

Nanotermékek az európai építőiparban

State of the Art 2009 Vezetői összefoglaló

Fleur van Broekhuizen
Pieter van Broekhuizen

Amszterdam, 2009. november



Kolofon

Cím: Nanotechnológiák az európai építőiparban - State of the art 2009 - Vezetői összefoglaló
Szerzők: F.A. van Broekhuizen és J.C. van Broekhuizen
Irányító csoport: R. Gehring (EFBWW), D. Campogrande (FIEC), J. Gascon (FCC, Spanyolország), U. Spannow (3F, DK), J. Waage (FNV Bouw, NL)

Jelen kimutatást megrendelte: EFBWW (Európai Építőipari és Famunkások Szakszervezeteinek Szövetsége) és FIEC (Európai Építőipari Szövetség), az Európai Szociális Párbeszéd keretében

Köszönetnyilvánítás

Jelen tanulmány az Európai Bizottság Munkaügyi Főigazgatóságának támogatásával, a VS/2008/0500 – SI2.512656 sz. támogatási szerződés szerint, az Építőiparban folytatott Európai Szociális Párbeszéd keretében készült.

A szerzők köszönetet szeretnének mondani a cégeknek (építőipari cégeknek, nyersanyag-gyártóknak, gyártóknak, hulladékfeldolgozóknak), azok leányvállalatainak, a kutató és fejlesztő intézményeknek és a magánszemélyeknek értékes hozzájárulásukért, az általuk nyújtott információkért és nyíltságukért.

A kimutatással kapcsolatos további információ:

IVAM UvA BV

Amszterdam-NL

Tel.: +31 20 525 5080

www.ivam.uva.nl

E-mail: office@ivam.uva.nl

A kimutatásban található adatok felhasználása engedélyezett a forrásra való megfelelő hivatkozás mellett.

IVAM UvA b.v. nem vállal semmilyen felelősséget a jelen kimutatás eredményeinek felhasználásából vagy alkalmazásából eredő károkért vagy sérelmekért.

Összefoglalás

Jelen kimutatás a 2009-es évben az európai építőiparban a nanotermekek elérhetőségére, használatára, valamint az azokkal kapcsolatos egészségügyi és biztonsági kérdésekre vonatkozó tanulmány eredményeit tartalmazza. Az építőiparban tevékenykedő munkáltatók, dolgozók és dologozói képviselők körében európai szinten készült felmérés, a fontosabb érdekelt felekkel készített mélyreható interjúk és a szakirodalom átfogó tanulmányozása vezetett az alább bemutatott információkhoz.

Az építőipar különböző szereplői meglehetősen tájékozatlanok a nanoanyagok elérhetősége és teljesítménye terén. Ez úgy az építőipari munkáltatókra, mint a munkavállalókra, de a kapcsolódó iparágakban dolgozókra, így a műépítészekre, építészmérnökökre és az építkezések megbízóira is érvényes.

A mai építőtelepekre csak korlátozott mennyiségű nanotermék kerül, és ez úgy a korlátolt tájékozottság, mint annak a ténynek tudható be, hogy a nano-méretű összetevők számos esetben túl drágáknak bizonyulnak versenyképes termékek kialakításához. A piacon a legismertebb terméktípusok a nanorészecskékkel feljavított beton- és cementanyagok, a nanoburkolók és szigetelőanyagok. Viszont a folyamatban levő intenzív kutatások és fejlesztések eredményeképpen, valamint meglévő vagy tervezett egyedi jellemzőiknek köszönhetően a nanotermekek piaci részesedésének és választékának növekedése várható.

Azonban ezek a termékek új egészségügyi és biztonságügyi veszélyeket idézhetnek elő a telepen dologozók számára, melyek megértése még gyermekcipőben jár. És ez különösképpen a nanorészecskék vagy aeroszolok létrehozásával kapcsolatos tevékenységek esetében áll fenn. A nanorészecskéknek való magas kitettség kockázatával járó tipikus tevékenységek a nedves vagy porlékony nanotermekek használata, szárított vagy előre gyártott nanotermekek megmunkálása és tisztítása, valamint a felhasznált anyagok és berendezések karbantartása. A termékek összetételével és az illető termékek esetleges nano-specifikus egészségügyi és biztonságügyi kockázataikkal kapcsolatos részletes információk azonban általában hiányosak, és a nyersanyag-gyártó számára rendelkezésre álló információk általában a felhasználói láncon lefelé haladva elvesznek.

Ezért egy átlagos építőipari vállalatnak rendkívül nehéz lesz megfelelő kockázatfelmérést lebonyolítani, és alkalmazottai számára biztonságos munkahelyet biztosítani. Az ismeretlennel szemben az egyik fellépési lehetőség az elővigyázatos megközelítés. Azonban az építőipari vállalatokat az említett megközelítés fogyanatosításában támogatni szándékozó eszközkészlet kifejlesztése (pl. regisztrálási és tájékoztatási rendszer, nano viszonyítási értékek vagy jó gyakorlatok egy sor magas kockázatú tevékenységekhez) lehetőleg a tájékoztatatlanság áthidalását kellene szolgálnia.

Tartalomjegyzék

| | |
|--|----|
| Összefoglalás | 3 |
| 1. Bevezetés..... | 5 |
| 2. Nanotechnológia az építőiparban | 7 |
| 2.1 A nanotermékek építőiparban való felhasználását befolyásoló tényezők..... | 8 |
| 2.2 A munkabiztonságot biztosító tevékenységek | 13 |
| 3. Nanotermékek az építőtelepen | 15 |
| 3.1 Bevezetés..... | 15 |
| 3.2 Cement, beton és friss habarcs | 16 |
| 3.3 Burkolóanyagok és festékanyagok..... | 17 |
| 3.4 A nanotechnológia és az infrastruktúra..... | 19 |
| 3.5 Szigetelőanyagok | 20 |
| 4. Egészségügyi kockázatok | 21 |
| 4.1 Bevezetés..... | 21 |
| 4.2 A kitettség módzatai | 22 |
| 4.3 Néhány nanorészecske által okozott egészségügyi és biztonsági problémák | 23 |
| 4.4 A nanotermékek biztonságos használatának lehetséges megközelítései | 24 |
| 5. Lehetőségek a biztonságos munkahely biztosítását célzó további tevékenységekhez | 28 |

1. Bevezetés

Az Európai Szociális Párbeszéd keretében a FIEC (Európai Építőipari Szövetség) és az EFBWW (Európai Építőipari és Famunkások Szakszervezeteinek Szövetsége) kezdeményezésére az IVAM UvA BV megbízást kapott, hogy térképezze fel az érdekeltek jelenlegi ismereteit, és állítson össze egy általános áttekintést az európai építőipari piacon elérhető nanotermékekről. Ez a vezetői összefoglaló a 2009-es fejlettségi szintről készült, a nanotermékeknek az európai építőiparban való elérhetősége, használata, valamint a velük kapcsolatos egészségügyi és biztonságügyi kérdések átfogó elemzésének összefoglalása. A „Nanotechnológiák az európai építőiparban, state-of-the-art 2009” című fő kimutatás részletesen mutatja be a jelen tanulmány eredményeit.

A tartósabb, fenntarthatóbb és olcsóbb termékek kifejlesztésére való törekvést kényszerítő állandó piaci nyomás miatt az építőipari termékek állandó kutatás és fejlesztés alatt állnak. Az egyik legújabb technológiai fejlesztés ebben a kutatási és fejlesztési folyamatban a nanotechnológia. A nanotechnológia egyszerűen azt jelenti, hogy lehetőség van az anyagok (és ezek viselkedésének) nanométer (nm) nagyságrendű (azaz az emberi hajszál vastagságánál 10 000-szer kisebb méretű) megfigyelésére, követésére és befolyásolására. Ez az anyagok viselkedésének tanulmányozását és feljavítását elősegítő fejlett képalkotó tanulmányozási módszerek használatát teszi fel, de ugyanakkor rendkívül finom, 1-100 nm méretű részecskéket, úgynevezett nanorészecskéket tartalmazó porok, folyadékok és szilárd anyagok kidolgozását és gyártását is. A vállalatok ezeket a nanorészecskéket új vagy feljavított jellemzőkkel bíró termékek gyártására használják. Ilyenek például az átlátszó, az infravörös sugarakat visszaverő ablakburkolók, melyek a beltéri jobb légkondicionálást hivatottak szolgálni, vékonyabb falú és könnyebb építményeknek szánt ultraszilárd betonanyag vagy az öntisztító burkolók, melyek ugyanakkor a levegő szerves anyagokkal való szennyezésének csökkentéséhez is hozzájárulnak.

Annak ellenére, hogy az Interneten számos információ található az építőiparban használatos nanotechnológiákról, és a jövőbeli elvárások meglehetősen nagyok, a valóság az, hogy az építőtelepekre csak korlátozott mennyiségű nanotermék jut el, és mindez csupán azért, mert a módszerek és a nano-összetevők túlságosan drágák ahhoz, hogy a meglévő termékekkel versenyképes termékek készülhessenek. Az iparágban tevékenykedő néhány jelentős szereplő szerint: *„ezen a téren az építőipar kb. 10 évvel az általános ipar mögött jár, ami a nagy költségeknek, valamint az anyagokra vonatkozó műszaki és biztonsági előírásoknak tulajdonítható”*.

Mindezek ellenére fontos megjegyezni ezek egyre bővülő választékát. Az építőipari nanotermékek egyedi jellemzőkkel bírnak, azonban új egészségügyi és biztonsági veszélyeknek tehetik ki az építőtelepi munkásokat. A nanoanyagok és általában a nanotermékek újszerűsége miatt ezek az egészségügyi és biztonsági kockázatok megértése még gyermekcipőben jár¹. Ez a tény és a nanotermékeknek a közeljövőbeli piaci

¹ A tanulmány több, a nanoanyagokkal és nanotermékekkel járó egészségügyi kockázatokkal és a kitettségi kinetikával kapcsolatos nyitott kérdést is tartalmaz. Másrészt a munkaegészségügyi és munkabiztonsági felmérés, valamint a kitettségi kockázatok kezelése terén már széles körű ismeretek és tapasztalatok léteznek. A nanotermékek használata esetében a legnagyobb kihívás az ismert tények felhasználása az ismeretlenek kezelésére.

lehetőségeivel szembeni nagy elvárások² tovább fokozzák annak a jelentőségét, hogy kezdettől fogva lépést tartsanak a nanotechnológia terén tapasztalható fejlődéssel, szem előtt tartva a nanoanyagok és nanotermékekkel járó egészségügyi és biztonsági kockázatokkal kapcsolatos bizonytalanságot lehetővé téve a megfelelő intézkedések meghozatalát, amennyiben ezt szükségesnek ítélik. Jelen kimutatás célja jobb rálátást nyújtani a napjainkban az építőiparban használatos nanotermékekre, valamint ezek jellemzőire, egy tájékozottabb kockázatelemzés elősegítése végett.

Amikor nanoanyagokról és nanotermékekről beszélünk, fontos felismerni, hogy még nem léteznek egységes meghatározások, és emiatt könnyen jelentkezhettek félreértések. Jelen kimutatás a következő meghatározásokat alkalmazza:

1. a nanoanyag nanorészecskéket, illetve ezekből álló agglomerátumot vagy aggregátumot tartalmazó szemcsés, szilárd halmazállapotú vagy folyadékban diszperzált anyag, vagy belső vagy külső nanoszerkezetek vagy nano-méretű anyagok.
2. nanotermék egy olyan termék, melybe szándékosan helyeznek nanoanyagot a termék jellemzőinek befolyásolása érdekében.

A nanorészecskék meghatározása: „átdolgozott” részecskék (ember által módosítottak, hogy megkülönböztessék a „természetes”, pl. vulkánkitörések alkalmával képződő nano-méretű részecskéktől), melyek mérete 1–100 nm. Ezek lehetnek oldódók vagy oldhatatlanok. Jelenleg a nanorészecske fogalom kizárólag az oldhatatlan részecskéket fedi, mivel az oldhatatlanok azok, melyek kulcsfontosságúak a potenciális nano-tipikus egészségügyi hatások szempontjából. Azonban jelenleg az oldódó nano-méretű részecskék esetleges egészségügyi hatásai körül is vita kezd kialakulni, részben a környezetbeli nano-tipikus sorsuk miatt.

² lásd például www.hessen-nanotech.de

2. Nanotechnológia az építőiparban

Annak érdekében, hogy átfogó rálátást kapjunk a nanoanyagok és nanotermekek jelenlegi elérhetőségéről és használatáról az építőtelepeken, illetve betekintést nyerjünk a folyamatban levő olyan jellegű fejlesztésekről, melyek a közeljövőben a nanotermekek használatához vezetnek, valamint a felhasznált nanotermekekkel kapcsolatos munkaegészségügyi és -biztonsági kockázatok jelzésére és előtérbe helyezésére három irányt követtünk:

1. A (tudományos) szakirodalom átfogó áttekintése és az internetes források megkeresése nyújtotta az alapot az építőiparban felhasznált nanoanyagokra és nanotermekekre, valamint az ezek alkalmazásában esetlegesen jelentkező munkaegészségügyi és munkabiztonsági kockázatokra való betekintéshez.
2. A FIEC és a EFBWW felmérést készítettek 24 európai országban tevékenykedő tagjaik körében, azzal a céllal, hogy felbecsülje a munkáltatóknak (képviselők) és munkavállalóknak a nanotermekeknek az építőiparban való alkalmazásával kapcsolatos általános tájékozottságát (a továbbiakban: 2009-es felmérés). A 2009-es felmérés célja egy első benyomás szerzése az iparág ilyen irányú tapasztalatairól, a nanotermekekre való áttérés okairól és a termékek gyártói által közölt egészségügyi és biztonsági kockázatokról. A felmérésnek egyáltalán nem volt célja átfogó betekintést nyerni a nanotermekekkel kapcsolatos jelenlegi, építőiparban alkalmazott használati és munkagyakorlat részleteibe. Ez sokkal alaposabb megközelítést igényel.
3. Az építőmunkásokkal és munkáltatókkal, műépítészekkel, gyártókkal, valamint kutatókkal és fejlesztőkkel készített mélyreható, az építőanyagokkal és építőtermékekkel kapcsolatos interjúk még jobb rálátást nyújtottak a folyamatban levő, a nanotermekek terén kifejtett építőipari tevékenységekre. Ezen interjúk eredményei fontosak voltak a 2009-es felmérés eredményeit a szakirodalom, illetve az internetes források áttekintésével összhangba hozása szempontjából, és ahhoz, hogy kiemelhessük azokat a nano-fejlesztéseket, melyek jelenleg a legjelentősebbeknek tekinthetők az építőiparban.

0-1 táblázat A 2009-es felmérés válaszadóinak tipikus hátterének (munkaköri profiljának) áttekintése és a mélyreható interjúk érdekében megközelített különböző típusú szervezetek áttekintése

| Válaszadók ³ | Munkakör | Mélyreható interjúk (%) | Szervezet jellege |
|-------------------------|--|-------------------------|--------------------------------|
| 6 | Munkáltató | 21 | Építőipar |
| 4 | Mázoló (dolgozó, dogozói képviselő) | 21 | (nyersanyag) Gyártók |
| 4 | Biztonsági tanácsos (dolgozó, dogozói képviselő) | 9 | Leányvállalatok |
| 3 | Egyéb (dolgozó, dogozói képviselő) | 4 | Műépítészek |
| 11 | Nincs megadva (dolgozó, dogozói képviselő) | 42 | Egyetemi kutatás és fejlesztés |
| 38 ⁴ | Munkaegészségügyi és biztonsági tanácsadók / Munkahigiénia szakértők (csak Hollandiában) | | |

³ Összesen 28-an válaszoltak az Európa 14 különböző országából, melyekhez hozzájönnek a 38 holland munkaegészségügyi szakember válaszai, melyeket külön elemzünk.

⁴ A holland munkahigiénia szakemberektől, valamint az egészségügyi és biztonsági tanácsadóktól kapott válaszok köre (összesen 38 válaszadó) egyedi volt a 2009-es felmérés keretében. Ezért ezeket külön elemeztük. Ezen elemzés eredménye teljes összhangban volt a többi válasz elemzésének eredményével.

Az elemzésből származó információkat az alábbi fejezetekben részletezzük. A 0-1 táblázatban a 2009-es felmérésre válaszolók munkaköri profiljának áttekintése, valamint a mélyreható interjúk céljából megközelített szervezetek jellege látható.

2.1 A nanotermékek építőiparban való felhasználását befolyásoló tényezők

2003-ban a kutató és fejlesztő szakértők nagy elvárásokat fogalmaztak meg a nanotermékek építőiparban való felhasználásának közeljövőbeli fejlesztéseivel kapcsolatban. Azonban csak kis része ezeknek a várt termékeknek jutottak el a mai építőtelepekre⁵. Ez több oknak tulajdonítható. A legfontosabbakat az alábbiakban részletezzük.

Árak versenyképessége

A nanotermékek társadalombeli sikerének, de építőipari sikertelenségének legfontosabb oka a költségek. Jelen pillanatban a nanoanyagok, és következésképpen a nanotermékek továbbra is jelentősen drágábbak, mint nem nano alternatíváik, és ez a gyártásukhoz szükséges technológiának tulajdonítható. Az építőiparban ez azt jelenti, hogy a termék már kutatási és fejlesztési szakaszában a kezdeményezéseket már abban a pillanatban leállítják, amikor az előrelátások szerint a gyártandó nanotermék ára soha nem lesz versenyképes. Ez nagy mértékben annak a ténynek tudható be, hogy az építőipari termékeket majdnem minden esetben nagy mennyiségben szállítják, így a kg-onkénti viszonylag kis árkülönbség is óriási különbséghez vezet az összértékben, ha az építőanyag teljes mennyiségét vesszük figyelembe.

Következésképpen az építőanyag gyártók vonakodnak a nanotermékek kifejlesztésétől, és a kifejlesztett nanotermékeket csak eseti igény esetén alkalmazzák. Ez különösen érvényes a nagyobb mennyiségű termékekre, mint a beton vagy habarcs, valamint az építőipari burkolókra. Azonban, pl. szigetelőanyagok és műépítészeti és üvegburkolók esetében, a társadalom jelenlegi, az éghajlatváltozás és az üvegházhatást okozó gáz kibocsátások csökkentése által kiváltott, az energiagazdálkodás feljavítására összpontosító tendenciája előmozdító tényezőként hat forgalmazásukra.

Műszaki teljesítmény

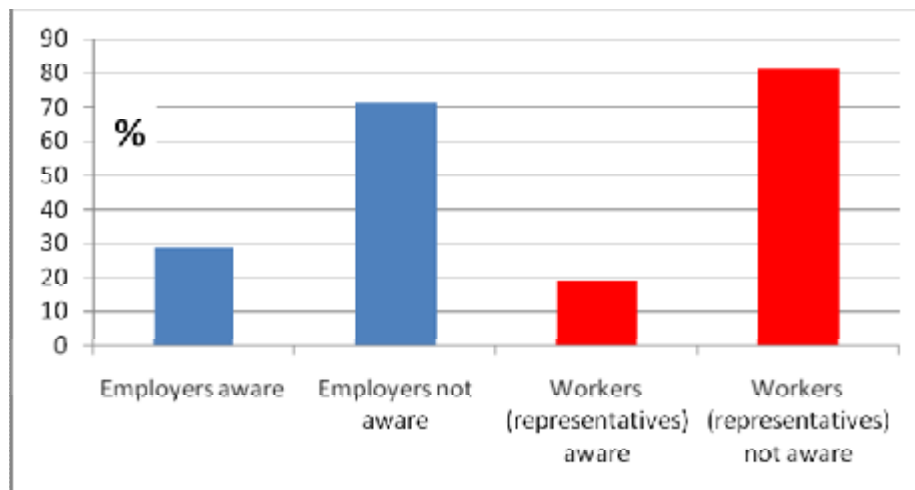
A termék műszaki teljesítménye egy másik korlátozó tényező a nanotermékek széles körű felhasználásának. A műszaki teljesítmény alapos vizsgálatokat igényel, hogy az anyag megfeleljen a rá vonatkozó műszaki előírásoknak. Nyilvánvaló, hogy ez a piaci szektortól függ. A beton esetében, például, ez egy fontos kérdés. Az öntisztító ablakburkolók esetében ez a kérdés sokkal kisebb fontosságú, mivel a biztonsági előírások sokkal engedékenyebbek.

Az iparág tájékozottsága

A tájékozottság (illetve ezek hiánya) egy másik kulcsfontosságú tényező, ami megakadályozza a nanotermékek bevezetését az építőiparba. Tájékozottság hiányában egyszerűen nem lehet megtudni, hogy létezik-e valami újdonság, amit alkalmazni lehet vagy ki lehet próbálni. Európában az építőiparban alkalmazott nanotechnológiával kapcsolatos ismeretek rendkívül korlátozottak, és egyelőre csak néhány kulcsszerepet betöltő piacfejlesztő vállalat birtokában vannak. A FIEC és EFBWW által az építővállalatok és alkalmazottaik

⁵ Bartos PJM 2009, Nanotechnology in Construction 3, A NICOM3 aktái. ISBN 978-3-642-00980-8

tájékozottságának követésére megrendelt 2009-es felmérés eredményét a 0-1 ábra szemlélteti. Látható, hogy a válaszadók zöme (~75 %-a) nem tudta, hogy nanotermékekkel dolgoznak-e vagy sem. Ez az eredmény 28 beküldött kérdőív alapján jött ki, azzal, hogy az eredeti cél az volt, hogy a 24 EU tagállamban tevékenykedő minden egyes FIEC vagy EFBWW tagnak 3 kérdőívet kellett volna beküldenie (azaz összesen 144 kitöltött kérdőívet)⁶.



0-1 ábra A munkáltatók és dolgozók (képviselők) válaszai a 2009-es felmérésre, aki tudták vagy nem, hogy munkahelyükön nanotermékekkel dolgoznak.

A felmérés eredményei azonban csak az iparág jelenlegi, az építőiparban használatos nanotermékek használatával kapcsolatos tájékozottsági szintjének fényében értelmezendők. Tulajdonképpen a tájékozott válaszadók 25 %-a a pozitív választás miatt túlbecsüli a valós értékeket: azok, akik tudják, hogy nanotermékekkel dolgoznak, lelkesebben válaszolnak. Erre a 2009-es felmérésre a dolgozói képviselőktől és munkáltatóktól beérkezett visszajelzések alapján lehet következtetni. Íme néhány ezek közül:

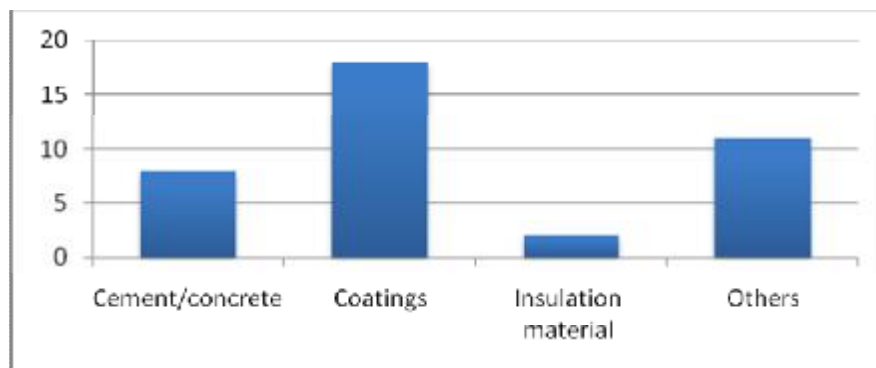
- „...Több vállalattal beszéltem erről a témáról, és senki sem ismert semmilyen ilyen terméket tartalmazó anyagot. Több egészségügyi és biztonsági vezetővel is beszéltem, és ők sem tudnak ezen termékek létezéséről... (Nagy-Britannia)”
- „...több építőipari alágtól próbáltunk információt szerezni, azonban máig nem kaptunk semmiféle hasznos információt. A kérdés (és ez nem meglepő) egyelőre ismeretlen (Svájc)”
- „...a téma egyszerűen túl elvont és túl ismeretlen ahhoz, hogy egyáltalán válaszolni tudjak a kérdőívre (Hollandia)”

Ezek, a 2009-es felméréssel párhuzamosan néhány kulcsszereplővel készített mélyreható interjú eredményeivel együtt, (azaz BASF, Heidelberg Cement, Skanska) azt sugallják, hogy a nanotechnológiának még nem sikerült megfelelő erővel berobbannia az építőiparba. Több kis- és középvállalattal vettük fel a kapcsolatot, és ezek alátámasztották azt a feltételezést, mely szerint jelenleg a nanotechnológia csak egy kis szegmense az építőiparnak. Azonban ennek ellentmondó jelzéseket is kaptunk egy dániai, a víz- és gázvezeték-szerelő iparban tevékenykedő egészségügyi és biztonsági tanácsadó cégtől, mely azt nyilatkozta, hogy

⁶ A kérdőívekre 14 különböző országból kaptunk választ, általában 1 vagy 2 kitöltött kérdőívet országonként, kivéve Hollandiát. A Hollandiából beérkezett sokkal nagyobb számú válasz egy párhuzamos (országos) projektnek köszönhető, ami az építőiparban használatos nanotermékekről és a kapcsolódó munkahelyi kitértegről szolt.

„...nincs információjuk arról, hogy ezekben az iparágakban nanotermékeket használnának, azonban biztosak benne, hogy az általuk használt termékek között vannak nanotermékek”.

A nanotermékekkel dolgozó, a 2009-es felmérésre válaszolók közül nagyrészt cement- vagy betontermékeket, burkolókat vagy szigetelőanyagokat használnak (lásd 0-2 ábra). Egyéb terméktípusokat, ideértve az útburkoló termékeket, égésgátló anyagokat vagy textilanyagokat is említettek. Minden válaszadó a nanotermékeket teljesítményük miatt használja (kizárva az alternatív anyagokat), míg más esetekben az ügyfelek (külön) igénye miatt.



0-2 ábra A ténylegesen használtként megjelölt nanotermékek; termékek száma terméktípusonként, a 2009-es felmérés eredményei alapján

Érdekes azonban az a tény, hogy egyes válaszadók, akiknek válasza *„Nem tudom, hogy nanotermékekkel dolgozom vagy sem”*, azt nyilatkozzák, hogy megtörténhet, hogy bizonyos típusú nanotermékeket használnak, amikor adott terméktípusokat tartalmazó listákat kapnak (~18 %-a a válaszadóknak: dolgozók, dolgozói képviselők és munkáltatók). Az ide sorolható válaszadók által általában megjelölt terméktípusok nagyjából megegyeznek a nanotermékekkel dolgozó válaszadók által névlegesen említett termékekkel (~21 %-a a válaszadóknak: dolgozók, dolgozói képviselők és munkáltatók). Ez nem a használt termékek jellegével kapcsolatos ismeretek hiányát jelzi, hanem úgy is értelmezhető, mint azon termékcsoportok tükrö, melyek esetében a válaszadók elsőként várják a nanotermékek megjelenését. Azonban ez azt is jelezheti, hogy a választ a marketing is befolyásolhatja, mivel a *nano-* előtag műszakilag jobb teljesítményű terméket jelezhet, azt sugallva, hogy a nanotermékek *„új”*, *„egyedi”* vagy *„extra-erős”* termékek.

A nanotechnológia által az iparágnak nyújtott előnyök

Az anyagok nanotechnológia általi feljavításának tanulmányozásához és fejlesztéséhez erős kutató és fejlesztő osztályra van szükség, mely drága berendezéseket és képzett személyeket igényel. Azonban, mivel az építőipar soha nem volt igazán kutatás- és fejlesztés-orientált, a nanotermékekkel kapcsolatos kutatás és fejlesztés nagyrészt a nagy multinacionális vállalatok - pl. a BASF, AKZO-NOBEL, DuPont, Heidelberg vagy Italcementi - keretében, illetve (egyetemi vagy magánjellegű) szakkutató intézetekben zajlik. Ez közvetetten azt sugallja, hogy a kis- és középvállalatok hozzájárulása az építőiparban az úttörő nano tevékenységekhez csekély vagy nem létezik. Kivételt képeznek azok a spin-off kis- és középvállalatok, melyek szerződéses alapon használhatják a nagyobb „anya” vállalatok kutatóegységeit, azok a kis- és középvállalatok, melyeket egyetemi spin-off céggént hoztak létre (és melyek használhatják az egyetem kutatóegységeit), melyek jól meghatározott nano-

szegmensekre összpontosítanak, mint például a rendelésre gyártott és tervezett nanoanyagok szegmense, és a kis- és középvállalatok kis része, melyek sikerrel használták fel a nagyobb vállalatok sikereit és áttöréseit saját, újító termékkínálatuk kifejlesztésére.

Jelenleg ez a helyzet a burkoló szektorban változik. A nano-burkolók általában „messze” járnak fejlesztés szempontjából a többi építőipari termékhez, pl. a betonhoz vagy szigetelőanyagokhoz viszonyítva, és a nanotermékekre alkalmazandó módszerek egyre inkább „közismertté” válnak a gyártók körében. Ezért van az, hogy a festékek és burkolók terén a kis- és középvállalatok egyre fontosabb szerephez jutnak és saját nanotermék-családokat kezdenek gyártani.

A nano továbbítása a felhasználói láncban

Az átlagos építőmunkás számára az általa használt termék kémiai jellegének részletes ismerete nem a legfontosabb dolog. Számára a műszaki, egészségügyi és biztonsági információk a fontosak. Ez érvényes a „normál” termékekre, és ilyen szempontból a nanotermékek sem különbek. Azonban a nanotermékeknek való kitettséggel járó kockázatok szabványosított módszerekkel való meghatározása egy jelenleg is folyó vita tárgya, és még számos nyitott kérdés van ezen módszerek alkalmazhatóságával kapcsolatban. Ennek következtében általános bizonytalanság övezi a nanotermékek használatával járó egészségügyi és biztonsági kockázatokat, ezért ezeket a termékeket megfelelő elővigyázatossággal kell kezelni és használni.

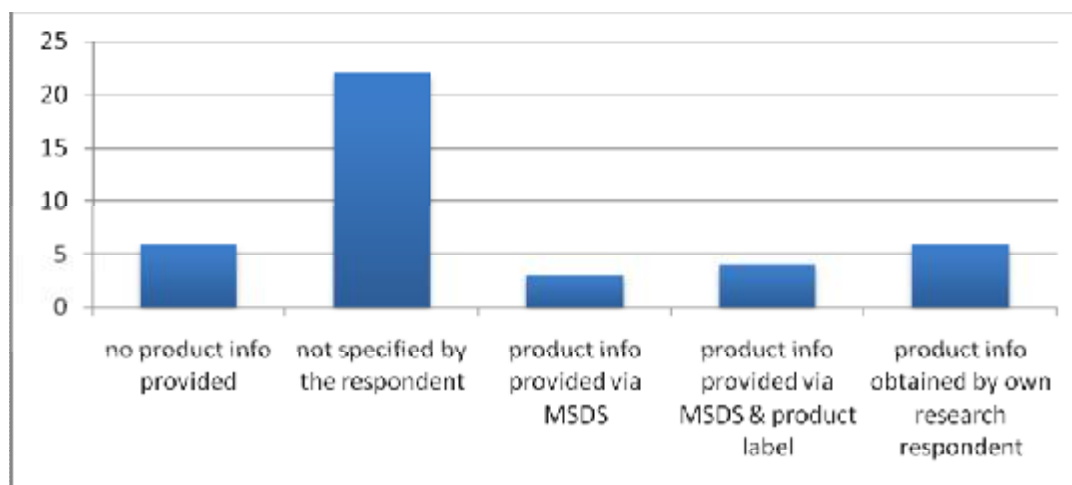
A nanotermékek sokkal reaktívabbak lehetnek (anyag-grammonként), mint nem-nano megfelelőik, ezért teljesen másként viselkedhetnek. Ennek következtében azoktól eltérő, esetleg súlyosabb egészségügyi kockázatokkal járhatnak. Ezért megtörténhet, hogy az előírt biztonsági korlátok, melyek túllépése esetén az egészségügyi és biztonsági kockázatokat regisztrálni és jelenteni kell, túl magasak ahhoz, hogy a munkahely biztonságos legyen, ezért ezeket a korlátokat csökkenteni kellene. Európában az ETUI és ETUC e helyzet megváltoztatásáért harcolnak, a REACH olyan irányú módosítását szorgalmazva, mely kötelezővé tenné valamely termék bejelentését, amennyiben szándékosan nanoanyagot adnak hozzá.

A jelenlegi helyzetben csak korlátozottan lehet információt szerezni a nanotermékek vegyi részleteiről. Kevés olyan nano-méretű összetevőket vagy nanoanyagokat felhasználó gyártó létezik, amely tájékoztatja ügyfeleit erről a tényről, mert az anyagok és keverékek osztályozásáról, címkézéséről és csomagolásáról szóló rendelet (CLP)⁷ nem kötelezi őket erre. A 2009-es felmérésből kiderült, hogy a 41 használatban levőként megjelölt nanotermék közül a válaszadók csupán 7 esetében jelezték, hogy a termék jellemzőiről az Anyagbiztonsági adatlapról (MSDS) szereztek tudomást, és az MSDS ezek közül csupán 4 esetében írt elő a nanotermékre vonatkozó olyan védőintézkedéseket, melyek eltértek az építővállalat által azelőtt használt nem-nano termékekre vonatkozó előírásoktól (lásd 0-5 ábra). A kérdésre kapott válaszok azt sugallják, hogy a termékek zöme esetében a termékre vonatkozó egészségügyi és biztonsági előírásokat nem megfelelően továbbítják a felhasználói láncban (34 termék esetében a válaszadó - aki építőmunkás vagy munkáltató lehet - tudomása szerint nem létezett a termékre vonatkozó MSDS). Az MSDS-sel rendelkező

⁷ http://ec.europa.eu/environment/chemicals/dansub/home_en.htm ; az 1272/2008/EK rendelet magyar nyelvű változata: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:hu:PDF>

termékek esetében a gyártótól vagy forgalmazótól függ, hogy az MSDS tartalmaz-e vagy sem a nano-összetevőre vonatkozó egészségügyi és biztonsági információt. A válaszadók által a 2009-es felmérésben megjelölt termékek esetében a legtöbb MSDS nem említ semmiféle nano-összetevőt, egyes esetekben viszont a műszaki adatlap egyértelműen kijelenti, máskor viszont csak sugallja vagy sugallni tűnik (például a termék neve alapján), hogy a termék legalább egy nanoanyagot tartalmaz. A műszaki adatlapon megjelölt nano-specifikus információk a nagyon részletes adatoktól - pl. a nanorészecske mérettartományának megadása és SEM-képe⁸ vagy a nanoanyag grammonkénti aktív felületi helyének leírása - az „egyszerű” megjegyzésekig - pl. a termék tartalmaz például nano-kvarcot (anélkül, hogy részletezné, hogyan is néz ki ez a kvarc) – terjednek.

Minden olyan esetben, amikor a nanotermékről több információt adtak meg, az illető termékek gyártói kijelentik, hogy termékük rendeltetésszerű felhasználás esetén veszélytelen, és nem igényelnek (nano-)specifikus tudást vagy képzettséget a rendeltetésszerű használatához. Sőt, a 2009-es felmérésben megnevezett nanotermékek zöme esetében az előírt védőintézkedések *„nem különböznek az előzőektől”*, amikor nem-nano termékeket használtak, és a munkaeljárásokat nem befolyásolja ezek használata. Csak két termék esetében írtak elő több védőintézkedést, mint a hasonló rendeltetésű nem-nano termékekhez. A 2009-es felmérésben megjelölt termékek esetében ez a helyzet két cement-alapú, szilikát tartalmazó nano-terméknél fordult elő. Azonban ugyanakkor olyan visszajelzések is érkeztek, melyek szerint a nanotermékek megkönnyítik a munkát.

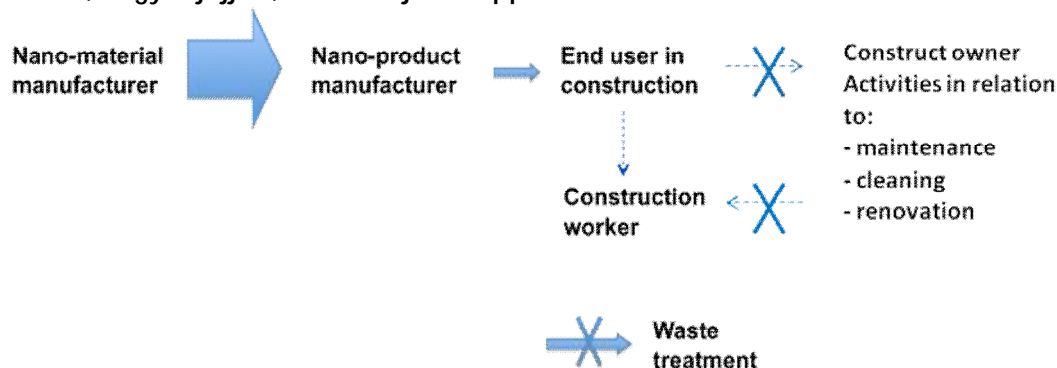


0-3 ábra A 2009-es felmérésben használtként megjelölt nanotermékek termékinformációinak megadása (számokban kifejezve)

Jelenleg az információszerzési láncot nagy vonalakban az alábbiak szerint lehetne ábrázolni (lásd még 0-4 ábra). A „nyersanyag” nanoanyag gyártók az anyag jellemzőivel (pl. reaktivitás, sajátos viselkedési jellemzők, méret, alak, kristályszerkezet, tömeg és sűrűség) és egészségügyi, biztonsági és környezetvédelmi kérdésekkel (amennyiben ezek ismertek) kapcsolatos részletes adatokat közölnek a felhasználói láncban közvetlenül utánuk következő felhasználónak (általában a termékgyártóknak). Üzleti kapcsolatuk függvényében ezek az adatok a jogszabályok által előírt minimális adatok vagy annál átfogóbb információk is lehetnek, ha kapcsolatukat a kölcsönös bizalom jellemzi. Azonban általában ez az a pont, ahol a nano-specifikus információk továbbítása elakad. A termékgyártók legtöbb esetben az

⁸ Pásztázó elektronmikroszkópia

regisztrálásra és bejelentésre kötelező koncentrációnál kisebb mennyiségben, adalékként használják a nanoanyagokat. A gyártók közül csak egy páran tájékoztatják ügyfeleiket. Viszont egyes esetekben ezt csupán a „nanotechnológia alkalmazásával gyártva” megjegyzéssel, semmilyen további részletezés nélkül teszik. Az ügyfélnek aztán csak az marad, hogy rájöjjön, mi is tulajdonképpen az a nanotermék.



0-4 ábra A nano-specifikus információknak a felhasználói láncban való közlési intenzitása a nyersanyag gyártóktól a hulladékkezelőig. A nyíl vastagsága jelzi a felhasználói láncban a következő szereplőnek átadott nano-specifikus információmennyiséget.

A nano jól eladható

A nanotechnológia és a nanotechnológia által előállított termékek számos lényeges kérdést hivatottak megoldani, mint amilyen az ásványi források kimerülése, környezetszennyezés, energiafogyasztás vagy üvegházhatást okozó gázok kibocsátása, vagy olyan biztonságügyi kérdéseket, mint a terrortámadások és világbéke. E nagy elvárások következtében a *nano*-olyan kulcsszavak mellett kapott helyet, mint a *siker*, *csúcsteljesítmény* vagy *fenntartható fejlődés*. Ennek következtében a vállalatok, de a kutatók is, munkásságuk eredményét nano-ként kezdték el árulni, hogy újabb ügyfeleket vonzzanak, illetve pénzügyi támogatást nyerjenek. Ez a tendencia nagyjából 10–15 évvel ezelőtt kezdődött, és jelen pillanatban is, amikor ez a tendencia a kapcsolódó egészségügyi és biztonsági kérdések, de a leányvállalatoknak a nano-téma⁹ körüli zűrzavar tisztázására irányuló nyomása alatt visszatérni látszik, a *nano*-t még mindig arra használják, hogy kiemeljék a termékek kiváló műszaki teljesítményét vagy kifinomult, ötletes kivitelezését.

És ez nem csak a nanoanyagokat tartalmazó termékek esetében áll fenn. Még a meglehetősen hagyományos enzimeket tartalmazó termékek (melyek mérete nano nagyságrendű) vagy olajos diszperziók (melyek apró, nano-átmérőjű olajcseppeket tartalmaznak) esetében is használják a *nano*- előtagot. De határesetek képező termékek esetében is használják, melyek prekursor anyagait nanoanyagok vagy nanogyártási folyamatok segítségével állítják elő, de összetevőik között nem lelhető fel egyetlen nanoanyag sem. Ez zűrzavarhoz vezetett, és olyan esetek fordultak elő, melyekben nem-nanotermékeket nanotermékként adtak el, viszont ennek ellentéte is: nem-nano termékeket adnak el nanotermékként.

2.2 A munkabiztonságot biztosító tevékenységek

⁹ A különböző anyaggyártó cégekkel lefolytatott magánbeszélgetések.

A fentiek ellenére egyre jellemzőbb az a helyzet, hogy a nanotermék gyártókban tudatosult a nanorészecskék használatával és kezelésével járó lehetséges, de nagyrészt ismeretlen egészségügyi és biztonsági kockázatok létezése. Az építőtelepen a nanorészecskéknek való kitettségnek a következő lehetséges esetei fordulnak elő:

1. a nanotermék elsődleges használata: a nanotermék használata (a helyszínen kevert késztermék vagy több összetevőből álló termék)
2. a nanotermék másodlagos használata: nanotermék megmunkálása (például fúrása, csiszolása vagy tisztítása)

A kockázatok alapos felmérésére főként olyan esetekben van szükség, ha ezek a tevékenységek porlékony vagy cseppfolyós anyagok kezelését, vagy por vagy aeroszolk gerjesztését teszik fel. Íme néhány tipikus példa: nanoburkoló szórása, szilikapernye hozzáadása a nedves habarcshoz, fényérzékeny betonhomlokzat homokfúvatása vagy baktériumölő (ezüst-tartalmú) fal tisztítása. Másrészt a szilárd (előre gyártott) nanotermékek - pl. nano-javított kerámiatermékek, üveg, acél, műanyag, kompozit anyagok, szigetelőanyagok, beton vagy fa - megmunkálás nélküli kezelésekor a nanorészecskéknek való kitettséggel járó kockázatok várhatóan alacsonyak (ha léteznek), mivel a nanorészecskék a szilárd szerkezetben maradnak. Azonban a kitettségi kockázatok idővel, az anyag kopása miatt jelentkezhetnek, az építmény felújításakor vagy bontáskor.

Ami a biztonságos munkahely kialakításának első lépéseit illeti, az olyan szervezetek, mint az anyaggyártók vagy az Európai Bizottság az óvatos megközelítést ajánlják. Az Európai Bizottság és a kulcsfontosságú érdekelt felek - mint a BASF és Dupont - által támogatott különféle magatartási kódexekben az óvatos megközelítés állandó kihangsúlyozása következtében a nanorészecskék és nanoanyagok nagyrészt cseppfolyós formában (szuszpenzió vagy oldat formájában), „nyomás alatt” vagy szigetelt környezetben történik, hogy maximalizálja a részecskék ellenőrzés alatt tartását és minimalizálja a kitettségi kockázatokat. Ezen okoknál fogva, és a néhány évvel ezelőtti helyzettel ellentétben, a termékgyártók a nano-méretű adalékokat leggyakrabban szuszpenzió vagy oldat formájában, használatra készen szállítják. Amikor ez nem lehetséges, például az UHPC betonnak szánt szilikapernye esetében, és amikor az adalékoknak por formájában kell maradniuk, egyéb, a kitettség megelőzését szolgáló megoldásokat találtak fel, mint pl. a vízben oldódó csomagolóanyagok (nagy zsákok) használata, és melyek anyaga nem befolyásolja a tervezett termék (beton) jellemzőit.

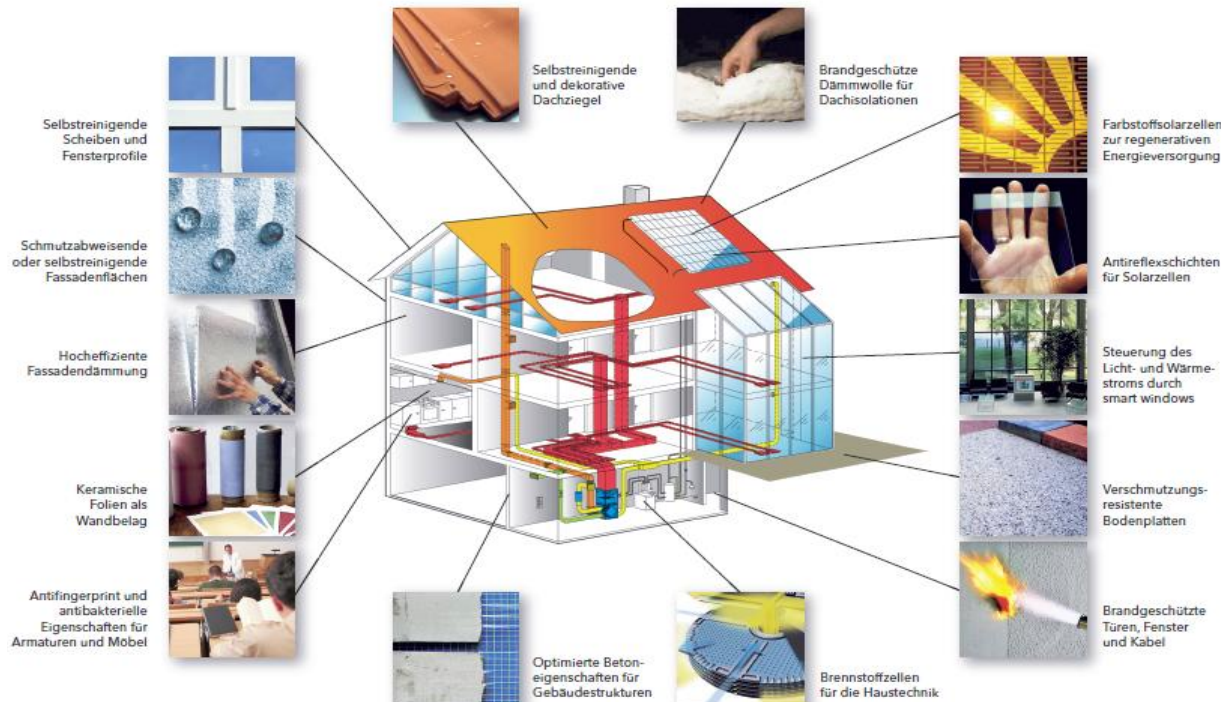
Azonban továbbra is rendkívül nehéz megállapítani, hogy valamely munkagyakorlat vagy védőintézkedés elegendő-e a biztonságos munkavégzéshez. A munkahelyi tényleges kitettséget mérő műszerek nagyon drágák, kezelésük nehézkes és csak korlátozott adatokat szolgáltatnak a tényleges kitettségi szintekről. A jelenlegi ismereti szintnek megfelelően többféle olyan egyéni védőfelszerelés létezik a piacon, melyek nanorészecskék elleni védelmet biztosítanak. Az egyéni védőfelszerelésekkel kapcsolatos információkat egy nemrég közzétett OECD felmérés szolgáltat, mely a különböző bőrvédő és légzésvédő felszerelések kiválasztási kritériumainak átfogó összehasonlítását tartalmazza a nanoanyagoknak való esetleges kitettség elleni védelem érdekében¹⁰

¹⁰ Az OECD Környezetvédelmi, Egészségügyi és Biztonsági kiadványsorozata, 12 (2009) ENV/JM/MONO(2009)17 sz. kiadvány a nanoanyagok biztonságáról

3. Nanotermékek az építőtelepen

3.1 Bevezetés

A nanotermékek piaci részesedése az építőiparban kicsi, és szűk piacszegmensekben van jelen¹¹. Azonban ez a részesedés a közeljövőben várhatóan nőni fog¹², és az elvárások szerint a nanorészecskék fontos szerepet fognak játszani az építőiparban már az anyagtervezés, -fejlesztés és -gyártás alapjaiban¹³. Elvileg a nanotermékek már most is bármilyen átlagos ház vagy épület majdnem minden részében jelen vannak (lásd 0-5 ábra).



0 5 ábra A mai tipikus ház vázlatrajza, azon helyek megjelölésével, melyeken nanotermékek lehetnek¹⁴.

A 2009-es felmérésre adott válaszokban megjelölt nanotermékek általában cement és beton, burkolók és szigetelőanyagok körében használatosak. Ezek jó összhangban vannak a mélyreható interjúkban megjelölt terméktípusokkal, ami azt sugallja, hogy jelenleg az építőiparban a burkolóknak és cementnek, valamint a cement-alapú anyagoknak van valószínűleg a legnagyobb piaci részesedésük a nanotermékek közül, és ezeket a szigetelőanyagok követik. Ez ugyancsak jó összhangot mutatott a szakirodalomnak a jelen kimutatás keretében végzett átfogó átböngészésének eredményeivel. Ezért a cementet, a betont, a burkolókat és szigetelőanyagokat fontossági sorrendben tárgyaltuk. Ebben a kontextusban a leggyakrabban említett nanorészecskék a szén-fluor (CF-) polimerek, a titán-dioxid (TiO_2), cink-oxid (ZnO), szilika (vagy szilikapernye; SiO_2), ezüst (Ag) és alumínium-oxid (Al_2O_3). Érdekes megjegyezni azt is, hogy nem találtunk semmiféle utalást arra, hogy ezekben

¹¹ Személyes kommunikáció

¹² A 2007-ben jegyzett 20 millió amerikai dollárról kb. 400 millió amerikai dollárig 2017 vége előtt; Freedonia Group Inc. *Nanotechnology in Construction* – Kiadvány azonosítója: FG1495107; 2007. május 1.

¹³ Nanotechnology and Construction 2006; www.hessen-nanotech.de

¹⁴ Az „Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen” (kiadta a HA Hessen Agentur, 2007-ben, források: Schrag GmbH VDI TZ) nyomán

a termékekben használnak-e vagy sem szén-nanocsöveket (CNT), annak ellenére, hogy számos kiadvány bizonyítja, hogy ilyen irányban folyamatban vannak kutatási és termékfejlesztési tevékenységek.

A szén-fluorid polimerek (CF-polimerek) Teflon jellegű molekulák, melyeket egy adott felületre azért viszik fel, hogy az illető felületet víztaszítóvá és olajtaszítóvá tegyék. Általában ablakfelületeken alkalmazzák.

A titán-dioxid (TiO_2) elnyeli az UV sugarakat, és védőréteggént használják az UV-degradáció ellen. A TiO_2 egyes változatai fotokatalitikus jellemzőkkel bírnak, és UV fény hatására katalizátorként viselkednek a szerves szennyezőanyagok, pl. algák, PAH, formaldehid és Nox lebomlásában. Általában bármilyen UV-védett felület típusra alkalmazzák, melyek így öntisztítókká válnak, vagy a légszennyezés csökkentéséhez járulnak hozzá.

A cink-oxid (ZnO) a TiO_2 -hoz hasonló fotoaktív jellemzőkkel bír, ezért hasonló célokra alkalmazzák.

A szilikapernye (amorf SiO_2) tömöríti a betont, szilárdabbá és ellenállóbbá téve azt alkáli, pl. tengervízi környezetben. Betonhoz adagolva hézagiöntő anyagok, pl. szállópernye stabilizálására használható, burkolóanyagokhoz hozzáadva egy rendkívül szilárd szerkezet alakul ki, de tűzgátló anyagként is használható. Leggyakoribb alkalmazásai az UHPC (ultramagas szilárdságú beton), karcolásálló burkolatok létrehozása és tűzálló üveg.

Az ezüst (Ag) baktériumölő hatású, és bármilyen típusú anyaghoz hozzáadható. Az építőiparban leginkább a burkolóanyagoknál használják. Tulajdonképpen az ezüst-ionok azok, melyek az ezüst vízben való oldódása esetén baktériumölő hatásúak.

Az alumínium-dioxid (Al_2O_3) olyan burkolóanyagoknál használatos, melyek kölcsönhatásba lépnek a kötőanyaggal, magas karcolásállósággal ruházva fel azokat.

3.2 Cement, beton és friss habarcs

A beton esetében a jelenlegi alacsony ár és jó teljesítmény kombináció nagy kihívás elé állítja a nanotechnológia bármilyen sikeres alkalmazását¹⁵. Az egyik olyan terület, ahol a nanotechnológia rendkívül értékesnek bizonyulhat úgy most, mint a közeljövőben, az az anyag jellemzőinek vizsgálata (és a jobb megértés általi optimalizálása)¹⁶.

A nanorészecskék használata a cement-alapú és betonanyagokban a TiO_2 és a szilikapernye köré összpontosul. Azonban mindkét adalékanyagot csak kis mennyiségben vagy kétrétegű rendszerben használják, és csak olyan esetekben, amikor ez a teljesítmény feljavítása érdekében kifejezetten szükséges, és ez a kapcsolódó költségek miatt történik. A piacon jelenleg elérhető szilikapernye-alapú termékek például a Lafarge által gyártott ChronoliaTM, AgiliaTM és DuctalTM, valamint a BASF által gyártott EMACO[®]Nanocrete¹⁷. Fotokatalitikus cement például a TioCem TX Active (Heidelberg Cement¹⁸), a NanoGuardStone-Protect (Nanogate AG¹⁹), vagy a TX Arca és TX Aria (Italcementi), melyeket a burkolóanyagok rendkívül széles skálájánál - pl. külső falaknál, alagutaknál, betonfödémeknél, kövezetköveknél, burkolólapnál, tetőcserépnél, útburkolati jeleknek szánt festékanyagoknál, betonpaneleknél, gipszvakolatoknál és cementes festékanyagoknál - kötőanyagként használják²⁰.

¹⁵ NICOM3, a 2009-es konferencia aktái

¹⁶ Különbő bemutatások és személyes beszélgetések vállalatok képviselőivel és egyetemi tudósokkal, NICOM3, Prága, 2009

¹⁷ Az információkból kitűnik, hogy az eredeti anyag valóban a szilikapernye volt, azonban ezt a gyártási folyamat során nagyobb részecskébe préselték össze.

¹⁸ Az információkból kitűnik, hogy a TiO_2 ebben a termékben nem nano, hanem valamivel nagyobb méretű: mikrométer-nagyságrendű

¹⁹ <http://www.nanogate.de/en/>

²⁰ <http://www.italcementigroup.com/ENG/Italcementi+Group/>



0-6 ábra Baloldalon: „Az EMACO® Nanocrete mérete. Jobboldalon: A római Jubilee Church, mely a TiO_2 hozzáadásával létrehozott fotokatalitikus beton egyik leggyakrabban emlegetett sikertörténete. Alapanyag: TX Active (TX Arca) az Italcementi csoporttól.

Nem találtuk semmi jelét a CNT vasbeton használatának. Ennek okaiként például a CNT drágaságát és annak mátrixba való diszpergálásának nehézségeit említették. Azonban a CNT betonnál való alkalmazhatóságának lehetőségeit tanulmányozása egy folyamatban levő kutatási terület.

A szigorú minőségi követelmények miatt az anyagok fejlesztése általában 5 és 10 év közötti időt igényel). A szilikapernye terén újabb fejlesztések várhatók, melyek a jelentős mennyiségű újrahasznosított betonaggregátum-darabokat tartalmazó beton stabilizálását célozzák, de a felhasznált adalékanyagok terén is, a megkötési folyamat optimalizálását.

3.3 Burkolóanyagok és festékanyagok

Az építőiparba bevezetett nanotermékek közül valószínűleg a burkolóanyagok és festékanyagok voltak a legsikeresebbek a piac meghódításában: *„Ha egy átlagos építőtelepen egyáltalán találunk nanotermékeket, messze a legvalószínűbb, hogy az egy nano-festékanyag vagy egy nano-burkolóanyag”*^{21, 22}. A díszítő burkolóanyagok a leggyakoribbak, azonban nagy teljesítményű építőipari burkolóanyagok - pl. ipari födémburkolatok - is előfordulnak. A nanotechnológia a következőknek köszönheti sikerét a festékanyagok és burkolóanyagok terén:

1. a nanorészecskék jobban lépnek kölcsönhatásba az alapfelülettel mint nagyobb szemcseméretű megfelelőik, mivel mélyebbre hatolnak abba, jobban lefedik azt és a burkolat-felület kölcsönhatás fokozottabb, ami egy tartósabb felületburkolást eredményez.
2. a nanorészecskék a látható fény szempontjából átlátszók.
3. az átlátszóság lehetővé teszi újszerű adalékok használatát, melyek újabb jellemzőkkel - pl. nagy karcolásállósággal vagy UV-ellenállással, IR elnyeléssel vagy visszaveréssel, tűzállósággal, elektromos vezetőképességgel, baktériumölő és öntisztító jellemzőkkel - ruházzák fel a különben átlátszatlan burkolóanyagokat.

Ezek új burkolórendszerek kifejlesztéséhez vezettek, melyek majdnem minden elképzelhető felületen – műanyagfelületektől acélfelületekig – alkalmazható.

A nanoburkolók termékcsaládjából a legismertebbek a baktériumölő burkolók (TiO_2 , ZnO vagy Ag hozzáadása), fotokatalitikus „öntisztító” burkolók (TiO_2 vagy ZnO), UV- és IR-visszaverő vagy -elnyelő burkolók (TiO_2 vagy ZnO), tűzálló burkolók (SiO_2) és karcolásálló burkolók (SiO_2 vagy Al_2O_3). Ezeket általában (belső és külső) falburkolatok, fahomlokzatok, üveg és különböző útburkoló anyagok esetében használják.

²¹ Személyes kommunikáció

²² <http://www.soci.org/Chemistry-and-Industry/Cnl-Data/2009/16/Nanocoatings-incognito>

Fotokatalitikus, baktériumölő és öntisztító falfestékek

A nano falfestékeket általában fotokatalitikus, baktériumölő vagy öntisztító hatásuk miatt alkalmazzák. Öntisztító, fotokatalitikus burkolóanyagok például az Arctic Snow Professional Interior Paint (Arctic paint LTD) (TiO_2), Cloucryl (Alfred Clouth Lack-fabrik GmbH&Co KG)²³ (ZnO) vagy az Amphisilan (Caparol)²⁴. A baktériumölő hatású nano-Ag-alapú burkolóanyagok például a Bioni Hygienic (Bioni CS GmbH) (lásd még 0-7 ábra)²⁵. Könnyen tisztítható, víz- és olajtaszító burkolóanyag például a Clariant által gyártott Fluowet ETC100 (CF-polimer-alapú).



0-7 ábra Baktériumölő hatású, nano-méretű ezüstrészecskéket tartalmazó, klinikákban és kórházakban használatos falburkoló anyag

Nano-burkolóanyagok felfelületekre

A fából készült termékeknek szánt nano-burkolóanyagok falakon vagy külső homlokzatokon használhatók, de parkettpadlókon és beltéri bútorzaton használhatók, ahol víztaszító (vagy egyes esetekben olajtaszító) hatásra, karcolásállóságra és UV-védelemre van szükség. Bár a piacon több ilyen termék kapható, az első generációs termékek minősége miatt szkepticizmus övezi főként a víztaszító és UV-védő burkolatokat²⁶. Ezért az új generációs burkolóanyagoknak nehéz bebizonyítaniuk létjogosultságukat, és ezért az építőtelevi alkalmazásukra nagyon kevés példa van.

A BYK Additives and Instruments²⁷ egyike azoknak a vállalatoknak, melyek az új generációs UV-védő burkolatokat reklámozzák. Ezek szerves UV-elnyelő-alapúak²⁸ vagy a ZnO és CeO_2 fém-oxid-alapúak. A TiO_2 -ot kevésbé használják átlátszósága és fotokatalitikus reaktivitása miatt.

Nagy karcolásállóságú, nano- SiO_2 -tartalmú falakk például a Bindzil CC30 (Baril Coatings), Nanobyk 3650 (BYK Additives and Instruments) és a Pall-X Nano (Pallmann). A Nanobyk 3600 (BYK Additives and Instruments) nanoméretű Al_2O_3 részecske-alapú nagy karcolásállóságú burkolóanyag.

A külső koptatótényezőkkel - pl. UV sugarak vagy karcolás - szemben a fa jellemzői közé tartozik a bonyolult vegyi anyagok, mint pl. a cersav kibocsátása, melyek idővel kifakítják a fa felületét. Ha a fa felületét nanoanyag-tartalmú burkolóanyaggal kezelik (pl. Hydrotalcite $\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Nuplex), ez a folyamat lelassítható. Ilyen típusú termékeket a BYK is gyárt.

A fát a víz vagy olaj ellen óvó nano-burkolóanyagok például a 2937 GORI Professional Transparent (forgalmazza a Dyrup, Dánia)²⁹, a Percenta Nano Wood & Stone Sealant³⁰ (a fa-

²³ http://www.clou.de/frontend_live/start.cfm

²⁴ a kapcsolódó költségek miatt mikrométer nagyságrendű TiO_2 -ot tartalmaz, azonban nagy karcolásállóság érdekében nano- SiO_2 -ra van szükség.

²⁵ <http://www.bioni.de/index.php?lang=en>

²⁶ Személyes kommunikáció különböző burkolóanyag-gyártókkal és a fával dolgozókkal

²⁷ <http://www.byk.com>

²⁸ azaz hidroxifenil-benzotriazolok, hidroxifenil-benzofenonok, hidroxifenil-S-tiazinok vagy oxálanilidek

²⁹ www.dyrup.com

és kőanyagok megóvása víz és olaj ellen, valószínűleg CF-polimer-alapú), Pro-Sil 80 (gyártja a NanoCer³¹) vagy a Nanowood (gyártja a Nanoprotect³²). Azonban ezek közül egyesek a nanoméretű vízben oldott zsír „micella”-alapúak. Bár ezeket a termékeket nanotechnológiával gyártják, a micellákat nem lehet nanorészecskének tekinteni, ezért ezek a burkolóanyagok sem tekinthetők nano-burkolóanyagoknak.

