

Vasta-aineet biologisilta aseilta suojaautumisessa

Biokemian LuK -tutkielma

Laatija:
Lotta Moisio

17.2.2026
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Biokemia

Tekijä: Lotta Moisio

Otsikko: Vasta-aineet biologisilta aseilta suojaautumisessa

Ohjaaja: dosentti Jari Nuutila

Sivumäärä: 21 sivua

Päivämäärä: 17.2.2026

Biologiset aseet ja bioterrorismi ovat globaalisti merkittäviä uhkia terveydelle ja yhteiskunnalle. Biologisissa aseissa käytettäviin biologisiin agensseihin kuuluu erilaisia mikrobeja ja toksiineja, jotka aiheuttavat infektioita ja myrkytyksiä. Vaarallisimpien agenssien aiheuttama kuolleisuus on jopa yli 50 %, sillä kaikkia vastaan ei ole olemassa lääkitystä.

Vasta-aineita voidaan käyttää biologisilta aseilta suojautumiseen monella eri tavalla. Niitä voidaan hyödyntää erilaisissa immunomäärityksissä biologisten agenssien tunnistukseen, myrkytysten ja infektioiden hoidossa vastalääkkeinä sekä rokotteissa ennaltaehkäisyinä. Biologisten agenssien tunnistukseen on kehitetty biosensoreita ja ELISA-määrityksiä. Antitoksiineja, bispesifisiä vasta-aineita ja mRNA-vasta-aineita kehitetään lääkkeiksi myrkytyksiä ja infektioita vastaan. Ennaltaehkäisevillä rokotteilla kuten perinteisemmillä vektorirokotteilla tai uudemmilla nanorokotteilla voidaan indusoida vasta-aineiden tuottoa eli aktiivista immunisaatiota.

Vasta-aineet ovat monipuolisuutensa ja spesifisyytensä vuoksi erittäin potentiaalisia tulevaisuuden ratkaisuja suojautumiseen biologisia aseita vastaan. Vaikka joitakin vasta-ainelääkkeitä on jo markkinoilla, vaativat uudemmat innovaatiot, erityisesti immunomääritykset ja rokotteet kuitenkin vielä paljon kehitystä ja tutkimusta ennen kuin niitä voidaan hyödyntää terveydenhuollossa ja taistelukentillä.

Avainsanat: Biologiset aseet, biologiset agenssit, biotaisteluaineet, bioterrorismi, vasta-aineet, monoklonaaliset vasta-aineet, suojaautuminen, rokotteet, immunomääritys, biosensorit, ELISA

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Biologiset aseet	5
2.1	Mikrobit	6
2.2	Toksiinit	7
3	Havaitseminen – Immunomääritykset	9
3.1	ELISA	9
3.2	Biosensorit	10
4	Hoito – Vasta-aineterapia	12
4.1	Antitoksiinit	12
4.2	Bispesifiset vasta-aineet	13
4.3	mRNA-vasta-aineet	14
5	Ennaltaehkäisy – Rokotteet	16
5.1	Vektorirokotteet	16
5.2	Nanorokotteet	17
6	Johtopäätökset	19
	Lähteet	20

1 Johdanto

Biologisten aseiden käytön varhaisimpia esimerkkejä on ruton levittäminen 1300-luvulla (Avril ja muut 2024). Ruttoa sairastaneiden ihmisten ruumiita singottiin kaupungin muurien yli, jolloin rutto pääsi leviämään kaupunkilaisten keskuudessa aiheuttaen fyysistä ja psyykkistä vahinkoa. Sen seurauksena terveet ja sairaat ihmiset lähtivät kaupungista, mikä johti ruttoepidemian leviämiseen ja pahenemiseen. Rutto tappoi lopulta kolmasosan eurooppalaisista.

Naton julkaiseman kokoomateoksen ”Defence against bioterrorism” mukaan biologiset aseet aiheuttavat globaalisti kemiallisia aseita suuremmat terveysuhat (Radosavljevic ja muut 2018). Kemialliset aseet vaikuttavat paikallisesti, kun taas biologisten aseiden aiheuttamat vahingot voivat levitä ihmisten mukana ympäri maailmaa. Bioterrorismin kohdalla kysymys ei ole ”tapahtuuko jotakin” vaan ”milloin ja mitä”. Bioterrorismia pidetään siis nykyään jopa todennäköisenä uhkana. Hyvin suunniteltu ja harjoiteltu sekä nopeasti toteutettu epidemian torjunta voi vähentää mahdollisen hyökkäyksen seurauksia huomattavasti. Tämä edellyttää kuitenkin valmistautumista, mahdollisten uhkien tuntemista ja tunnistamista, sekä ennaltaehkäisevien ja hoitavien lääkkeiden saatavuutta.

Biologisten aseiden käytöstä aiheutuvat haitat eivät ole vain terveydellisiä vaan ulottuvat myös muualle yhteiskuntaan. Poikkeuksellinen kriisitilanne voi vaikuttaa siten myös esimerkiksi taloustilanteeseen. Covid-19 pandemia osoitti yhteiskunnan ja ihmisten haavoittuvuuden uusille biologisille uhkille (Avril ja muut 2024). Viruksen alkuperästä ei ole edelleenkään varmaa tietoa. On mahdollista, että zoonoosi syntyi luonnollisesti, mutta poissuljettua ei ole, etteikö se voisi olla levinnyt myös laboratoriosta vahingossa tai tahallisesti. Pandemian seurauksena opittiin kuitenkin paljon ja yhteiskunnallinen varautuminen näihin kriiseihin on jo paremmalla tasolla, kuin sitä ennen.

Vasta-aineet ovat osa elimistön luonnollista puolustusjärjestelmää eli immunitettia. Ne ovat valkosolujen tuottamia proteiineja, jotka tunnistavat tietyn antigeenin tai sen osan ja usein tekevät ne tehottomiksi. Tässä tutkielmassa tarkastellaan biologisilta aseilta suojautumista biokemiallisesta näkökulmasta, vasta-aineiden avulla. Vasta-aineet suojaavat elimistöä luonnollisesti patogeeneiltä, mutta niiden toimintaa voidaan tehostaa ja niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi biologisten aseiden tunnistuksessa. Biologisilta aseilta suojautuminen onkin jaettu tutkielmassa biologisten aseiden havaitsemiseen, infektioiden ja myrkytysten hoitoon sekä ennaltaehkäisyyn. Tutkielmassa esitellään muutamia mahdollisia biologisissa aseissa käytettäviä mikrobeja ja toksiineja sekä 2020-luvun tuoreita vasta-aineita hyödyntäviä innovaatioita, joilla biologisten aseiden ja niiden uhan aiheuttamia vahinkoja voitaisiin minimoida.

2 Biologiset aseet

Biologisilla aseilla tarkoitetaan mikrobeja, niiden osia sekä toksiineja, joita käytetään asetarkoituksessa yhdessä niitä levittävän asejärjestelmän kanssa biologisessa sodankäynnissä tai bioterrorismissa (Puolustusvoimat 2022). Biotaisteluaineella tai biologisella agenssilla sen sijaan tarkoitetaan ainoastaan aseiden biologista ainesosaa eli mikrobia tai toksiinia, jota voidaan käyttää ihmisten, eläinten, maaston, juomaveden tai elintarvikkeiden kontaminoimiseen. Biologisten aseiden kehittäminen, tuottaminen, varastointi, käyttö ja välittäminen on kielletty kansainvälisillä sopimuksilla, kuten vuoden 1975 BWC-kieltosopimuksella (engl. Biological Weapons Convention). Kaikki valtiot eivät kuitenkaan ole allekirjoittaneet sopimusta, ja myös bioterrorismin uhka on kasvanut bioteknologian kehityksen myötä.

Biologisten aseiden ja biotaisteluaineiden tutkiminen ja vastalääkkeiden kehittäminen on vaikeaa, sillä tutkimuslaboratorioissa täytyy olla niiden tutkimista varten tarvittavat laitteistot ja turvatoimet. Tutkimuslaboratoriot jaetaan neljään bioturvallisuusluokkaan 1–4, joissa jokaisessa on erilaiset vaatimukset tutkijoiden suojautumiseen, laboratoriolaitteistoon, ilmanvaihtoon ja näytteiden säilytykseen sekä kuljetukseen (Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Esimerkiksi bioturvallisuusluokan 4 eli tarkimmin valvotun luokan laboratorioissa tutkimus tehdään joko ylipaineistetussa tutkimuskaapissa tai ylipaineepuku päällä. Laboratorioon siirryttäessä on vaihdettava vaatteet ja poistuttaessa käytävä suihkussa. Materiaalien siirto vaatii läpianoautoklaavin. Biotaisteluaineita tutkitaan bioturvallisuusluokan 2–4 laboratorioissa vaarallisuuden ja tartuttavuuden mukaan. Esimerkiksi Ebolaa tutkitaan vain luokan 4 laboratorioissa. Uusien vakavia tauteja aiheuttavien biologisten uhkien tutkimus tehdään aina mahdollisimman suuren bioturvallisuusluokan laboratorioissa. Bioturvallisuusluokkaa voidaan laskea, jos agenssi osoittautuu turvallisuusluokkaa vaarattommaksi.

Laajamittainen biotaisteluaineiden levitys tapahtuisi todennäköisesti pääasiassa kontaminoimalla juomavettä ja elintarvikkeita tai aerosolien välityksellä (Puolustusvoimat 2022). Aina niiden levittämiseen ei kuitenkaan tarvita erikoisia keinoja, sillä epidemiat leviävät väestössä myös luonnollisesti. Poikkeusoloissa yhteiskunnan rakenteiden ja yleisen hygieniatason heikentyminen aiheuttaa ihmisten välillä entistä enemmän tartuntoja. Myös hyönteisiä, ohjuksia ja pommeja voidaan käyttää biotaisteluaineiden levitykseen. Seuraavaksi esitellään ihmisille erittäin haitallisia mikrobeja ja toksiineja, joita pidetään potentiaalisina uhkina biologisissa aseissa. Samoja mikrobeja ja toksiineja käytetään myöhemmin myös esimerkkeinä havaitsemisen, hoidon ja ennaltaehkäisyn yhteydessä.

2.1 Mikrobit

Francisella tularensis on gramnegatiivinen bakteeri, joka aiheuttaa tularemiata eli jänisruttoa (Avril ja muut 2024; Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Se on zoonoosi, jonka voi saada nimensä mukaisesti jäniksestä, mutta myös infektoituneen hyönteisen puremasta. Erityisen vaaralliseksi *Francisella tularensis*en tekee sen tarttuvuus, sillä infektoitumiseen tarvitaan vain 10 yksittäistä bakteeria. Sitä esiintyy pohjoisella pallonpuoliskolla ja Australiassa. Tularemiata hoidetaan antibiooteilla, jolloin kuolleisuus on pienempi kuin 2 %. Hoitamattomana tularemiata kuolleisuus on kuitenkin 30–60 %. Tularemiata on kehitetty rokote, mutta se ei ole vielä markkinoilla.

Filovirusiin kuuluvat **Marburg** ja **Ebola** aiheuttavat verenvuotokuumetta (Avril ja muut 2024). Ne ovat zoonoottisia RNA-virusia, mutta tarttuvat myös ihmiseltä toiselle veren, pintojen ja ilman kautta. Viruspartikkelit leviävät kehossa aiheuttaen tuhoa etenkin immuunijärjestelmälle ja verisuonille. Infektioon tarvitaan vain 1–10 viruspartikkelia ja kuolleisuus on 50–90 %. Näitä virusinfektioita hoidetaan pääosin oireenmukaisesti eli oireita lievittäen, mutta Zaire-tyypin Ebolaan on kuitenkin saatavilla myös vasta-ainelääkkeitä sekä ennaltaehkäisevä rokote. Marburgin ja Ebolan hoito vaatii järeitä eristystoimia sairaaloissa, joissa potilaita hoidetaan, ja tutkimusta voidaan tehdä vain bioturvallisuusluokan 4 laboratorioissa.

Orthopox-virusten sukuun kuuluva **Variola-virus** aiheuttaa isorokkoa, jota pidetään yhtenä suurimmista biologisista uhista (Avril ja muut 2024). Isorokko hävitettiin 1980-luvulla rokottamalla, mutta viruskantaa on vielä tutkimuksia varten olemassa kahdessa laboratorioissa Venäjällä ja USA:ssa. Mikäli isorokkotapaus ilmenisi, kyseessä olisi laboratorion lähtenyt todennäköisesti tahallinen tartunta. Isorokon hävittyä sitä vastaan rokottaminen on lopetettu, eikä populaatiolla ole todennäköisesti enää immuniteettia sitä vastaan. Rokotteita ja joitakin antiviraalisia lääkkeitä varastoidaan kuitenkin edelleen. Samaan Orthopox-virusten sukuun kuuluvaa **MPXV:tä** (engl. monkeypox virus), joka aiheuttaa zoonoottista m-rokkoa, esiintyy kuitenkin eri puolilla maailmaa. Osa isorokkoa vastaan kehitetyistä lääkkeistä on potentiaalisia myös muiden sairauksien, kuten m-rokon, hoitoon, mutta tarve antiviraalisten lääkkeiden kehitykseen on edelleen suuri.

Yersinia pestis on gramnegatiivinen sauvamainen bakteeri, joka aiheuttaa ruttoa (Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Rutto on zoonoosi ja sen voi saada luonnollisesti esimerkiksi kirpun puremasta. *Yersinia pestis* aiheuttaa ihmisellä useimmiten paiseruton, septisen rutan tai keuhkoruton, joiden kuolleisuusaste hoitamattomana on jopa 50 %. Ruttoa esiintyy pääasiassa Afrikassa ja Etelä-Amerikan maaseudulla (Avril ja muut 2024). Siihen ei ole saatavilla rokotetta, ja hoito tapahtuu antibiooteilla, mutta myös resistenttejä bakteerikantoja on jo löydynt.

Keuhkorutto voi tarttua myös ihmiseltä toiselle, mikä lisää kuolleisuuden ja vähäisten hoitotapojen ohella *Yersinia pestiksen* uhkaavuutta mahdollisena bioaseena.

2.2 Toksiinit

Anthraxtoksiini on yksi itiöivän pernaruttoa aiheuttavan bakteerin *Bacillus anthraciksen* tuottamista virulenssitekijöistä (Avril ja muut 2024). Anthraxtoksiini koostuu kolmesta proteiinista; suojaavasta antigeenistä, letaalitekijästä ja turvotustekijästä. Kompleksi aiheuttaa kehossa immuunijärjestelmän lamaantumisen estämällä solusignaloinnin, jolloin patogeeneit pääsevät leviämään vapaasti. Pernaruton voi saada hengitysteitse, infektoituneesta haavasta, ruuan mukana tai kontaminoituneesta injektioneulasta (Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Hengitysteitse saatu infektio on vaarallisin, joskin ruhjeen kautta vereen joutuessaan infektio aiheutuu pienemmästä määrästä bakteereja. Pernarutto on vaarallinen immuunijärjestelmän lamaantumisen sekä bakteerin pitkään säilyvien itiöiden vuoksi, ja siksi sitä pidetään mahdollisena biologisena uhkana. Pernaruttoa hoidetaan laajakirjoisella antibioottikuurilla, mutta tehokkainta on torjua sitä rokottamalla mahdollisesti altistuvia ihmisiä sekä karjaa.

Botuliinineurotoksiineja tuottavat *Clostridium botulinum* -lajin gramnegatiiviset bakteerit ja muutamat muut harvinaisemmat Clostridium-suvun bakteerit (Avril ja muut 2024). Botuliinineurotoksiinit ovat halotoksiineja, jotka koostuvat raskas- ja kevytketjusta. Raskasketju sitoutuu hermopäätteeseen ja auttaa kevytketjua pääsemään hermosolun sisään, jossa kevytketju pilkkoo välittäjäaineiden vapautumiseen tarvittavaa reseptoriproteiinia. Asetylikoliini ei pääse vapautumaan (Sun ja muut 2024) ja tästä seuraa myrkytysoireita eli lihasheikkous, autonomisen hermoston häiriöt ja jopa kuolema, koska hermoimpulsseja ei lähde normaalisti (Avril ja muut 2024). Botuliinineurotoksiinit jaetaan yleisesti seitsemään vasta-aineiden avulla luokiteltuun alatyyppiin serotyyppiin A, B, C, D, E, F ja G. Lähiaikoina on tunnistettu myös uudet serotyypit H ja X (Sun ja muut 2024). A, B, E ja F serotyypit aiheuttavat suurimman osan ihmisten myrkytyksistä (Avril ja muut 2024; Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Myrkytyksen voi saada luonnollisesti esimerkiksi pilaantuneesta ruuasta, tulehtuneesta haavasta tai suolistosta levinneestä bakteerikannasta. Kaikki serotyypit ovat myrkyllisiä nieltynä, injektiona ja hengitettynä. Botuliinineurotoksiineja pidetään yksinä vaarallisimmista proteiineista, koska hyvin pienet pitoisuudet aiheuttavat vakavia oireita. Botuliinineurotoksiineja vastaan ei ole rokotetta, eikä myöskään antitoksiineja ole markkinoilla, mutta niitä on mahdollista saada erityistilanteissa viranomaisreittejä pitkin. Botuliinineurotoksiini A:ta eli Botoxia käytetään myös rentouttamaan lihaksia lääketieteessä sekä esteettisissä hoidoissa.

Ricinus communis -kasvi tuottaa siemeniinsä **risiini**-nimistä toksinia (Avril ja muut 2024). Kasvia esiintyy maailmanlaajuisesti ja siemenistä saatavaa risiiniöljyä käytetään esimerkiksi lääketeollisuudessa. Risiinimyrkytyksen voi saada hengitysteitse, ruoansulatusteitse tai injektion seurauksena. Risiinin toksisuus perustuu sen taipumukseen poistaa ribosomin aktiivisesta kohdasta adeniini, jolloin proteiinisynteesi loppuu ja solu kuolee. Myrkytyksen oireet ja niiden voimakkuus riippuu kehoon kulkeutuneen risiinin määrästä ja altistusreitistä. Ruoansulatusteitse saadun myrkytyksen oireet ovat usein maltilliset, mutta muut altistusreitit voivat johtaa jopa kuolettaviin seurauksiin. Risiinimyrkytykseen ei ole vastalääkettä, vaan potilaille annetaan oireiden mukaista hoitoa. Rokotteita ja vasta-ainelääkkeitä ollaan kuitenkin kehittämässä. Risiiniä on käytetty bioterrorismissa useita kertoja, esimerkiksi Barack Obama ja Donald Trump ovat saaneet risiinikirjeitä. Sen kohtuullisen helppo saatavuus teollisen käytön vuoksi sekä hoitokeinojen puuttuminen lisää bioterrorismin uhkaa ja tarvetta kehittää hoitokeinoja.

Stafylococcus aureus -bakteeria esiintyy luonnollisesti ihmisten ja eläinten iholla ja limakalvoilla, mutta se voi myös sairastuttaa vakavasti (Luo ja muut 2024). Sairastumisen ja infektion aiheuttavat *Stafylococcus aureuksen* erittämät virulenssitekijät, **stafylokokki-enterotoksiinit** (SE). Stafylokokki-enterotoksiinit voidaan jakaa viiteen serotyyppiin A-E (SEA, SEB, SEC, SED ja SEE) (Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Mahdollisena bioaseena on tunnistettu erityisesti **SEB** sen superantigeenisyyden vuoksi (Kim ja muut 2025). SEB yliaktivoi T-soluja, mikä aiheuttaa turvotusta ja septisen shokin. Toksiinin aiheuttaman tulehdustilan ja muiden fysiologisten oireiden vuoksi kuolleisuus on jopa 30 %. Stafylokokki-enterotoksiini-infektioiden hoito perustuu oireenmukaiseen hoitoon, sillä vastalääkkeitä ei ole vielä saatavilla (Centers for Disease Control and Prevention ja National Institutes of Health 2020). Rekombinanttirokotteita ja vasta-ainelääkkeitä ollaan kuitenkin näitäkin vastaan kehittämässä.

3 Havaitseminen – Immunomääritykset

Biotaisteluaineet on havaittava ja tunnistettava mahdollisimman nopeasti, jotta voidaan aloittaa lääkinnällinen suojautuminen ja siten suurempien vahinkojen ennaltaehkäisy ennen epidemian kehittymistä (Puolustusvoimat 2022). Biologisten uhkien havaitsemiseen kuuluu agenssien tunnistaminen ilmasta, maaperästä, juomavedestä, elintarvikkeista sekä kontaminoituneista ihmisistä ja eläimistä. Tässä luvussa esitellään muutamia tuoreita tapoja, joilla vasta-aineita hyödyntämällä voidaan tunnistaa biologisia agensseja.

3.1 ELISA

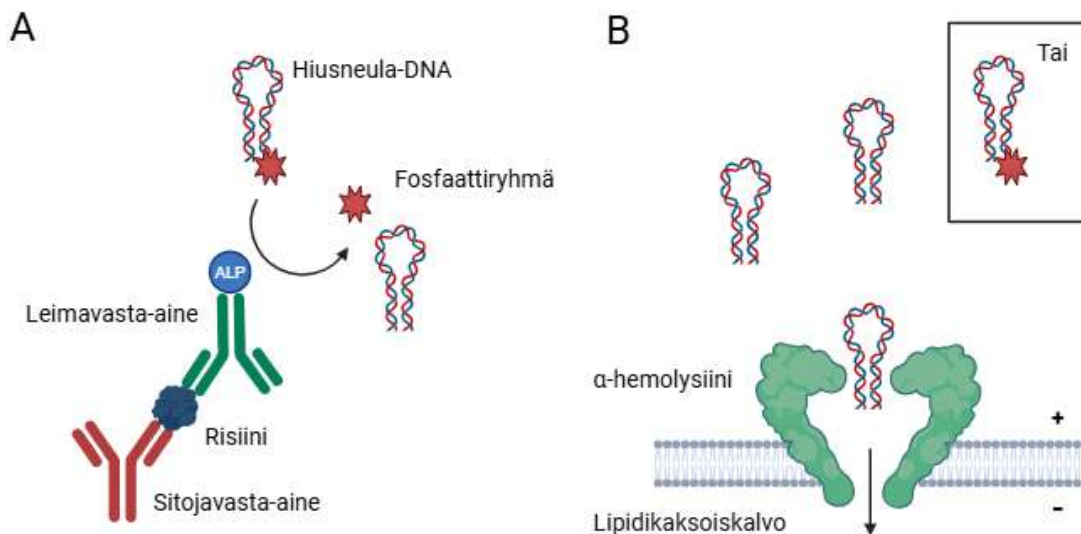
Elisa-määrityksiä eli entsyymivälitteisiä immunosorbenttimäärityksiä (engl. enzyme linked immunosorbent assay) käytetään havaitsemaan vasta-aineita tai analyyttejä, joita voidaan spesifisesti tunnistaa vasta-aineiden avulla. Sitoutumisen havaitseminen perustuu entsyymireaktioon, jossa entsyymi muuttaa substraatin havaittavaksi tuotteeksi ja muutoksen suuruus on verrattavissa analyytin määrään. Tällä periaatteella voidaan havaita ja tunnistaa myös biotaisteluaineita.

J. Chen ja muut (2025) ovat kehittäneet soveltavan ELISA-määrityksen, jonka avulla näytteestä voidaan tunnistaa risiniä. Määritys perustuu tavalliseen sandwich ELISA:an, mutta siihen yhdistetään nanohuokosteknologiaa, eli voidaan puhua NELISA:sta (engl. nanopore-assisted enzyme-linked immunosorbent assay). Substraattina käytetään fosforyloitua hiusneula-DNA:ta, josta entsyyminä toimiva alkaalinen fosfataasi (ALP) defosforyloi fosfaattiryhmättömiä hiusneula-DNA:ita, mikäli näytteessä on risiniä. NELISA-määrityksen tunnistusvaiheen periaate esitetty kuvassa 1A.

Tunnistusvaiheen jälkeen substraattiliuos, jossa mukana mahdolliset defosforyloidut hiusneula-DNA:t, kerätään talteen ja siirretään erilliseen nanohuokosmittaukseen (J. Chen ja muut 2025).

Nanohuokosmittauksessa kaksoislipidikalvolle on kiinnitetty α -hemolysiini, joka toimii nanohuokosena, ja jonka läpi mahtuu kerrallaan vain yksi molekyyli. Kalvon eri puolten välillä vallitsee jännite ja kulkee tasainen ionivirta, jota α -hemolysiinin läpi kulkevat molekyylit häiritsevät. Ionivirran ja jännitteen muutoksen suuruus ja varaus riippuu siitä, millainen molekyyli menee kalvon läpi. Tämän perusteella pystytään tunnistamaan, onko kyseessä fosforyloitu vai defosforyloitu muoto hiusneula-DNA:sta. Kalibrointikäyrän ja jännityksen muutosten esiintymistiheyden avulla voidaan määrittää kvalitatiivisen tuloksen lisäksi myös kvantitatiivisesti risiinin määrä näytteessä.

Nanohuokosmittauksen havainnekuva on esitetty kuvassa 1B.



Kuva 1. NELISA-määrityksen toiminta. **A** ELISA-määristys, jossa analyytinä risiini, leimavasta-aineeseen sidottuna entsyyminä alkaalinen fosfataasi (ALP) ja substraattina fosforyloitu hiusneula-DNA. ALP defosforyloi hiusneula-DNA:n risiinin läsnä ollessa. **B** Nanohuokosmittaus, jossa α -hemolysiinin läpi kulkee kerrallaan yksi fosforyloitu tai defosforyloitu hiusneula-DNA. Lipidikaksoiskalvolla on jännite, joka muuttuu molekyylin kulkiessa α -hemolysiinin lävitse. Kuvat on tuotettu J. Chenin ja muiden (2025) artikkelin dataa mukailien Biorenderillä.

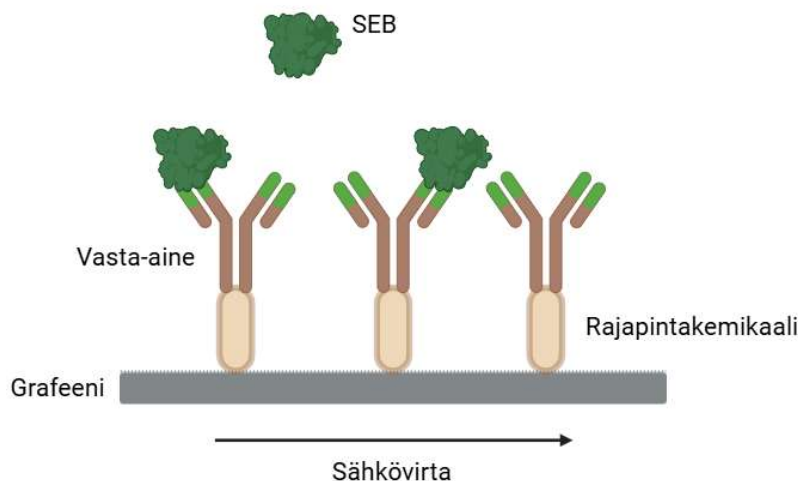
J. Chenin ja muiden (2025) kehittämä NELISA-menetelmä on perinteiseen ELISA:an verrattuna tarkempi ja herkempi estäen esimerkiksi optisen määrityksen taustaväristä johtuvat häiriöt. NELISA-määrityksellä pystyttiin luotettavasti mittaamaan jopa 2.46 fg/ml risiinipitoisuuksia, mikä on ihmiselle haitallista ja toksista määrää moninkertaisesti pienempi pitoisuus. Määrittystä on jo testattu maitonäytteillä ja sillä uskotaan olevan potentiaalia herkkään, kannettavaan elintarvikkeiden kenttätestiin tulevaisuudessa.

3.2 Biosensorit

Biosensorit koostuvat bioreseptorista ja muuntimesta. Muuntimen avulla reseptoripinnalla tapahtuva biologinen sitoutuminen muutetaan signaaliksi. Biosensorit voidaan jakaa alaryhmiin esimerkiksi muuntimen tyypin mukaan, jolloin eri alaluokkia ovat elektrokemialliset, optiset, piezoelektriset ja lämpötilaan perustuvat biosensorit (Morawska ja muut 2025). Lisäksi nykypäivänä on kehitteillä myös nanopartikkeleihin ja tekoölyyn tukeutuvia sensortyypppejä.

Kim ja muut (2025) ovat kehittäneet bioelektronisen immunomäärityksen, jonka avulla voidaan tunnistaa näytteestä *Staphylococcus aureuksen* tuottamaa stafylokokki-enterotoksiini B:tä (SEB). Sensori edustaa elektrokemiallista sensortyyppiä ja mittaus perustuu grafeenipohjaiseen kenttävaikutustransistoriin (engl. Graphene Field-Effect Transistor, GFET), jossa yksiatomiseen grafeenipintaan on orgaanisen rajapintamateriaalin (oligo(phenylene-ethynylene)amine) avulla sidottu

kimeerisiä vasta-aineita. Kimeerinen monoklonaalinen vasta-aine on tuotettu hiiren ja ihmisen stafylokokki-enterotoksiini B:lle spesifisiä vasta-aineita yhdistämällä. Transistorin läpi kulkee sähkövirta, jonka avulla mahdollinen näytteen sisältämä antigeeni tunnistetaan, koska SEB-antigeenin sitoutuminen vasta-aineeseen aiheuttaa paikallisen sähkövirran muutoksen. Transistorin bioreseptoripinnan rakenne on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Transistorin bioreseptoripinnan rakenne. Vihreällä on esitetty näytteen stafylokokki-enterotoksiini B:t (SEB), vaaleanruskealla orgaaninen rajapintamateriaali ja ruskealla kimeerinen SEB:n tunnistava vasta-aine. Yksiatominen grafeenipinta on esitetty harmaalla. Sähkövirran kulkua kuvataan nuolella. Antigeenin sitoutuminen vasta-aineeseen aiheuttaa sähkövirrassa muutoksen, joka voidaan havaita. Kuva on tuotettu Kimin ja muiden (2025) artikkelin dataa mukailien Biorenderillä.

Määrityksen avulla voidaan tunnistaa kädellisistä eläinmalleista (engl. nonhuman primate infection model, NHP) 1 pg/ml – 100 ng/ml SEB-pitoisuudet (Kim ja muut 2025). Menetelmä on siis äärimmäisen herkkä. Toinen menetelmän etu on sen nopeus, sillä tulos saadaan lähes välittömästi, eikä menetelmään sisälly testialustan valmistuksen jälkeen monimutkaisia työvaiheita. Biosensorista olisi siis mahdollista tulevaisuudessa kehittää kannettava pikatesti, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi taistelukentillä ilman tarvetta laboratoriolaitteille.

4 Hoito – Vasta-aineterapia

Vasta-aineiden avulla voidaan paitsi tunnistaa, myös hoitaa biologisten aseiden käytöstä aiheutuneita infektioita ja toksiiinialtistuksia. Vasta-aine häiritsee mikrobin tai toksiiinin toimintaa neutraloimalla, opsonoimalla ja/tai käynnistämällä komplementin tai vasta-ainevälitteisen sytotoksisuuden.

Seuraavaksi esitellään erilaisia vasta-aineita ja niiden käyttökeinoja, joita voitaisiin tulevaisuudessa käyttää biotaisteluaineiden lääkinnälliseen hoitoon. Myös vasta-aineiden ja antibioottien yhteisvaikutuksia on tutkittu ja yhdistelmähoitoja pidetään yhtenä tulevaisuuden ratkaisuista (Avril ja muut 2024).

4.1 Antitoksiinit

Antitoksiiniksi kutsutaan vasta-ainetta, joka heikentää kehoon joutuneen toksiiinin vaikutusta esimerkiksi neutraloimalla sen. Antitoksiineja voidaan siis käyttää hoitamaan toksiiinien aiheuttamia myrkytyksiä passiivisen immunisaation avulla eli antamalla potilaalle valmiita vasta-aineita. Seuraavaksi esitellään kaksi antitoksiinia, jotka ovat kehitteillä biologisten agenssien neutraloimista ja hoitoa varten.

Monoklonaalisia vasta-aineita voidaan tuottaa hybridoomamenetelmällä. Sillä on tuotettu esimerkiksi RicE5-vasta-aine risiiniä vastaan immunisoimalla hiiri puhdistetulla ja inaktivoidulla risiinin E-muodolla (Lequesne ja muut 2024). Risiini koostuu A ja B ketjuista ja sen yleisimmät muodot D ja E eroavat toisistaan B-ketjun rakenteessa. RicE5-vasta-aine sitoutuu A-ketjuun aiheuttaen steerisen esteen, jolloin toksiiini ei pysty inaktivoimaan ribosomia. Vasta-aineen todettiin toimivan odotetusti sekä D että E muotoja vastaan *in vitro* ja *in vivo*. Koe-eläiminä käytetyistä hiiristä 90 % selvisi, kun vasta-ainetta annettiin 6 tuntia altistuksen jälkeen ja 35 %, kun vasta-ainetta annettiin 24 tuntia altistuksen jälkeen. Altistukseen käytettiin 5 LD₅₀ risiiniä, eli viisi kertaa annos, joka tappaisi puolet koe-eläimistä ja vasta-ainetta annettiin 10 mg/kg. Altistuksesta selvinneillä hiirillä todettiin olevan pitkäaikainen suoja risiinimyrkytystä vastaan. Vasta-aine on potentiaalinen, mutta vaatii vielä kehitystä, jotta terapeuttista aikaikkunaa voidaan pidentää.

Toinen esimerkki antitoksiinista on botuliiniineurotoksiini F:ää vastaan kehitetty F20-vasta-aine (Sun ja muut 2024). Se on tuotettu immunisoimalla kameli FL-HN-antigeenillä, joka sisältää botuliiniineurotoksiini F:n kevytketjun ja noin puolet raskasketjusta. Kamelit tuottavat perinteisten vasta-aineiden lisäksi raskasketjuvasta-aineita, jotka eivät sisällä kevytketjuja. Raskasketjuvasta-aineista voidaan eristää nanovasta-aineita, jotka ovat näiden vasta-aineiden antigeenin tunnistavia osia. F20-vasta-aineeseen on seulottu sopivin kamelin nanovasta-aine ELISA-testien perusteella.

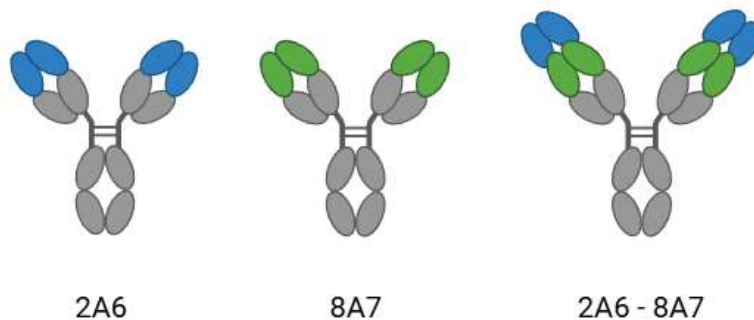
Nanovasta-aine yhdistettiin sitten ihmisen igG:n Fc-osaan, jolloin saatiin kimeerinen vasta-aine. *In vitro* ja *in vivo* testeissä vasta-aine oli lupaava. Kun vasta-ainetta annettiin 5 mg/kg alle 4 h kuluttua 5 LD₅₀ annoksesta FL-HN-antigeeniä, kaikki hiiret selvisivät. Yli neljän tunnin päästä annettu vasta-aine ei kuitenkaan toiminut enää yhtä hyvin. Vaikka F-muoto on botuliinineurotoksiinien harvinaisin muoto, on sitäkin vastaan syytä olla varautunut. Se on yksi neljästä muodosta, jotka aiheuttavat ihmisissä suurimman osa myrkytyksistä ja näin myös mahdollinen agenssi bioterrorismissa tai -sodankäynnissä.

4.2 Bispesifiset vasta-aineet

Bispesifisellä vasta-aineella tarkoitetaan laboratoriossa tuotettua vasta-ainetta, joka voi sitoutua kahteen antigeeniin tai antigeenin eri epitoppeihin (Z. Chen ja muut 2025). Vasta-aineita yhdistämällä voidaan saada aikaan parempia terapeuttisia vasteita tai neutraloivia mekanismeja, kun antigeenistä voidaan kerralla sitoa useampi sitoutumiskohta. Suojaavat, eli toksiinia neutraloivat, vasta-aineet on todettu toimiviksi bispesifisinä vasta-aineina terapeuttisessa käytössä. Nyt myös ei-suojaavien vasta-aineiden yhdistelmistä on saatu lupaavia tuloksia. Ei-suojaava vasta-aine tunnistaa antigeenin, mutta ei yksinään edistä sen hävitystä tai neutraloi sitä.

Z. Chen ja muut (2025) tutkivat anthraxtoksiinin neutralointia kahdella ei-suojaavalla vasta-aineella. Vasta-aineiksi oli seulottu ihmisen anthraxspesifiset 2A6 ja 8A7 vasta-aineet, joilla aiemmissa mittauksissa oli todettu olevan tehostuneita neutraloivia vaikutuksia, vaikkeivat ne olekaan suojaavia vasta-aineita. Anthrax koostuu kolmesta proteiinista, suojaavasta antigeenistä, letaalitekijästä ja turvotustekijästä. 2A6:sta ja 8A7:stä kehitetty bispesifinen vasta-aine tunnistaa suojaavassa antigeenissa sijaitsevat epitopit. Suojaavan antigeenin tehtävänä on kuljettaa letaalitekijä ja turvotustekijä sisälle soluun polymerisoitumalla ja muodostamalla solukalvoon reikä.

Bispesifisessä vasta-aineessa 2A6-8A7 on yhdistetty molempien vasta-aineiden variaabelialueet siten, että 2A6 variaabelialue on vasta-aineen päässä ja 8A7 lähempänä Fc-osaa (Z. Chen ja muut 2025). Molempien vasta-aineiden sekä bispesifisen vasta-aineen rakenne on esitetty kuvassa 3. 2A6 valittiin ulommaksi vasta-aineeksi, koska sen sitoutumista suojaavaan antigeeniin ei häirinyt muiden vasta-aineiden läsnäolo. Tutkimuksessa huomattiin, että myös 2A6 ja 8A7 vasta-aineiden sekoitus neutraloi anthraxtoksiinia. Bispesifisen vasta-aineen neutralointikyky oli kuitenkin suurempi, koska 2A6-8A7:lla oli sekoitukseen verrattuna uudenlaisia neutralointitapoja eri vaiheissa suojaavan antigeenin polymerisaatiota ja toimintaa solukalvolla.



Kuva 3. Vasta-aineiden 2A6 ja 8A7 sekä bispesifisen vasta-aineen 2A6-8A7 rakenne. Sinisellä ja vihreällä kuvattu vasta-aineiden antigeeniä sitovia osia. Kuva on tuotettu z. Chenin ja muiden (2025) artikkelin dataa mukaillen Biorenderillä.

Bispesifinen vasta-aine 2A6-8A7 neutraloi anthraxia *in vitro* sekä eläinmalleilla tehdyissä kokeissa (Z. Chen ja muut 2025). Kaikki koe-eläiminä käytetyt rotat säilyivät hengissä saatuaan altistuksen jälkeen bispesifistä vasta-ainetta puolet anthraxin määrästä. Myös sekoitusta saaneet selvisivät tällä määrällä, mutta pienemmällä määrällä bispesifinen vasta-aine toimi sekoitusta huomattavasti paremmin. Tutkimus osoittaa, että myös ei-suojaavilla vasta-aineilla voi olla potentiaalia toimia vasta-aineterapiana joko bispesifisinä vasta-aineina tai vasta-aineiden sekoituksena. Ei-suojaavilla vasta-aineilla voidaan mahdollisesti tehostaa myös suojaavien vasta-aineiden affiniteettiä ja toimintaa.

4.3 mRNA-vasta-aineet

Perinteisten vasta-aineiden lisäksi viime aikoina on kehitetty myös mRNA-vasta-aineita. Niistä voisi olla erityistä hyötyä antibioottiresistenssejä kehittäneiden bakteerikantojen aiheuttamien infektioiden hoidossa. mRNA-vasta-aineita käytetään samaan tapaan altistuksen jälkeisenä vasta-aineterapiana kuin normaaleja vasta-aineita, mutta injektiossa ei anneta suoraan vasta-ainetta vaan sitä koodaavaa mRNA:ta.

Luo ja muut (2024) kehittivät mRNA vasta-aineen *Staphylococcus aureuksen* stafylokokki-enterotoksiini B:tä vastaan (SEB). Anti-SEB mRNA-vasta-aineen tuotto alkoi hiirissä 4 tuntia injektion jälkeen (Luo ja muut 2024). mRNA-vasta-aineen käyttö ei siis merkittävästi hidastaisi hoitovastetta. Sen todettiin olevan myös tavallista anti-SEB vasta-ainetta tehokkaampi lievittämään infektiota, vaikka sitä annosteltiin suhteessa pienempiä määriä eikä käytössä ollut muita tehosteaineita. mRNA-vasta-aineen erottaa mRNA-rokotteesta sen käyttötapa sekä immunologisen vasteen alkuaikojen kohta (Zhao ja muut 2023). mRNA-vasta-ainetta voidaan käyttää ennaltaehkäisevästi sekä hoitokeinona, sillä siinä vaste ilmenee heti sen laukaistessa passiivisen immunisaation. Sen sijaan mRNA-rokotteilla immuunivasteen kehittymiseen menee enemmän aikaa, sillä niiden toiminta

perustuu aktiiviseen immunisaatioon. mRNA-vasta-aineita on kehitetty myös muita biologisia agenseja, kuten botuliini neurotoksiini A:ta, bakteereja ja viruksia vastaan. Lisäksi niitä on kehitteillä myös syöpäkasvaimien hoitoon. mRNA-vasta-aineet ovat potentiaalinen vaihtoehto valkuaisainevasta-aineille tulevaisuudessa, sillä niiden tuottaminen on myös nopeampaa ja halvempaa. Vielä yhtäkään mRNA-vasta-ainetta ei kuitenkaan ole markkinoilla vaan kaikki ovat vielä kehitysvaiheessa.

5 Ennaltaehkäisy – Rokotteet

Kaikkein tehokkain tapa ehkäistä epidemioita, sairastumista, infektioita sekä biologisten agenssien leviämistä ihmisiltä ja pinnoilta toisille on noudattaa hyvää käsi- ja kenttähygieniaa (Puolustusvoimat 2022). Muukin ennaltaehkäisy, kuten rokotteet ja fyysikaalinen suojautuminen taudinaiheuttajilta ja toksiineilta, ovat yleensä tehokkaita keinoja niiden torjumiseksi. Seuraavaksi esitellään tuoreita vektori- sekä nanorokotteita, joita kehitetään biologisten agenssien aiheuttamien infektioiden ja epidemioiden torjumiseksi.

5.1 Vektorirokotteet

Vektorirokotteissa antigeenin tai sen osan kuljettamiseen käytetään heikennettyä virusta. Viruksen tehtävänä on hyödyntää sen luontaisia ominaisuuksia ja saada kuljetettua immunisaatioon tarvittava partikkeli oikeaan paikkaan ihmiskehon ja solun sisässä. Heikennetty adenovirus on yksi yleisesti käytetty ja tehokkaaksi todettu virusvektori. Esimerkkinä uudesta kehitteillä olevasta, biologista agenssia vastaan kehitetystä vektorirokotteesta on Hunegnawn ja muiden (2022) ChAd3-MARV-rokote. Siinä vektorina käytetään heikennettyä simpanssin adenovirusta (engl. chimpanzee adenovirus, ChAd) sen turvallisuusprofiilin ja alhaisen seroprevalenssin vuoksi. Alhaisella seroprevalenssilla tarkoitetaan sitä, ettei ihmisillä ole valmiina vasta-aineita sitä vastaan. Tällöin valmiit vasta-aineet eivät tuhoa virusta, ennen kuin se on täyttänyt tarkoituksensa eli aloittanut aktiivisen immunisaation prosessin. Simpanssin adenovirusilla on tehty paljon tutkimusta, jopa faasin 3 ihmiskokeita.

Marburg-virusta vastaan ei ole vielä markkinoilla rokotteita tai lääkkeitä, joten ChAd3-MARV-rokotteen kaltaiset uudet hoito- ja ennaltaehkäisymahdollisuudet ovat hyvin ajankohtaisia (Hunegnaw ja muut 2022). Rokotteessa replikoitumiskyvyttömän adenoviruksen genomiin on liitetty Marburg-viruksen glykoproteiinia koodaava geeni. Geeni on eristetty Marburg-viruksen tappavimmasta kannasta, Angola-kannasta. Onnistuneessa immunisaatiossa virusvektori vie geenin kohdesoluun, joka alkaa tuottaa glykoproteiinia. Glykoproteiinit tunnistetaan vieraisiksi, ne tuhoetaan, niitä vastaan tuotetaan vasta-aineita ja immunologinen muisti kehittyy. Näin aktiivisen immunisaation avulla immuunijärjestelmä on valmiina mahdollista infektiota varten ja Marburg-virus saadaan tuhottua, ennen kuin se aiheuttaa haittaa.

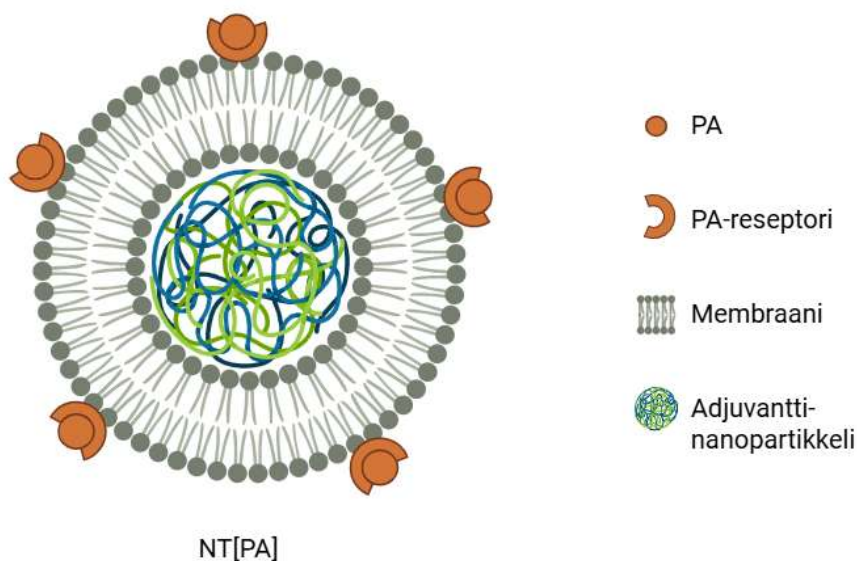
ChAd3-MARV-rokotetta testattiin makakeilla (Hunegnaw ja muut 2022). Kaikki rokotuksen saaneet makakit selvisivät Marburg-infektiosta ilman huomattavaa viremiaa tai tilan heikkenemistä. Tutkimus osoitti ChAd3-MARV-rokotteiden antavan immuniteetin Marburg-virusta vastaan seitsemän päivän päästä rokotteesta vuoden ajaksi. Annoskokona rokotteesta käytettiin 10^{10} PU, joka oli todettu

toimivaksi kädellisillä eläinmalleilla myös vastaavalla Ebolaa vastaan kehitetyllä ChAd3-EBOV-rokotteella (Stanley ja muut 2014). Näiden kahden rokotteiden rakenne ja toiminta ovat hyvin samankaltaisia ja molempien odotetaan olevan tulevaisuuden rokoteratkaisuja. ChAd3-MARV-rokote on jo päässyt läpi faasi 1 testauksista ja edennyt faasin 2 testeihin Yhdysvalloissa sekä Ugandassa (Sabin Vaccine Institute 2023, 2025).

5.2 Nanorokotteet

Nanorokotteilla pyritään vastaamaan perinteisempien rokotteiden haasteisiin saavuttamalla immuunivaste kustannustehokkaasti jo yhdellä rokoteannoksella (Sultana ja muut 2025). Kehitteillä olevissa nanorokotteissa hyödynnetään nanopartikkeleiden lisäksi myös membraania, jolloin yhdistyvä nanopartikkeleiden muokattavuus sekä membraanin tunnistettavuus, joka tehostaa ja nopeuttaa immuunivasteen syntymistä. Holay ja muut (2022) ovat kehittäneet NT[PA]-nanorokotteiden anthraxtoksiinin suojaavaa antigeeniä (engl. protective antigen, PA) vastaan. Vaikka suojaava antigeeni ei itsessään ole toksinen, sitä vastaan saavutetulla immunitetillä voidaan puolustautua koko anthraxtoksiinia vastaan, sillä suojaavan antigeenin tehtävänä on kuljettaa letaalitekijä sekä turvotustekijä kohdesolun sisälle.

Nanorokote tuotettiin yhdistämällä ensin PLGA-nanopartikkelipolymeeri (engl. poly(lactic-co-glycolic acid)) sekä adjuvantti toisiinsa kaksoisemulsiomenetelmällä, jolloin PLGA:sta muodostui adjuvantille kuori ja syntyi adjuvanttia sisältävä nanopartikkeli (Holay ja muut 2022). Adjuvanttina toimi synteettinen DNA CpG 1826, TLR9-reseptorin (toll like reseptor 9) antagonisti. Reseptori tunnistaa siis DNA:n, mikä edistää immuunivasteen syntymistä. Altistettujen hiirten makrofageista eristettiin sitten membraania, jolla oli PA-spesifisiä reseptoreita. Membraani ja adjuvantti-nanopartikkelit yhdistettiin kokonaisuudeksi, jossa membraani päällysti nanopartikkelit. Viimeiseksi membraanilla oleviin PA-reseptoreihin kiinnitettiin eristettyä PA:ta, jolloin immuunijärjestelmälle saatiin samalla esiteltyä sekä antigeeni että adjuvantti. Tämä indusoi PA-spesifisten vasta-aineiden tuottoa. Nanorokotteiden rakenne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. NT[PA]-nanorokotteen rakenne. Membraanin sisällä PLGA:sta ja adjuvanttina toimivasta synteettisestä DNA:sta tuotettu nanopartikkeli ja membraanin pinnalla PA_reseptoreja, joihin on sidottu PA:ta. Kuva on tuotettu Holayn ja muiden (2022) artikkelin dataa mukaillen Biorenderillä.

Hiirille tehdyissä kokeissa Holayn ja muiden (2022) nanorokote sai aikaan voimakkaan soluvälitteisen immunitetin ja koe-eläimet selvisivät tappavasta annoksesta anthraxtoksiinia. Nanorokotetta verrattiin vapaan PA:n ja adjuvantin yhteisvaikutukseen ja sen todettiin toimivan selkeästi paremmin. Huomattava hyöty nanorokotteesta on myös pieni annostelutarve, sillä rokotteen teho havaittiin hiirillä jo 50 ng annoksilla. Lisätutkimuksia ehdotetaan kuitenkin mahdollisille vahvisterokotuksille, vaikka pitkäkestoinen (24 kk) immunitetti saavutettiin jo yhdellä annoksella. Lisää tutkimusta kaivataan myös membraanipäällysteisistä nanorokotteista ylipäätään, sillä yksikään tällainen nanorokote ei ole vielä päässyt prekliinisiä testejä pidemmälle, vaikka nanopartikkelien tutkimus ja käyttö on lisääntynyt huomattavasti (Sultana ja muut 2025). Niiden oletetaan olevan tulevaisuuden ratkaisu myös autoimmuunisairauksien ja syövän kohdennetussa hoidossa.

