

Fedés nélkül készített rövid üvegszál- erősített kompozit direkt restaurációk in vitro vizsgálata.

az azonos című PhD tézis értekezései

Dr. Jakab András Gábor

Témavezető:

Dr. habil. Márk Fráter PhD, M.Sc.



Szegedi Tudományegyetem

Klinikai Orvostudományi Doktori Iskola

Szeged

2025

A tézis alapjául szolgáló publikációk:

Tarjányi, T.; **Jakab, A.G.**; Sámi, M.; Bali, K.; Rárosi, F.; Jarábik, M.L.; Braunitzer, G.; Palkovics, D.; Lassila, L.; Lempel, E.; et al. The Nanomechanical Performance and Water Uptake of a Flowable Short Fiber Composite: The Influence of Bulk and Layering Restorative Techniques. *Polymers* 2025, 17, 1553, doi:10.3390/polym17111553. (Q1)

Jakab, A.G.; Néma, V.; Molnár, J.; Alföldi, A.; Braunitzer, G.; Palkovics, D.; Lassila, L.; Garoushi, S.; Lempel, E.; Fráter, M. Crack Propensity of Different Fiber-Reinforced Direct Restorative Procedures in Deep MOD Cavities. *Dental Materials* 2025, S0109564125006669, doi:10.1016/j.dental.2025.06.010. (Q1, D1)

Jakab, A.G.; Palkovics, D.; T. Szabó, V.; Szabó, B.; Vincze-Bandi, E.; Braunitzer, G.; Lassila, L.; Vallittu, P.; Garoushi, S.; Fráter, M. Mechanical Performance of Extensive Restorations Made with Short Fiber-Reinforced Composites without Coverage: A Systematic Review of In Vitro Studies. *Polymers* 2024, 16, 590, doi:10.3390/polym16050590. (Q1)

Kapcsolódó publikációk:

Fráter, M.; Grosz, J.; **Jakab, A.**; Braunitzer, G.; Tarjányi, T.; Gulyás, G.; Bali, K.; Villa-Machado, P.A.; Garoushi, S.; Forster, A. Evaluation of Microhardness of Short Fiber-Reinforced Composites inside the Root Canal after Different Light Curing Methods – An in Vitro Study. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 2024, 150, 106324, doi:10.1016/j.jmbbm.2023.106324.

Volom, A.; Vincze-Bandi, E.; Sárý, T.; Alleman, D.; Forster, A.; **Jakab, A.**; Braunitzer, G.; Garoushi, S.; Fráter, M. Fatigue Performance of Endodontically Treated Molars Reinforced with Different Fiber Systems. Clin Oral Invest 2023, 27, 3211–3220, doi:10.1007/s00784-023-04934-2.

Rövidítések jegyzéke:

- RBC: rezin bázisú kompozit
- PFC: szemcse töltőanyagú kompozit
- MOD: mezio-okkluzo-disztális
- SFRC: rövid üvegszál-erősített kompozit
- ANOVA: varianciaanalízis

1. Bevezetés

A helyreállító fogászat egyik elsődleges célja a kemény fogszövetek pótlása, amellyel a fogak funkciója és esztétikája is visszaállítható. Erre leggyakrabban fogszuvasodás vagy traumás fogsérülés miatt van szükség, de a fogszövetek vesztesége erózió, abrázió, attríció vagy abfrakció következtében is kezelést igényelhet. Az elmúlt években a helyreállító kezelések iránti igényt a páciensek egyre magasabb esztétikai elvárásai is növelték, ugyanakkor a restaurációk elsődleges oka továbbra is a fogszuvasodás miatt elveszített fogszövet pótlása. Napjainkban a rezin bázisú kompozitok (RBC) a legelterjedtebb direkt restaurációs anyagok, amelyek felváltották az amalgámot az előnyös esztétikai megjelenésüknek és annak köszönhetően, hogy konzervatív üregelőkészítést tesznek lehetővé. Népszerűségük ellenére a hagyományos szemcse töltőanyagú kompozitoknak (PFC) van néhány limitációjuk, mint a törékenyséjük, polimerizációs zsugorodásuk és viszonylag alacsony töréssel szembeni szívóosságuk, különösen a dentinhez képest. Ezek a hiányosságok különösen nagy kiterjedésű restaurációk

