das Kriechen von Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 146. Berlin 1962 ss. 1...18.
- 8 Jumppanen, P. ja Mäkeläinen, P., Aika-lämpötilasuperpositio-periaatteen soveltuminen muovien käyttäytymiseen. Rakenteiden Mekaniikka 1974 No. 3. ss. 128...156.
- 9 Kanerva, P., Epälineaarinen hiipumateoria. Diplomityö Htkk 1963.
- 10 Kokki, P., Vertaileva tutkimus tavallisen ja kevytsorabetonin hiipumasta. Diplomityö Htkk 1975.
- 11 Koronnyi, V.A., Ueber die irreversible Kriechverformung des Betons. Rakenteiden Mekaniikka 1972 No 2. ss. 94...105.
- 12 Neville, Staunton, Bonn: A Study of the Relation Between Creep and the Gain of Strength. Highway Research Board: Special Report 90. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Washington 1966. ss. 186...203.
- 13 Nielsen, A., Rheology of building materials. National Swedish Building Research Document D6:1972.
- 14 Nielsen, Eriksson, Gustavson: Långtidsdeformationer i träbjälklag. Byggmästaren 8 1970. ss. 17...20.
- 15 Noren, B., Nailed joints-Their Strength and Rigidity under Short-Term and Long-Term Loading. Svenska Träforskningsinstitutet, Träteknik Meddelande 158 B, Stockholm 1968.
- 16 Pilleo, R., The Origin of Strength of concrete. Highway Research Board. Special Report 90. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Washington 1966. ss. 175...185.
- 17 Reh binder, P., On the Rheology of Thixotropically Structurized Disperse Systems. Proceedings of the fifth international Congress on Rheology, Vol. 2 University of Tokio Press 1970. ss. 375...385.
- 18 Ruesch, Kordina, Hilsdorf: Der Einfluss des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 146. Berlin 1962. ss. 19...32.
- 19 Soboyejo, A.B.O., Evaluation of Structural Creep Reliability using Entropy Principles. Materials Science and Engineering 12 (1973) ss. 101...109.
- 20 Umeya, K., On the dilatant Behavior of Some Suspensions. Proceedings of the fifth Congress on Rheology, Vol. 2 University of Tokio Press 1970. ss. 295..308.

- 21 Wagner, O., Das Kriechen unbewehrten Betons. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 131. Berlin 1958.
- 22 Wooldford, D.A., A Graphical Optimization Procedure for Time-Temperature Rupture Parameters. Materials Science and Engineering 15 (1974) ss. 169...175.
- 23 Wulff, J., et.al. The Structure and Properties of Materials Vol. 1 Structure. Vol. 2 Thermodynamics of Structure Vol. 3 Mechanical Behavior. John Wiley & Sons. New York 1964.
- 24 Ylinen, A., Zur Theorie der Dauerstandfestigkeit des Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 15 (1957) ss. 213...215.
- 25 Ylinen, A., Über den Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchfestigkeit des Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 17 (1959) ss. 231...234.

Pekka Kanerva, apul.prof., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi