

# Solusta yksilöksi

Irma Thesleff, Kirsi Sainio, Hannu Sariola

Monisoluisen organismin kehityksen perustapahtumat **13** Geenit sisältävät kehityksen ohjelman **17** Erilaistuminen etenee vaiheittain **17** Kantasolut – monikykyisiä hyvässä ja pahassa **18**

Sikiönkehitystä säätelevät mekanismit ovat säilyneet hyvin samanlaisina hyönteisistä selkärangkaisiin. Keskeisiä tapahtumia kehityksessä ovat solujen jakautuminen ja erilaistuminen, elimistön kaavoittuminen ja elinten muotoutuminen eli morfogeneesi. Monisoluisen lajin kehitystä varten on valikoitunut kehitysgeenien ”työkalupakki”. Se säätelee kasvua ja erilaistumista induktiivisten signaalien avulla. Erilaistuminen etenee induktioiden sarjana, mikä johtaa alun perin monikykyisten alkion solujen erilaistumiseen kolmeksi alkion lehdeksi ja näistä syntyviksi yli 300 solutyypiksi.

Lääketieteen ja biotekniikan edistyminen ja sen mukanaan tuomat asiat, toivo sairauksien uusista hoitomahdollisuuksista ja pelko tekniikan väärinkäytöstä, toivat kehitysbiologian tälle vuosituhatkunnalle. Kehitysbiologian historia ylittää kuitenkin jo Aristoteleen aikaan. Hän pohti alkioiden kehitystä ja kysyi: ”Syntyvätkö kaikki alkion osat yhtä aikaa vaiko peräjälkeen? Ovatko kaikki aikuisten elimet muodostuneet jo alussa valmiiksi, vai onko kehitys verrattavissa kalastajan verkon kutomiseen?” Aristoteles kallistui jälkimmäisen vaihtoehdon puolelle. Kesti kuitenkin yli kaksituhatta vuotta ennen kuin teoria hyväksyttiin ja todistettiin oikeaksi.

Vielä 1700-luvulla koko ihmiskunnan uskottiin alun perin olleen koteloituneena sukusoluissa pieninä ihmisinä (homunculus), joiden sisällä oli vielä pienempiä sukusoluja ja vielä pienempiä homunculuksia (kuva 1.1). Kuitenkin eri selkärangkaisten alkioiden tarkastelu – johon jo Aristoteles

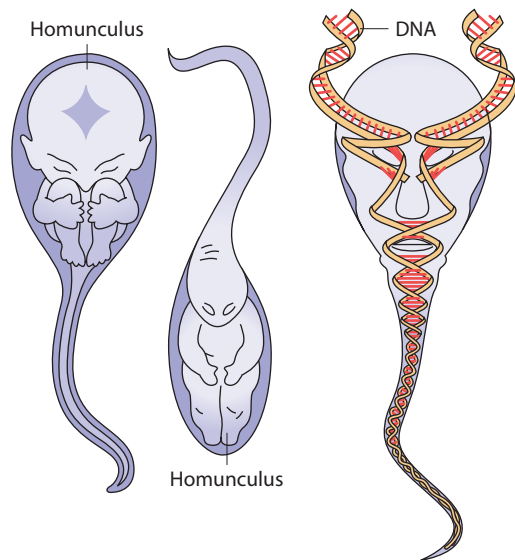
oli perustanut päätelmänsä – osoitti, että tämä ns. preformaatio-oppi oli väärä ja että kehitys tapahtuu asteittain. Huomattiin myös, että eri selkärangkaiset muistuttivat toisiaan alkionkehityksen varhaisissa vaiheissa (kuva 1.2). Havainto vilkastutti keskustelua evoluutiosta ja johti käsitykseen eri eläinlajien sukulaisuudesta. Vuonna 1859 Charles Darwin julkaisi *Lajien synty* -teoksensa, jossa hän esitti, että eläinlajit olivat kehittyneet ja muuttuneet luonnonvalinnan seurauksena erilaisiksi vuosimiljoonien kuluessa.

1800-luvulla kehitysbiologit oivalsivat, että sikiönkehitystä säätelevissä mekanismeissa täytyi olla yhtäläisyyksiä eri selkärangkaisten välillä. Vielä sata vuotta myöhemmin tutkijat eivät kuitenkaan aavistaneet, että kehityksen perusmekanismit ovat samat myös selkärangattomilla eläimillä. Yllätys olikin melkoinen, kun 1980-luvun puolivälissä osoitettiin, että banaanikärpäsen kehitystä ohjaavat geenit säätelevät myös hiiren ja ihmisen

kehitystä. Syntyi käsite evolutiivisesta kehitysbiologiasta (evo-devo).