esetén jelentősek, például mély mezio-okkluzo-disztális (MOD) kavitások helyreállításakor, ahol a nagy rágóerők és a minimális megmaradt fogszövet fokozzák a sikertelenség kockázatát. Ezeknek a kihívásoknak a megoldására fejlesztették ki a rövid üvegszál-erősített kompozit (SFRC) anyagokat. Ezek az anyagok rövid üvegszálakat tartalmaznak, amelyek növelik a töréssel szembeni szívósságot, és ellenállóbbá teszik az anyagot a repedések terjedésével szemben. Az EverX Posterior (GC Europe) és ennek folyékony változata, az EverX Flow (GC Europe) olyan SFRC anyagok, amelyeket kifejezetten nagy igénybevételnek kitett területeken, a dentin pótlására fejlesztettek ki. Az EverX Flow kombinálja a magas üvegszáltartalmat a könnyű kezelhetőséggel és javított kopásállósággal. Újabb vizsgálatok kimutatták, hogy a folyékony SFRC anyagok jobban teljesítenek hagyományos PFC fedés nélkül, szemben a korábbi ajánlásokkal. Kedvező mechanikai tulajdonságaik és klinikai teljesítményük alapján az SFRC anyagok jelentős előrelépést jelenthetnek a direkt restauratív technikákban, különösen szerkezetileg meggyengült fogak esetében. A dolgozat a folyékony SFRC nanomechanikai viselkedését,

valamint az SFRC restaurátumokkal ellátott fogak repedésképződési hajlamát vizsgálja különböző restaurációs konfigurációkban, értékelve az anyag önálló restaurációs anyagként való alkalmazhatóságát.

2. Anyagok és módszerek

1. Különböző üvegszálerősített direkt restaurációs eljárásokkal ellátott fogak repedésképződési hajlamának vizsgálata mély MOD kavitások esetén

Ez az in vitro vizsgálat 100 ép, orthodonciai okból eltávolított humán alsó bölcsességfog felhasználásával történt. A fogakat hasonló anatómiai méretek alapján válogattuk, majd szobahőmérsékleten 0,9%-os fiziológiás sóoldatban tároltuk. A standardizált II. osztályú MOD kavitásokat (5 mm mélység, 2,5 mm falvastagság) lekerekített végű, párhuzamos gyémántfűrővel készítettük el. A preparációs protokollok korábbi kutatásokon alapultak, és digitális tolómérővel ellenőriztük a falvastagság egyenletességét. A kavitások mindkét approximális felszínre kiterjedtek, egyenletes szélességgel és mélységgel. Az előkészítés után a fogakat transzilluminációval (D-Light Pro, GC Europe, 4,3×

nagyítás) ellenőriztük repedések után kutatva; a zománcrepedést mutató mintákat kizártuk, és másik foggal pótoltuk. Valamennyi kavitás esetében szelektív zománcsavazás történt 37%-os ortofoszforsavval, majd egy egy lépéses, önsavazó adhezívet alkalmaztunk (G-Premio Bond, GC Europe). A mintákat 5 vizsgálati csoportnak megfelelően, különböző restauratív technikával restauráltuk (n=20 / csoport). Az 1. csoport mintáit bulk-fill technikával, EverX Flow (bulk árnyalat) alkalmazásával restauráltuk a dentin anatómiájával megegyezően, 1 mm helyet hagyva okkluzálisan. Ezt követően a restaurátumokat okkluzálisan ugyanezzel az anyaggal (dentin árnyalat) fejeztük be. A 2. csoport esetében egy 0.5 mm vastag folyékony PFC (G-aenial Hiflo, GC Europe) alábélelést végeztünk az okkluzopulpális falon, majd a restaurátumot az 1. csoportban leírtak szerint készítettük el. A 3. csoportban az előző csoportnál leírt alábélelés tartalmazott egy polietilén hálót (Ribbond Ultra, Ribbond THM) is, majd ezt követően az előző csoportokkal megegyezően restauráltuk. A 4. csoport esetében egy hibrid technikát alkalmazva, folyékony és paszta konzisztenciájú SFRC

(EverX Flow és EverX Posterior) kombináltunk, 1 mm helyet hagyva okkluzálisan. A restaurátumokat ezt követően az 1. csoporttal megegyezően restauráltuk. Az 5. csoport (kontroll) fogait hagyományos PFC (G-aenial A'CHORD, GC Europe) tömással láttuk el, ferde rétegzéssel. A restaurátumok elkészülte után azokat finíroztuk, políroztuk, majd az elkészített mintákat fiziológiás sóoldatban tároltuk. A repedésképződést transzilluminációval értékeltük közvetlenül a polimerizáció után, majd egy és öt hét elteltével is. A legalább 2 mm hosszú repedéseket rögzítettük, feltüntetve azok irányát is. Az öt csoportot érintő hipotézisvizsgálatokhoz a többszöri összehasonlítások miatti hibák elkerülése érdekében Bonferroni-korrekciónal módosított szignifikanciaszintet alkalmaztunk ($p < 0,01$). Mivel a normalitás feltétele nem minden esetben teljesült, a csoportok közötti és csoporton belüli különbségek elemzéséhez nem paraméteres tesztek (Kruskal–Wallis- és Friedman-féle varianciaanalízis, ANOVA) használtunk, a konkrét csoportkülönbségeket pedig post hoc páros összehasonlításokkal azonosítottuk ($p < 0,05$).

2. SFRC nanomechanikai tulajdonságainak és vízfelvételének vizsgálata

Ebben a vizsgálatban háromféle RBC anyagot értékeltünk: egy folyékony SFRC anyagot (EverX Flow), egy bulk-fill PFC anyagot (SDR flow+, Dentsply Sirona) és egy hagyományos paszta PFC anyagot (G-aenial Posterior, GC Europe). Mindegyik csoporthoz tizennyolc, standard méretű kompozit mintát készítettünk egy $5 \times 5 \times 5$ mm-es fém sablon segítségével ($n = 18/\text{csoport}$). A mintákat különböző anyagokkal és rétegezési technikákkal állítottuk elő öt vizsgálati csoport szerint. 1. csoport (kontrollcsoport): három egymást követő rétegben alkalmaztunk egy paszta konzisztenciájú, hagyományos PFC (G-aenial Posterior) anyagot, 2 mm, 2 mm és 1 mm vastagságban. A 2. csoportban három egymást követő rétegben ugyanígy egy folyékony SFRC anyagot alkalmaztunk, ugyanúgy, ahogy az 1. csoportban. A 3. csoportban ugyanazt a folyékony SFRC-anyagot egyetlen 5 mm vastag rétegben használtuk (bulk-fill technika). A 4. csoportban egy folyékony bulk-fill PFC anyagot használtunk ugyanolyan módon, mint a 3. csoportban. Az