6 Johtopäätökset

Biologiset aseet tulevat olemaan yhä konkreettisempi uhka tulevaisuudessa globalisoituvassa maailmassamme. Koko ajan löydetään uusia mutaatioita, alalajeja ja serotyyppejä luonnollisista mikrobeista ja toksiineista. Lisäksi kehittynyt geeninmuokkaus mahdollistaa myös uusien mikrobien ja toksiinien kehittelyn, mikä voi aiheuttaa kilpajuoksun ongelmien ja ratkaisujen välille. Vasta-aineilla on potentiaalia toimia immunomäärityksissä biologisia agensseja tunnistettaessa sekä infektioiden ja myrkytysten hoitona ja ennaltaehkäisyssä.

Vasta-aineisiin perustuvan tunnistuksen avulla biotaisteluaineet on mahdollista tunnistaa spesifisesti ja luokitella serotyyppeihin. Erilaisten immunomääritysten etuna on myös mahdollisuus tarkkaan kvantitatiiviseen määritykseen. Biosensorit mahdollistavat biologisten agenssien analyysin ja mittauksen tulevaisuudessa myös ilman monimutkaista laboratoriolaitteistoa esimerkiksi taistelukentällä tai elintarviketuotannossa.

Antitoksiinit ja vasta-ainelääkkeet ovat suuressa roolissa erityisesti toksiinien aiheuttamien myrkytysten hoidossa, sillä antibiootit eivät toimi niihin, eikä moniin toksiinimyrkytyksiin ole vielä olemassa toimivaa lääkettä. Myös antibioottien ja vasta-aineiden synergistä hoitovastetta etenkin resistenttien bakteerikantojen aiheuttamiin infektioiden pidetään potentiaalisena. Vasta-ainelääkkeet hyödyntävät passiivista immunisaatiota, koska kehoon tuodaan valmiita vasta-aineita, ja ne toimivat niin sanotusti altistuksenjälkeisenä rokotehoitona. Ennaltaehkäisevien rokotteiden avulla taas indusoidaan aktiivista immunisaatiota. Perinteisempien vektorirokotteiden lisäksi myös uudemmat nanorokotteet saavat aikaan nopean ja pitkäkestoisen immunisaation, joka suojaa altistukselta.

Vasta-aineille on kehitetty paljon uusia lupaavia käyttötarkoituksia lähivuosina. Joitakin vasta-ainelääkkeitä on jo markkinoilla, mutta suurin osa tässäkin työssä esitellyistä uusista innovaatioista on vielä kehityksen alkuvaiheilla, tutkimuksen ollessa alkutekijöissään. Lisää tutkimusta siis tarvitaan erilaisista biologisista agensseista ja vasta-aineista sekä lääkkeinä että biologisten aseiden tunnistuksessa ja ennaltaehkäisyssä.

Lähteet

- Avril, A., Guillier, S. & Rasetti-Escargueil, C. (2024) Development of effective medical countermeasures against the main biowarfare agents: The importance of antibodies. *Microorganisms* **12**:2622.
- Centers for Disease Control and Prevention & National Institutes of Health (2020) Poimintoja. Teoksessa *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories—6th Edition* (6th edition, s. 27–30, 32–59, 148–185, 268–270, 306–318, 334–340). Washington, D.C.: U.S. Department of Health and Human Services.
- Chen, J., Su, Z., Li, W., Pei, Z., Wu, D., Li, L., ... Li, G. (2025) Nanopore-assisted ELISA for ultrasensitive, portable, and on-site detection of ricin. *Talanta* **283**:127136.
- Chen, Z., Zhang, G., Han, J., Zhu, Z., Wang, M., Fang, T., ... Chi, X. (2025) Bispecific antibody engineered from two non-protective antibodies confers full protection against anthrax toxin through inhibition of PA83 cleavage. *Microbiol Spectr* **13**:e00588-25.
- Holay, M., Krishnan, N., Zhou, J., Duan, Y., Guo, Z., Gao, W., ... Zhang, L. (2022) Single low-dose nanovaccine for long-term protection against anthrax toxins. *Nano Lett* **22**:9672–9678.
- Hunegnaw, R., Honko, A. N., Wang, L., Carr, D., Murray, T., Shi, W., ... Sullivan, N. J. (2022) A single-shot ChAd3-MARV vaccine confers rapid and durable protection against Marburg virus in nonhuman primates. *Sci Transl Med* **14**:eabq6364.
- Kim, K. H., Hwang, E.-H., Jang, J. H., Seo, S. E., Hong, J. J., Lee, J. & Kwon, O. S. (2025) Bioelectronics based on antibody-conjugated graphene field-effect transistor for response of staphylococcal enterotoxin B as a biological weapon. *Journal of Hazardous Materials* **494**:138457.
- Lequesne, L., Dano, J., Rouaix, A., Kropp, C., Plaisance, M., Gelhaye, S., ... Simon, S. (2024) A monoclonal antibody with a high affinity for ricin isoforms D and E provides strong protection against ricin poisoning. *Toxins* **16**:412.

- Luo, F., Xu, C., Zhang, C., Tan, A., Lu, D., Luo, P., ... Zou, Q. (2024) mRNA-based platform for preventing and treating *Staphylococcus aureus* by targeted staphylococcal enterotoxin B. *Front Immunol* **15**:1490044.
- Morawska, K., Sikora, T., Grabka, M., Wiśnik-Sawka, M. & Witkiewicz, Z. (2025) Early detection of threat agents, a review of bioimmunosensors and their prospects. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 1–15.
- Puolustusvoimat (2022) Toimintaympäristö. Teoksessa *Suojelutoiminnan käsikirja* (s. 11–14, 31–41). Punamusta Oy: Pääesikunta.
- Radosavljevic, V., Banjari, I. & Belojevic, G. (Toim.) (2018) Introduction. Teoksessa V. Radosavljevic, *Defence against bioterrorism: Methods for prevention and control* (s. 1–5). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sabin Vaccine Institute (2023, lokakuuta 19) Sabin Vaccine Institute begins phase 2 clinical trial for Marburg vaccine in Uganda. <https://www.sabin.org/resources/sabin-vaccine-institute-begins-phase-2-clinical-trial-for-marburg-vaccine-in-uganda/> (Luettu 29.1.2026)
- Sabin Vaccine Institute (2025, huhtikuuta 16) Sabin begins Marburg vaccine trial in U.S. <https://www.sabin.org/resources/sabin-begins-marburg-vaccine-trial-in-u-s/> (Luettu 29.1.2026)
- Stanley, D. A., Honko, A. N., Asiedu, C., Trefry, J. C., Lau-Kilby, A. W., Johnson, J. C., ... Sullivan, N. J. (2014) Chimpanzee adenovirus vaccine generates acute and durable protective immunity against ebolavirus challenge. *Nat Med* **20**:1126–1129.
- Sultana, P., Kim, Y. K., Cho, S. J., Asadujjaman, M. & Jee, J.-P. (2025) Advances in cell membrane-coated nanoparticles: Multifunctional platforms for targeted drug delivery, precision phototherapy, and enhanced immunotherapy. *Biomater Sci* **13**:5232–5259.
- Sun, K., Luo, S., Jiang, Y., Guo, J., Wang, X., Cheng, K., ... Zhou, C. (2024) Neutralizing chimeric heavy-chain antibody targeting the L-HN domain of *Clostridium botulinum* neurotoxin type F. *Arch Toxicol* **98**:4187–4195.
- Zhao, Y., Gan, L., Ke, D., Chen, Q. & Fu, Y. (2023) Mechanisms and research advances in mRNA antibody drug-mediated passive immunotherapy. *J Transl Med* **21**:693.