Nano-burkolóanyagok üvegfelületekre

Az üvegfelületeknek szánt öntisztító, fotokatalitikus, hőálló, antireflexiós és ködtelenítő hatású burkolóanyagok mellett érdekes fejlesztések vannak folyamatban a beltéri légkondicionálás (az infravörös sugarak és látható fény meggátlása) terén. Úgy (re)aktív, mint passzív megoldások léteznek. A passzív megoldások az állandó hatású vékony fóliák³³. Az aktív beltéri légkondicionáló megoldások a termokromikus, fotokromikus vagy elektrokromikus technológián alapulnak, és a hőmérsékletre, fényerőre vagy áramfeszültségre reagálnak, melyek hatására, az épület hűvösen tartása érdekében változtatnak infravörössugár-elnyelő képességükön. Az utóbbi az egyetlen rendszer, melyet manuálisan lehet állítani. Ha az üvegfelületet egy világításkapcsolóhoz hasonló tárgy érintésével áramfeszültség éri, az üvegfelületre felvitt volfrám-oxid réteg átlátszatlanná válik, és több infravörös sugarat nyel el (lásd pl. 0-8 ábra).



0-8 ábra (baloldalon) Az épületek üveghomlokzata nagy teret biztosítanak a nanotechnológiai újításoknak az építőiparban (jobbaldalon) Elektrokromikus ablaküveg.

3.4 A nanotechnológia és az infrastruktúra

A fenntarthatóság és környezetszennyezés korlátozása terén a kutatási és fejlesztési tevékenységek a közúti forgalom által okozott légszennyezés csökkentésének lehetőségét vizsgálják, egy TiO₂-aktivált infrastruktúra segítségével. Ennek érdekében olyan termékeket fejlesztettek ki, mint a NOxer^{®34} útburkoló betonelemek vagy a KonwéClear³⁵ cement-alapú aszfaltburkolat (lásd 0-9 ábra). Azonban több vállalat, mint az ItalCementi és a Heidelberg Cement, téglák, blokk téglák, panelek, burkolólapok vagy hangzáró falak formájában gyártja az ilyen jellegű anyagokat.

³⁰ <http://en.percenta.com/nanotechnology-wood-stone-sealing.php>

³¹ <http://www.intelcoats.com/nanop%20Indnanocer%20engl.html>

³² <http://www.nanoprotect.co.uk/wood-protection.html>

³³ Ezeket reklámozó vállalatok például az Econtrol[®]-Glas GmbH & Co, a 3M és a Saint-Gobain

³⁴ <http://www.eurovia.com/en/produit/136.aspx>

³⁵ <http://hbo-kennisbank.uvt.nl/cgi/av/show.cgi?fid=3698>



0-9 ábra Balról jobbra: NOxer®-rel burkolt járda Japánban, TX Aria útburkoló blokkteglák és alagútburkolók (Italcementi), egy KonwéClear út (Bouwend Nederland Podium 22, 2006. dec. 14.).

3.5 Szigetelőanyagok

Az építőiparban használt nanoanyagok közül a szigetelőanyagok kissé különösek olyan szempontból, ezek az anyagok gyakran nem tartalmaznak nanorészecskéket, azonban nanohólyagokból vagy nano-lyukakból álló nano-habból (vagy aerogélből) készültek. Ez a különbség főként munkaegészségügyi szempontból rendkívül fontos, azt sugallva, hogy ezen nanoanyagok használata várhatóan nem jár *nano-specifikus* egészségügyi kockázatokkal.

A nanoporózus szigetelőanyagok, mint az aerogélek és egyes polimer nanohabok, akár 2–8-szor hatékonyabbak lehetnek, mint a hagyományos szigetelőanyagok (0-1 ábra). Az napjainkban hőszigetelésre használt aerogélek legnagyobb része szilika- vagy szén-alapú, és térfogatuknak kb. 96 %-a levegő³⁶. Ilyen például az Insulair® NP nanoporózus géles szigetelőtakaró (gyártja az Insulcon B.V.³⁷ (0-10 ábra), mely rugalmas és kifejezetten szélsőséges hőmérsékleti viszonyokra tervezték.



0-10 ábra Balról jobbra: feljavított szigetelés aerogél-alapú anyagokkal; aerogél: kiűrtett nanopórusok a SiO_2 mátrixban³⁸; Rugalmas nanoporózus szigetelőtakaró (gyártja az Insulcon B.V. (2x)

Egyéb ilyen termékek a Roof Acryl Nanotech (amely nano-strukturált fluor poliuretán kötőanyag-alapú, fotokatalitikus vas-oxid felső réteggel kombinálva)³⁹ (gyártja a BASF) és a Relius Benelux, a tetők meleg és hideg elleni védelmére, a BASF által gyártott PCI Silent hangszigetelésre, a Spaceloft (kifejezetten az építőiparnak fejlesztették ki) és a Pyrogel XT (gyártja az Aspen Aerogels)⁴⁰, melyek nano-porózus szilika struktúra alapúak, a Pyrogel XTF és a Pyrogel 2250 (gyártja az Aspen Aerogels), melyek nano-porózus szilika struktúrán alapulnak, és kifejezetten a kivételes tűzvédelemre fejlesztették ki, az Aspen Aerogels által gyártott Cryogel Z, mely nano-porózus szilika struktúrán alapulnak, és kifejezetten a kivételes hideg elleni védelemre fejlesztették ki.

³⁶ <http://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel>

³⁷ http://www.insulcon.com/page/products/Microporous_and_Nanoporous_products.htm

³⁸ <http://www.spaceflightnow.com>

³⁹ <http://www.relius.nl/ViewDocument.asp?DocumentId=419&MenuId=90&MenuLabel=News>

⁴⁰ <http://www.aerogel.com/>

4. Egészségügyi kockázatok

4.1 Bevezetés

Egyre több bizonyíték gyűl össze arra nézve, hogy a nano-anyagok veszélyesebbek lehetnek az emberi szervezetre, mint mikron-méretű megfelelőik. Itt ki kell hangsúlyozni a „*lehet*” szót, mivel jelen pillanatban (2009-ben) túl kevés ismeret birtokában vagyunk ahhoz, hogy általánosítani lehetne. Ezért azt ajánljuk, hogy amikor ilyen jellegű anyagokkal dolgoznak, megfelelő óvatossággal járjanak el. A nano-anyagok újszerű káros hatását két fő tényező befolyásolja: a *méret* és az *alak*.

A nanorészecskék (2-dimenziós: nanorudak, 3-dimenziós: nanorészecskék) apró mérete miatt elektronikus jellemzőik eltérőek lehetnek, és ezt vegyi reaktivitásuk tükrözi, ezért az emberi szervezet normális működésére agresszívebben hathatnak. Például a megvizsgált nanoanyagok egy részének fokozottabb gyulladásokozó hatása van (az ún. oxidatív stressz miatt), hatékonyabban tömörülnek vagy ragadnak az emberi szervezet bizonyos szerveihez, megakadályozva azok normális működését. Ezen felül, apró méretük miatt felületük területe viszonylag sokkal nagyobb részecske-térfogatukhoz (és tömegükhöz) képest, ezért jelentősen reaktívabbak tömegegységenként.

A méret csökkenése és az elektronikus jellemzők változása fizikai viselkedésükre is kihat. Íme néhány példa:

- A nanorészecskék annyira kicsik, hogy a gázokhoz hasonlóan viselkednek,
- A nanorészecske annyira apró lehet, hogy mélyebbre hatolhat a tüdőben és könnyebben bekerül a vérkeringésbe,
- más vegyi anyagoktól eltérően az orr idegrendszere is felszívhatja és „könnyen” eljuthat az agyba⁴¹,
- bizonyos nanorészecskék áthatolhatnak a méhlepényen és eljuthatnak a magzathoz⁴²,
- méretük és felületi jellemzőik miatt az emberi szervezet olyan részeibe(sejtekbe, szervekbe) is eljuthatnak, melyek ilyen behatolások ellen jó védelemmel rendelkeztek nagyobb méretű részecskék esetében,
- és méretük és felületi jellemzőik miatt könnyebben áthatolnak az emberi bőrön, mint nagyobb méretű megfelelőik, főként ha a bőr felülete kissé sérült (egészségtelen, száraz, napégett, horzsolásos).

méretük mellett a nanorészecskék alakja is kulcsfontosságú szerepet játszik káros viselkedésükben. Például, olyan esetekben, amikor a részecskék különben viszonylag nem károsak, a nanorudak tűként viselkedhetnek, és átszúrhatják az emberi bőrt. Azonban ennek ellenkezőjét is megfigyelték: léteznek olyan nanorészecskék, melyek (alakjuk és felületi jellemzőik miatt) áthatolhatják az emberi akadályokat.

Más olyan tényezők, melyekről kimutatták, hogy fontos szerepet játszanak a nano-tipikus egészségügyi kockázatok megjelenésében, az aggregálási és tömörülési jellemzők, valamint a morfológia (amorf vagy kristályos szerkezet). Ezek is befolyásolják a nano-méretű anyagoknak való kitettség esélyét, illetve az illető anyagnak való kitettséggel járó potenciális

⁴¹ Oberdorster G et al. 2004, Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology* 16 (6-7): 437-445

⁴² Hagens WI et al. 2007, What do we (need to) know about the kinetic properties of nanoparticles in the body? *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 49: 217-229

veszélyek súlyosságát. Ennek ellenére, függetlenül a természetükből eredő veszélyektől, a legfontosabb tényezője a nanoanyagok vagy -termékek használatával járó veszélyek előfordulásának a kitettség esélye.

4.2 A kitettség módok

Amikor nanorészecskéknél való kitettségről beszélünk, elsősorban az építőmunkások vannak kitéve (majdnem kivétel nélkül) a nanotermékeknek. Ez befolyással bír a munkásnak a termékben levő nanorészecskéknél való tényleges kitettségére. Például amikor egy munkás nanorészecskéket tartalmazó port lélegez be, a nanorészecske adagok, melyeknek a munkás ki van téve azoknak a porban való oldhatóságától függnek. Ha a por oldhatatlan, a nanorészecskék egy része az anyagmátrixban marad, és a munkás csak azoknak a nanorészecskéknél van kitéve, melyek a porszem felületén vannak. Viszont, ha a por oldódó, a munkás a porszemben található összes nanorészecskének ki van téve.

A mindennapi tevékenységeinek és az építőmunkás által kezelt termékek jellegétől fogva a belélegzés által a port gerjesztő (vágás, csiszolás, fúrás vagy megmunkálás) nanoanyagoknak vagy a festékszórásból származó aeroszoloknak való kitettségéből származó egészségügyi kockázatok esélye a legnagyobb. A bőrön való áthatolás is szerepet játszik (noha sokkal kevésbé fontosat), de igazi gondná válhat, amennyiben a testnek elég nagy felületét védtelenül hagyják⁴³. Az elsőfokú lenyelés általi kitettség várhatóan nem okoz gondot, amennyiben betartják az egyéni higiénia vonatkozó előírásokat. A másodfokú lenyelésnek (a légutak természetes tisztítási mechanizmusai miatt bekövetkező belélegzésnek) való kitettség azonban veszélyes, ha belélegzés történik.

Belélegzés általi kitettség

Általános tapasztalat por és aeroszol belélegzése esetén: minél kisebb a részecske, annál mélyebbre hatolhat a tüdőben mielőtt lerakódna, és annál súlyosabb hatásuk az egészségre. A következő tipikus tüneteket figyelték meg (NEAA 2005 és a benne foglalt hivatkozások alapján)⁴⁴:

- A légutak begyulladás
- Hörghurut
- Asztma
- Kardiovaszkuláris rendellenességek

Azonban a nanorészecskék esetében ez a megfigyelés többé nem érvényes, és a belélegzett nanorészecskék nagy része az orrban lerakódik⁴⁵. A testben történő bármilyen további terjedést illetően megfigyelték, hogy bizonyos nanorészecskék átvándorolnak az idegrendszerbe, az agyszövetbe és a más olyan szervekbe, mint a vér, szív, máj vagy csontvelő, ahol gyulladást okozhatnak, ami másodlagos rendellenességekhez vezethetnek

⁴³ A bőrt általában jó akadálnak tekintik a részecskék behatolása ellen. Azonban napjainkban ezt a kijelentést az újabb kutatások megkérdőjelezték, melyek kimutatták, hogy bizonyos nanorészecskék vegyi jellegük, méretük, alakjuk és a bőrrel érintkező, a részecskéket tartalmazó anyagszerkezet miatt áthatolnak a nyújtott bőrön (például a csuklónál) vagy a sértetlen bőrszöveten (Muller-Quernheim, 2003, <http://www.orpha.net/data/patho/GB/uk-CBD.pdf>; Tinkle et al. 2003, *Environ. Health Perspect.* 111:1202-8; és Ryman-Rasmussen et al. 2006 *Toxicol. Sci.* 91:159-65).

⁴⁴ NEAA 2005. Particulate Matter: a Closer Look, www.rivm.nl, Netherlands Environmental Assessment Agency, E. Buijsman, J.P. Beck, L. van Bree, F.R. Cassee, R.B.A. Koelemeijer, J. Matthijsen, R. Thomas és K. Wieringa.