5. csoportban két egymást követő réteg folyékony SFRC után egy 1 mm vastag paszta konzisztenciájú PFC-réteggel fedtük a restaurátumot. A végső polimerizáció után a mintákat SiC csiszolópapírral políroztuk, majd hígított optikai ragasztóval rozsdamentes acél tartókra rögzítettük. A nanomechanikai felszíni tulajdonságokat Berkovich gyémánthegyű nanoindenterrel (IND-1500, Semilab, Budapest) vizsgáltuk. Összesen 1710 statikus nanoindentálást végeztünk (mintánként 19 méréssel). A benyomatókat a minták felső, oldalsó és alsó felszínén oszlattuk el, hogy értékeljük a homogenitást és a mélységfüggő tulajdonságokat. A kúszásviselkedést csoportonként hat mintán mértük ugyanazzal a készülékkel. Minden mintán 10 kúszásmérést végeztünk 25 mN állandó terheléssel, 300 másodperc időtartamban. Az időfüggő benyomódási adatok értelmezéséhez és a modulus értékek meghatározásához a standard lineáris viszkoelasztikus modellt alkalmaztuk. A vízfelvétel vizsgálatához a mintákat lemértük a tárolás előtt és a 30 napos vízben történő tárolás ideje alatt is. A vízben való öregítést követően megismételtük a statikus és kúszás nanoindentációs méréseket a mechanikai degradáció

értékelésére. A vízfelvételt a tömeg időbeli változásának és a minta térfogatának arányaként számítottuk ki.

Ezen kívül a minták felszíni morfológiáját pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM; Hitachi S-4700) vizsgáltuk. A mintákat arannyal vontuk be, és nagy terhelésű nanoindentációkat készítettünk a benyomódások azonosításának megkönnyítésére. A statisztikai elemzést SPSS v23 szoftverrel végeztük. A normalitást és a varianciahomogenitást Shapiro–Wilk- és Levene-teszttel ellenőriztük. A csoportok közötti különbségeket egyutas ANOVA-val, Bonferroni post hoc tesztel elemeztük ($p < 0,05$). A viszkoelasztikus adatokat legkisebb négyzetes görbeillesztéssel modelleztük.

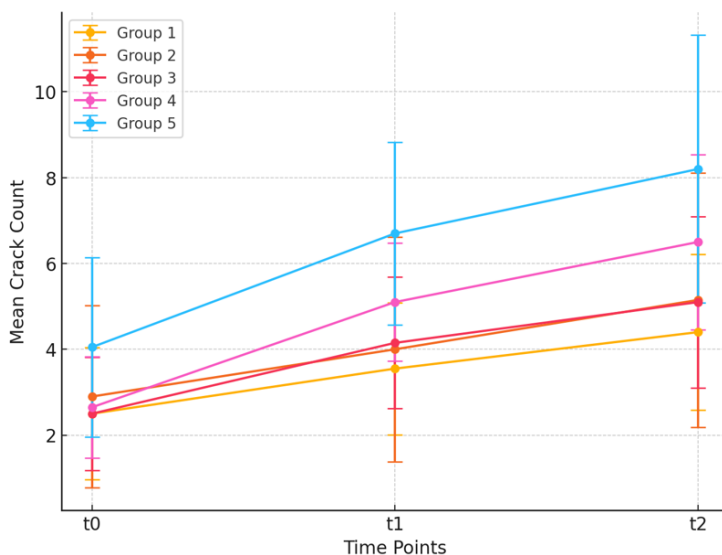
Eredmények

1. Különböző üvegszálerősített direkt restaurációs eljárásokkal ellátott fogak repedésképződési hajlamának vizsgálata mély MOD kavitások esetén

Ez a vizsgálat azt elemezte, hogy a különböző restaurációs eljárások hogyan befolyásolják a repedésképződést szerkezetileg meggyengült fogak esetében. A restaurációt követően egy és öt hét elteltével szignifikáns különbségeket találtunk az összesített, valamint a vertikális és horizontális repedésszámok között a csoportokban ($p < 0,001$). Közvetlenül a restauráció elkészülte után nem mutatkozott jelentős eltérés. Egy héttel a beavatkozás után a kontrollcsoport (5. csoport), amelyet hagyományos, rétegzett PFC-vel állítottunk helyre, mutatta a legtöbb összesített repedést (átlag = 6,7), míg az 1. csoport — amelyet bulk-fill technikával alkalmazott folyékony SFRC-vel restauráltunk — rendelkezett a legkevesebbel (átlag = 3,55) (1. ábra). Az 5. csoportban szignifikánsan több vertikális és horizontális repedés volt, mint a legtöbb másik csoportban ($p < 0,05$). A Dwass–Steel–Critchlow–Fligner post hoc páros

összehasonlítások jelentős különbséget mutattak ki több csoport között a vertikális repedésszám tekintetében: az 5. csoport szignifikánsan magasabb vertikális repedésszámot mutatott az 1., 3. és 4. csoportokhoz képest ($p < 0,005$).

Öt hét elteltével ugyanez a tendencia folytatódott: az 5. csoportban továbbra is szignifikánsan több összesített repedés volt az 1. és a 3. csoporthoz viszonyítva ($p < 0,05$). Emellett az 1. csoportban szignifikánsan kevesebb repedés volt, mint a 4. csoportban ($p < 0,05$). Az 5. és a 2. csoport közötti különbség megközelítette a szignifikanciahatárt. Az 5. csoportban maradt a legmagasabb összesített és vertikális repedésszám, míg az 1. csoport ismét a legalacsonyabb értékeket mutatta. Ebben a fázisban a horizontális repedések száma kisebb mértékben változott a csoportok között. A Friedman-féle ANOVA megerősítette, hogy valamennyi csoportban szignifikáns időfüggő változás történt a repedésszámokban ($p < 0,001$), kivéve a 2. csoport horizontális repedéseit, amelyek az első hét során stabilak maradtak.

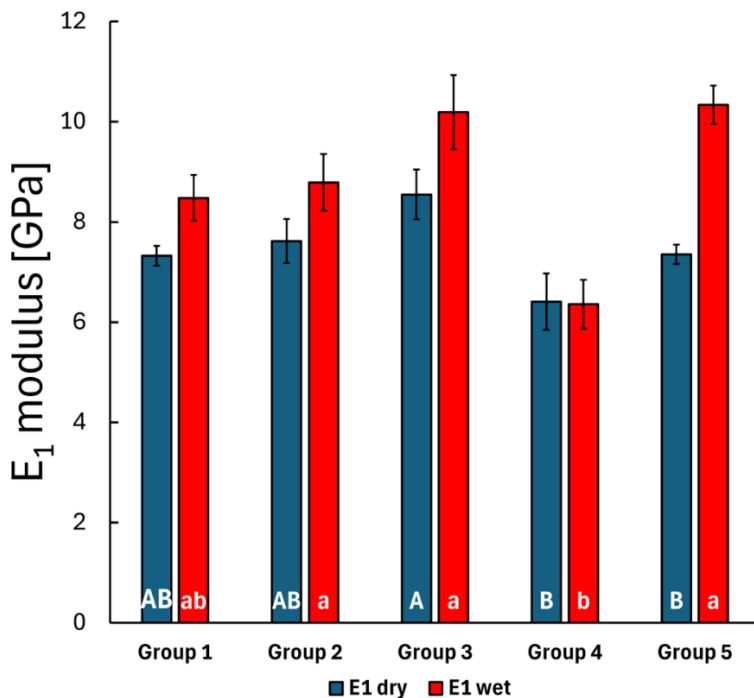


1. ábra. Az átlagos összesített repedésszámok alakulása az idő függvényében csoportonként (t0: közvetlenül a fotopolimerizáció után; t1: egyhetes vízben áztatás után; t2: öthetes vízben áztatás után). Az értékek átlag $\pm$ szórás formában vannak megadva.

2. SFRC nanomechanikai tulajdonságainak és vízfelvételének vizsgálata

A statikus nanoindentációs méréseket a kompozit minták felső és alsó rétegein végeztük el. Emellett a kompozit blokkok felső felszínét megmértük a vízben történő tárolás előtt és után is. A statikus nanoindentáció kimutatta, hogy a bulk PFC csoport minden rétegen és időpontban