⁴⁵ ICRP 1995. Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság

(Oberdorster et al. 2004 és az ott található hivatkozások⁴¹; és a téma egy újabb megvizsgálásáért lásd Politis et al. 2008⁴⁶ mint az irritáció, gyulladás, sejtelhalás, rendellenesen magas sejtburjánzás, DNS-károsodás vagy hormonzavar (Donaldson et al., 1996; Zang et al., 1998).

4.3 Néhány nanorészecske által okozott egészségügyi és biztonsági problémák

Bár a nanorészecskék ártalmas hatásával kapcsolatban az ismeretek még meglehetősen hiányosak, a folyamatban levő kutatások első eredményei már rendelkezésre állnak. A CNT, TiO₂, SiO₂ és ezüst az eddig legbehatóbban vizsgált nanorészecskék.

Az egyes nanorészecskék toxicitási profilja

A CNT nemrég került a média figyelmébe amiatt, hogy a toxicitási vizsgálatok azbeszt-szerű viselkedést mutattak ki a tüdőszövetben⁴⁷. Azonban a megfigyelések szerint a toxicitás úgy tűnik, a hossz-átmérő aránytól, az agglomerációs állapottól, a felület jellemzőitől és a fémkatalizátorok kis szennyezettségétől függ⁴⁸.

A TiO₂ anatáz vagy rutil formájában használható, és az elsőt (melyet általában fotokatalitikus alkalmazásokban használnak) tartják károsabbnak⁴⁹. Az International Risk Governance Council (Nemzetközi Kockázatkezelési Tanács) jelentése szerint a sértetlen bőr nano-méretű TiO₂-nak való kitettsége nem ártalmas az emberre⁵⁰, azonban a sérült bőrön áthatolva káros hatásai lehetnek⁵¹. A NIOSH átfogó áttekintést szolgáltat az egészségre gyakorolt hatásokról⁵². A nano-TiO₂ (bizonyos feltételek között) genotoxikus hatást gyakorolhat, és belélegzés esetén gyulladást okozhat. Az anatáz TiO₂-nak való hosszan tartó kitettség esetén rákkeltő hatás jeleit figyelték meg, DNS károsodást és a magzat központi idegrendszerének fejlődését érintheti, azt sugallva, hogy az emberre reprotoxikus hatása lehet⁵³.

A SiO₂ amorf vagy kristályos szerkezetű lehet. Az IRGC^{54,55} szerint, a szintetikusan gyártott amorf nano-SiO₂ vízben oldható, nem ártalmas és általában a nem-nano amorf szilika porhoz hasonlóan kezelendő. Azonban a gyártási módszer következtében az amorf SiO₂ kristályos SiO₂-dal szennyeződhet, ami a kristályosság részarányának függvényében befolyásolja a teljes minta ártalmasságát. A kristályos szilika rendkívül ártalmas, és szilikózist okozhat foglalkozási kitettség esetén.

⁴⁶ Politis M, Pilinis C, Lekkas TD 2008. Ultra Fine Particles and Health Effects. Dangerous. Like no Other PM? Review and Analysis, *Global NEST Journal*. Vol 10(3), 439-452 o.

⁴⁷ például: Poland CA, et al. 2008, *Nature Nanotechnology*, Vol 3, 2008. július, 223. o.; Pacurari M et al 2008 *Environmental Health Perspectives*, Vol 116, Nr. 9, 1211; Kostaleros K 2008., *Nature Biotechnology*, Vol 26, Nr. 7, 774-776

⁴⁸ Pulskamp K et al 2006 *Toxicology Letters*, 168, 58-74; Wick P et al. 2007 *Toxicology Letters*, 168, 121-131

⁴⁹ Sayes CM et al 2006 *Toxicol. Sciences* 92(1), 174-185

⁵⁰ IRGC 2008. Risk Governance of Nanotechnology Applications in Food and Cosmetics, ISBN 978-2-9700631-4-8

⁵¹ SCCP 2007. A kozmetikai termékekben levő nanoanyagok biztonságával kapcsolatos vélemény, elfogadva 2007. december 18-án

⁵² NIOSH tervezet 2005. A titán-dioxidnak való foglalkozási kitettséggel járó egészségügyi kockázatok felmérése és javallatok, 2005. nov. 22-i tervezet

⁵³ Simizu M et al. 2009 *Part. Fibre. Toxicol.* Vol 6, 20; Bhattacharya K et al. 2008 *Part. Fibre. Toxicol.* Vol 6, 17

⁵⁴ International Risk Governance Council, 09-2008; ISBN 978-2-9700631-4-8

⁵⁵ Merget R et al. 2002 *Arch. Toxicol.* 75:625

A nano-ezüst emberre gyakorolt káros hatásáról keveset tudunk. Wijnhoven SWP et al. (2009)⁵⁶ áttekintették az ismerethiányt, és arra a következtetésre jutottak, hogy bár a közönséges ezüst viszonylag ártalmatlan, belélegzés vagy lenyelés esetén a nano-Ag bekerülhet a vérkeringésbe, és a központi idegrendszerbe kerülhet, ahol káros, a közönséges ezüsthöz súlyosabb rendellenességeket válthat ki. Annak magyarázata, hogy súlyosabb következmények várhatók, a nanorészecske nagy felülete, ami viszonylag nagyobb koncentrációjú oldott (és reaktív) ezüst-ionok kibocsátását idézi elő.

Foglalkozási kitettségi kockázatok

Az építőmunkások nanorészecskéknek való foglalkozási kitettségével járó kockázatok felmérésére kevés információ áll rendelkezésre. A nanotermékeknek általi por vagy aeroszolok belélegzése formájában megjelenő kitettség bizonyos mértékben nyilvánvaló. Azonban a nanotermékek megmunkálásából vagy kezeléséből eredő kitettségi kockázatok sokkal kevésbé nyilvánvalók. Erre kezdetben néhány utalást Vorbau et al. (2009), Koponen et al. (2009) és Kaegi et al. (2008)⁵⁷ munkáiban lehet találni. Az első tanulmány szerint azáltal, hogy egy burkolóanyaghoz nanorészecskéket adnak hozzá, még nem kell feltétlenül arra gondolni, hogy a létrehozott bevonat fokozott kopásnak lesz kitéve. A második tanulmány kimutatta, hogy csiszolás esetén a nanorészecskéket nem a megvizsgált burkolóanyagok gerjesztették (bár a gerjesztett porszemek mérete mikrométer-nagyságrendű), és ezzel ellentétben a csiszológép által kibocsátott ultrafinom részecskék többségben vannak az 50 nm-nél kisebb részecskékkel szemben. A harmadik tanulmányból azt sugallja, hogy a nano-TiO₂ nem a megszáradt burkolatból ered, hanem abban a pillanatban kerül a környezetbe, amikor a kötőanyaggal együtt „letörik” a kopás során. Ezek a kezdeti eredmények biztatóaknak tűnnek olyan értelemben, hogy nem figyeltek meg nanorészecske-kibocsátást *csak úgy*. Azonban a témával kapcsolatos vizsgálatok még túl korlátozottak ahhoz, hogy további következtetéseket lehessen levonni a nanorészecskék általános kezeléséből eredő kitettséggel járó kockázatokról. És ezek az ismeretek ahhoz sem elegendőek, hogy Koponen, Vorbau és Kaegi megfigyeléseit a vizsgáltaktól eltérő típusú nanorészecskéknek való kitettségére is rávetíthessük.

4.4 A nanotermékek biztonságos használatának lehetséges megközelítései

A biztonságos munkahely biztosításának egyik követelménye, hogy tudatában legyünk a nanorészecskék lehetséges veszélyeinek, de viselkedésüknek is, amikor nanorészecskéket tartalmazó termékeket használunk. Azonban, amint ezt már fennebb is említettük, a nanorészecskék ártalmasságával kapcsolatos tényleges ismeretek (anno 2009) meglehetősen korlátozottak. Ugyanez érvényes a nanotermékek használata, tisztítása vagy karbantartása során kibocsátott nanorészecskékre is. Ez megnehezíti a megbízható kockázatfelmérést. Mindamellet a nanotermékek felhasználása az építőiparban valóság, és a közeljövőben növekedés várható ezen a téren. Ez felelősségteljes megközelítésre kötelez, és erről az Európában zajló nanotechnológiákkal kapcsolatos vitákból is kitűnik⁵⁸. Az ott vita tárgyát képező elővigyázatos megközelítés a helyzetnek megfelelő, a bizonytalanságok óvatos, alapos, méltányos és nyílt kezelésére irányuló stratégiával magyarázható, melyet a

⁵⁶ Wijnhoven SWP et al. 2009 *Nanotoxicology*, 1-30

⁵⁷ Vorbau M et al. 2009 *Aerosol Science* 40:209-217; Koponen IK et al. 2009 *Journal of Physics Conference Series*, 151, 012048; Kaegi R et al. 2008. *Environ. Pollut.* doi:10.1016/j.envpol.2008.08.004

⁵⁸ Lásd főleg Advisory Report of the Dutch Social Economic Council: *“Nanoparticles in the Workplace, health and safety precautions”*, 2009 Sociaal Economische Raad, Den Haag, Hollandia. A javasolt elővigyázatos megközelítés részben ezen az útmutató jelentésén alapul.

munkakörülményekre vonatkozó politika kontextusában kell bevezetni (az RI&E - Rizikó - Leltározás és Értékelés és a kapcsolódó cselekvési terv keretében). Röviden ez a stratégia a következőket helyezi kilátásba (lásd még 0-2 táblázat).

A legnagyobb prioritást élvező tevékenységekre való összpontosítás

A vállalatok számára praktikus segédeszközként azt ajánljuk, hogy az olyan munkahelyekre, melyeken nanorészecskéknek való kitettség várható, dolgozzanak ki jó munkagyakorlati előírásokat. A figyelmet igénylő tevékenységek és az intézkedések szigorúsága szempontjából hasznos lehet a nanorészecskéket a velük járó kockázatok szerint osztályozni. Íme egy egyszerű, három osztályból álló rendszer (a várható kockázatok súlyossága szerint, I-től - a legsúlyosabbak - III-ig - a legkevésbé súlyosak), amely az osztályozás alapjául szolgálhat⁵⁹:

- I Rostos oldhatatlan nanorészecskék (hossz > 5 µm).
- II Ismert rákkeltő, mutagén, asztmagén hatású vagy reprodukciós zavarokat okozó nanorészecskék, molekuláris vagy nagyobb részecske formájában.
- III Oldhatatlan vagy gyengén oldódó nanorészecskék (melyek nem sorolhatók a fenti osztályokba).

Az általános javallat, hogy kerüljék a belélegzést és a bőrrel való érintkezést. Az építőiparban a legnagyobb prioritást élvező tevékenységek a nanoanyagok és nanotermékek csiszolása,

0-1 táblázat Az elővigyázatos megközelítés építőkövei

| Az elővigyázatos nano-megközelítés építőkövei |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Nincs adat --- nincs kitettség <ul style="list-style-type: none"> - Kitettség megelőzése a foglalkozási higiéniai stratégia szerint (beleértve a potenciálisan rendkívül veszélyes nanorészecskék esetleges lecserélését) • Bejelentésre kötelezett nanotermékek összetétele gyártók és szállítók részére <ul style="list-style-type: none"> - A termék nano-tartalmának közlése a gyártási láncban - A termék nano-tartalmának bejelentése egy központi ügyintézési helyen, egyfajta adatbázis formájában • Kitettség regisztrálása a munkahelyen <ul style="list-style-type: none"> - A rákkeltő anyagok regisztrálásával azonos a nano-rostok és CMRS–nano-anyagok esetében - A reprotox regisztrálásával azonos egyéb oldhatatlan nanoanyagok esetében • Nyílt kockázatközlés <ul style="list-style-type: none"> - AZ MSDS-ben található információk az ismert nano-kockázatokról, azok kezeléséről és a hiányos ismeretekről - Kémiai biztonsági jelentés (REACH) igénylése az 1 tonna/év/vállalat mennyiséget meghaladó anyagok esetében • Nano-OEL-ek (foglalkozási expozíciós határértékek) vagy nano-referenciaértékek származtatása <ul style="list-style-type: none"> - Az építőtelepen kibocsátható nanorészecskékre |

fúrása, keverése, megmunkálás, vágása, permetezése, valamint a munkahely és a használt berendezések tisztítása. Az szükséges intézkedések azonosítása és a kitettség megelőzése érdekében a hagyományos foglalkozási higiéniai előírások alkalmazandók.