következetesen a legalacsonyabb keménységi értékeket mutatta ($p < 0,05$). Az SFRC csoportok, különösen rétegezéssel alkalmazva, még vízben történő tárolás után is magasabb felszíni keménységet mutatott. A kúszásmérések során a benyomódás mélységét (elmozdulás) folyamatosan rögzítettük 300 másodpercen keresztül, 10 mN állandó terhelés mellett. A méréseket minden csoport felső rétegén végeztük, mind a desztillált vízben történő tárolás előtt, mind utána. Az SFRC bulk csoport (3. csoport) szignifikánsan magasabb kezdeti modulust (E1) és alacsonyabb kúszásmélységet mutatott, mint a bulk PFC (4. csoport), mind a vízben történő öregítés előtt, mind azt követően ($p < 0,05$) (2. ábra). Az időfüggő paraméterek (E2 és a viszkozitás η) szintén jobb teljesítményt mutattak az SFRC csoportokban, ami a hosszú távú alakváltozással szembeni jobb ellenállást jelzi. A felvett vízmennyiséget egységnyi térfogatra vetítve a 30. napon hasonlítottuk össze a csoportok között. A bulk SFRC minták (3. csoport) szignifikáns különbséget mutattak minden más csoporthoz képest, míg a többi csoport között nem volt statisztikailag igazolható eltérés.



2. ábra. A kompozit csoportok mérési eredményeiből származtatott E_1 illesztett paraméterek átlaga a kúszási görbék alapján, a vízben történő tárolás előtt és után. A hibasávok az átlag standard hibáját mutatják. A kisbetűk (a, b) a száraz csoportokra, a nagybetűk (A, B) a vízben tárolt csoportokra utalnak. Az azonos betűk (függetlenül a nagy- vagy kisbetűs írástól) nem jelentenek szignifikáns különbséget, míg a különböző betűk szignifikáns eltérést jelölnek.

Megbeszélés és konklúzió

A polimerizációs zsugorodás által kiváltott feszültség az RBC direkt restaurációk esetében továbbra is klinikailag jelentős probléma, mivel számos kedvezőtlen következménnyel járhat. A végső polimerizáció után bekövetkező zsugorodás feltehetően szerepet játszik a restauráció elkészülte után megfigyelt repedésszámok növekedésében. Eredményeink minden vizsgált csoportban szignifikáns növekedést mutattak az összesített repedésszámban mindkét mérési időpontban. Vizsgálatunkban a hagyományos PFC fedőréteg nélküli, folyékony SFRC anyaggal készült direkt restaurációkat elemeztük a repedésképződés szempontjából, amely szignifikánsan kevesebb repedést mutatott a hagyományos PFC tömésekhez képest. Az anyag teljesítményének átfogóbb megértése érdekében a folyékony SFRC nanomechanikai tulajdonságait és vízfelvételét is vizsgáltuk. A folyékony SFRC — akár rétegezve, akár bulk-fill technikával alkalmazva — hasonló keménységi értékeket mutatott, ami alátámasztja a bulk-fill technika alkalmazhatóságát. A bulk-fill alkalmazás szignifikánsan magasabb modulus- és viszkozitásértékeket, valamint

jobb kúszási ellenállást eredményezett a bulk PFC-hez képest.

Az általunk elvégzett in vitro vizsgálatok korlátain belül megállapítható, hogy:

- a folyékony SFRC anyag bulk-fill technikával történő alkalmazása hatékonyabban csökkenti a repedésképződést, mint a hagyományos paszta konzisztenciájú PFC és más tesztelt technikák.
- a bulk-fill technikával alkalmazott folyékony SFRC előnyösebb mechanikai tulajdonságokat és szignifikánsan alacsonyabb vízfelvételt mutatott a hagyományos és bulk-fill PFC anyagokhoz képest.
- kutatásunk eredményei alátámasztják a folyékony SFRC (EverX Flow) fedés nélkül történő alkalmazását, mint önálló restauratív anyag.
- a bulk-fill technikával alkalmazott folyékony SFRC mutatta a legelőnyösebb mechanikai szilárdságot és vízállóságot a vizsgált anyagok közül.