A nanotermékek bejelentése

⁵⁹ BSI 2007 (December 31), „Public Document” PD 6694-2:2007, „Nanotechnologies -- Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials.” Ez a dokumentum egy negyedik osztályt is meghatároz: oldható nanorészecskék. Azonban, mivel jelen kimutatás az oldhatatlan nanorészecskékről szól, ezt az osztályt kihagyjuk.

A 2009-es felmérés és a mélyreható interjúk eredményei azt mutatják, hogy az építőipari munkások és munkáltatók zöme nem igazán tud vagy kevésbé tájékozott a tevékenységeik során esetleg felhasznált nanotermekekről. És akkor hogyan tudnának egy megbízható kockázatfelmérést lebonyolítani?

A tájékoztatás az egyik legfontosabb követelmény, és a piacon tapasztalható egyre növekvő igény valamilyen formájú bejelentési kötelezettség bevezetését szorgalmazza (pl. Hollandiában (SER), Franciaországban és Svájcban). A bejelentés főként a legveszélyesebb és legmagasabb kockázattal járó nanotermekek esetében szükséges. Az Anyagbiztonsági adatlapokat (MSDS-ek) lehet arra használni, hogy ezek az információk eljussanak a gyártótól a termék felhasználójához. Az építőiparban tevékenykedő munkáltatók és munkavállalók lehetséges tevékenységei lehetnek például ezen kezdeményezések támogatása, az általuk használt termékek nanorészecske-tartalmával, valamint a nanorészecskéknek való kitettség esetleges ártalmas hatásainak elkerüléséhez szükséges óvintézkedésekkel kapcsolatos pontos információk követelése.

Nano referenciaértékek

Normális körülmények között a foglalkozási expozíciós határértékek (OEL-ek) azt a kitettségi szintet jelzik, mely alatt a munkavégzés biztonságosnak tekinthető. A nanorészecskék esetében azonban ezek az értékek nem léteznek. A *Nano referenciaértékek* (NRV-k), melyek meghatározás szerint az elővigyázatos megközelítés alkalmazásával származtatott elővigyázatossági expozíciós határértékek az OEL-ek megállapításáig jó megoldásnak bizonyulhatnak. Ilyenek például az „*alap-expozíciós határértékek*”, melyek a 0-3 táblázatban láthatók (a BSI 2007 nyomán).

0-3 táblázat Az oldhatatlan nanorészecskék kockázatainak osztályozása és nano referenciaértékek

| Osz tály | Leírás | NRV | Megjegyzés |
|-------------|---|---|--|
| I | Rostos; nagy méretarányú oldhatatlan nanoanyagok ^a | 0,01 rost/ml | Hasonló az azbesztrostokhoz |
| II | Bármilyen, molekuláris vagy nagyobb részecske formájában már rákkeltőként, mutagénként, reprodukív toxinként vagy érzékenyítőként besorolt nanoanyag(CMR) | 0,1 x a molekuláris vagy nagyobb részecskéjű formára érvényes meglévő OEL | Ezen anyagok potenciálisan fokozott oldódási sebessége nanorészecske formában fokozott biológiai felhasználhatósága. Ezért bevezettük a 0,1-es biztonsági szorzót. |
| III | Oldhatatlan vagy gyengén oldódó nanoanyagok, melyeket nem soroltak a rostos vagy CMRS részecskék osztályába | 0,066 x a molekuláris vagy nagyobb részecskéjű formára érvényes meglévő OEL | A NIOSH ⁶⁰ -hoz hasonlóan 0,066-os (=15x alacsonyabb) biztonsági szorzót ajánlunk. Egy alternatív ajánlott alapszint: 20 000 részecske/ml, a környezeti részecske-koncentrációtól különválasztva. |

^a A rost egy >3:1 méretarányú és 5000 nm-nél nagyobb hosszúságú részecske.

A vállalatok jegyzéke és a kitettség regisztrálása

⁶⁰ A NIOSH által az oldhatatlan nano-TiO₂ esetében leírt megközelítés alapján: NIOSH 2005, tervezet A NIOSH jelenlegi információs közlönye: A titán-dioxidnak való foglalkozási kitettséggel járó egészségügyi kockázatok felmérése és javallatok, 2005. November 22.

Az elővigyázatos megközelítés bevezetésének egy másik lehetőségét a holland Dutch SER szolgáltatja: a legveszélyesebb (azaz az I és II osztályba sorolt) nanorészecskéket tartalmazó nanotermékeket felhasználó vállalatoknál egy kitettséget regisztráló rendszer létrehozása. Az építőtelepen dolgozó építőmunkásnak nehéz lesz megítélni, hogy az egészségügyi és biztonsági kockázatokat célszerű és hasznos, illetve milyen körülmények között érdemes követni. Ismeretek hiányában azt ajánljuk, hogy a kitettségi jegyzékbe regisztrálják az (esetlegesen) kitett személyek (azaz a dolgozók) nevét, az anyagot (azaz a nanorészecskéket), az időpontot (azaz milyen időszakban) és a kitettség helyét (azaz a körülményeket), egy olyan rendszer keretében, melyet az azbeszt-szerű és CMR anyagok jelenlegi gyakorlatával összhangban tervezzenek meg. Ez a regisztrálási mód jól beilleszkedhet a kisvállalatok üzletvitelébe, és e nyilvántartás segítségével visszavezethető, hogy kik voltak kitéve az illető anyagoknak, valamint felbecsülhető kitettségük mértéke, amennyiben a jövőben valamely nanoanyag veszélyesnek bizonyul vagy bizonyos ártalmas hatásokat tapasztalnak.

Az ellenőrzés rétegesítése

Egy másik módja a meghatározatlan veszélyek megközelítésének egy adott munkahelyen és tevékenységen belül, valamint a potenciális kockázatok pragmatikus és elővigyázatos felmérésének egy úgynevezett ellenőrzés rétegesítő eszköz (CB) használata. Világszerte több fajta CB létezik, melyeket kis- és középvállalatok is használják (lásd Tischer et al. 2009 és az abban levő hivatkozások⁶¹). A CB egy javallatot társít, hogy a nanoanyagokhoz kapcsolódó kockázatokra, a porózusságra és nano-jellemzőkre, mint pl. a méret, alak és felületi reaktivitás, a felhasznált anyag mennyiségére és a kitettségi esélyre általánosított védőintézkedéseket írjon elő. Ilyen CB módszer például a Paik et al. (2008)⁶² által kidolgozott módszer.

⁶¹ Tischer M, Bredendiek-Kamper S, Poppek U, Packroff R 2009. How Safe is Control Banding? Integrated Evaluation by Comparing OELs with Measurement Data and Using Monte Carlo Simulation, *Ann Occup. Hyg.* Vol 53(5):449-462

⁶² Paik SY, Zalk DM, Swuste P. 2008. Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures. *Ann Occup. Hyg.* Vol 52(6):419-428

5. Lehetőségek a biztonságos munkahely biztosítását célzó további tevékenységekhez

Jelenleg a nanotermekek kezelésével, alkalmazásával és megmunkálásával kapcsolatos egészségügyi kockázatok nem igazán ismertek, és jobb megismerésük még gyermekcipőben jár. És ez a nanorészecskék egészségügyi és biztonsági profiljára, de a nanorészecskéknek való kitettséggel járó tényleges kockázataira is vonatkozik. Azonban, a makroszkopikus megfelelőikhez viszonyított nagyobb felület-térfogat arány, újszerű elektronikus jellemzők, eltérő hordozási kinetika és biológiai sors, valamint a módosult kémiai reaktivitás miatt a nanorészecskékkel szemben felmerült az a gyanú, hogy egyelőre előreláthatatlan és potenciálisan súlyos egészségügyi kockázatokkal járnak. Ez megnehezíti a megbízható kockázatfelmérést és kockázatkezelést, és az építőiparban máig nem dolgoztak ki olyan magatartási kódexeket vagy jó gyakorlati eljárásokat, melyek elősegítik az ismeretlen kérdések kezelését. Azonban a (veszélyes) vegyi anyagok kezelésével kapcsolatban szerzett ismeretek alapján olyan óvintézkedések vezethetők be, melyek lehetővé teszik a nanotermekek kezelésével kapcsolatos, jelenleg még ismeretlen egészségügyi kockázatok felelősségteljes kezelését. Ezt a stratégiát általában elővigyázatos megközelítésnek nevezik. E megközelítés kiinduló pontja a nanorészecskéknek való kitettség megelőzése foglalkozási higiéniai stratégia alkalmazásával. Ha a kitettséget sikerül megelőzni (hiányos kockázati adatok esetében), ez összhangban van a REACH alapelvekkel *nincs adat--- nem forgalmazható*. Az elővigyázatos megközelítés keretében a biztonságos munkahely kialakítása érdekében a következő lehetséges építőkockákat ajánljuk:

- Nincs adat --- nincs kitettség
 - Kitettség megelőzése a foglalkozási higiéniai stratégia szerint (beleértve a potenciálisan rendkívül veszélyes nanorészecskék esetleges lecserélését)
- Bejelentésre kötelezett nanotermekek összetétele gyártók és szállítók részére
 - A termék nano-tartalmának közlése a gyártási láncban
 - A termék nano-tartalmának bejelentése egy központi ügyintézési helyen, egyfajta adatbázis formájában
- Kitettség regisztrálása a munkahelyen
 - A rákkeltő anyagok regisztrálásával azonos a nano-rostok és CMRS-nano-anyagok esetében
 - A reprotox regisztrálásával azonos egyéb oldhatatlan nanoanyagok esetében
- Nyílt kockázatközlés
 - Az MSDS-ben található információk az ismert nano-kockázatokról, azok kezeléséről és a hiányos ismeretekről
 - Kémiai biztonsági jelentés (REACH) igénylése az 1 tonna/év/vállalat mennyiséget meghaladó anyagok esetében
- Nano-OEL-ek (foglalkozási expozíciós határértékek) vagy nano-referenciaértékek származtatása
 - Az építőtelepen kibocsátható nanorészecskékre

A megfelelő kockázatfelmérést tovább bonyolító tényező, hogy számos esetben a nano-specifikus nyersanyag-gyártó rendelkezésére álló információk elveszülnek a felhasználói láncban, és csak kis részük jut el az építőtelepen dolgozó munkáshoz. Ez a helyzet még rosszabb a (például) egy nanotermekeket tartalmazó építmény tatarozásában részt vevő munkások esetében (az építmény tulajdonosának tudatlansága miatt). A hatóságok és a nanoanyag-szállítók javíthatnak ezen a helyzeten.

Mivel ezen személyi szintű óvintézkedések bevezetése egy bonyolult feladat, főként az építőiparban tevékenykedő kis- és középvállalatok számára, azt ajánljuk, hogy jó munkagyakorlati előírásokat dolgozzanak ki egy sor nagy prioritású tevékenység esetében, melyeknél a kitettség várható, pl. a nano-burkolóanyagok és nanocement/-beton használata esetén. Ilyen tevékenységek például a nano-burkolóanyagok felszórása, a friss habarcsot tartalmazó nanoanyagok kezelése, a nanotermékek megmunkálása (pl. csiszolás vagy fúrás) vagy az ilyen tevékenységekben felhasznált berendezések tisztítása vagy szervizelése. A jó munkagyakorlatok kidolgozásában hasznos eszköznek bizonyulhat az Ellenőrzés rétegesítése. Segítségével a kockázatok a nanorészecskével, annak anya-anyagával (makroszkopikus megfelelőjével), a munkagyakorlattal és a munkakörülményekkel kapcsolatos ismeretek alapján osztályozhatók. A potenciális veszély súlyossága és a foglalkozási expozíció valószínűsége így felmérhető és egy 1 és 4 közötti kockázati skálához kapcsolható. A kockázati szinttől függően egy általános kockázatkezelési stratégia kidolgozása ajánlott, mely pl. *„szellőztessen”* vagy *„viseljen egyéni védőfelszerelést”* vagy *„zárt környezetben dolgozzon”* előírásokat tartalmazhat.

Léteznek a nanorészecskéknek a munkahelyen való kitettségének valós idejű mérésére szolgáló berendezések, azonban ezek általában drágák és nehezen kezelhetők. Már kifejlesztettek hordozható, könnyebben kezelhető és olcsóbb készülékeket, melyek az elkövetkező években fognak megjelenni a piacon, így elérhetőbbé válnak a nagyközönség számára. A nanorészecskék személyi kitettséggel kapcsolatos mérések az építőiparban még meglehetősen korlátozottak. A nanofestékekkel mázolt kopófelületeken végzett első mérések nem jeleztek semmiféle kitettséget a gyártott nanorészecskéknek, azonban ezek túlságosan korlátozottak ahhoz, hogy ezek alapján általános következtetéseket lehetne levonni a nanorészecskéknek való kitettségről az építőtelepen.