Kehitysmekanismien säilyvyys juontuu monisoluisen eläinten evoluution alkuaikoihin yli puolen miljardin vuoden taakse. Yksisoluisen

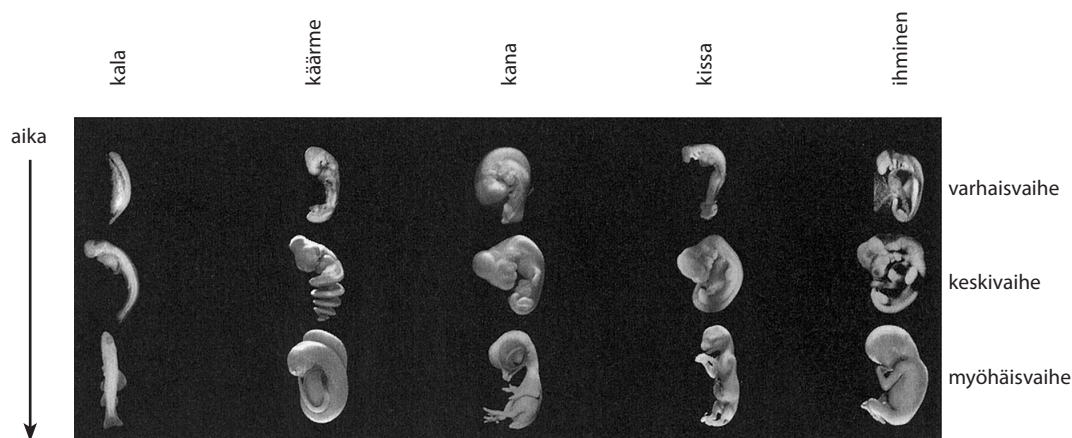
eliöiden kehittyminen monisoluisiksi edellytti solujen erikoistumista eri tehtäviin ja näiden erilaistuneiden solujen keskinäistä viestintää. Monisoluisen eliön on täysin riippuvainen solujen välisestä vuorovaikutuksesta. Tätä varten kehittyi eräänlainen kehitysgeenien ”työkalupakki”, joka säätelee solujen erilaistumista, ohjelmoi viestijärjestelmiä ja ohjaa kaikkien monisoluisen eliöiden kehitystä (ks. luku 2 DNA ja geenisäätelyn periaatteet ja luku 3 Solujen kommunikaatio ja induktiiviset vuorovaikutukset).



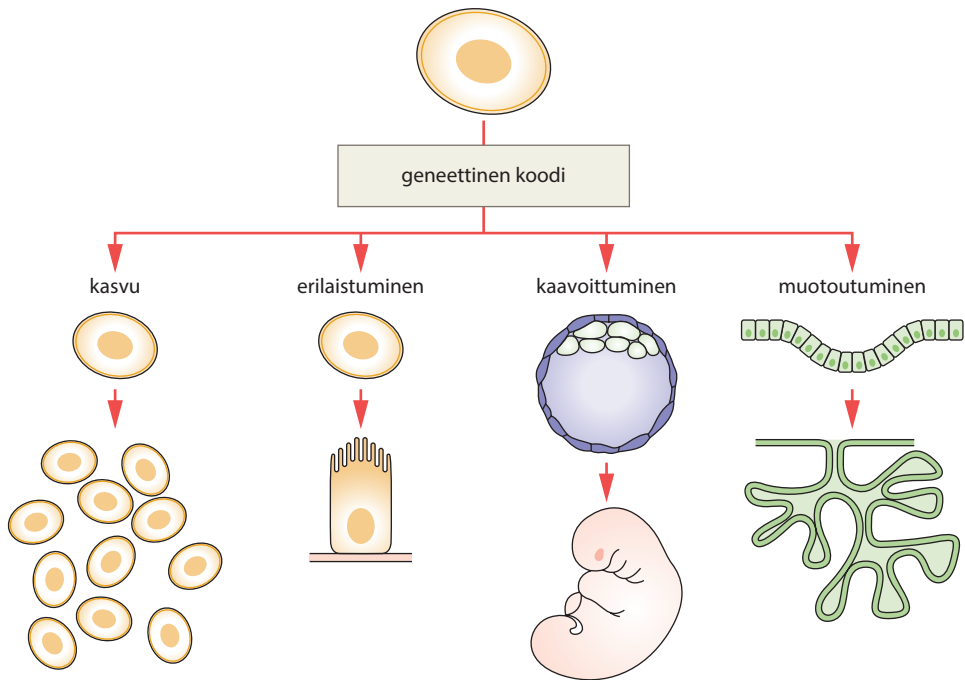
**Kuva 1.1. Homunculuksia.** Kaksi taiteellista käsitystä siitä, miten kehitys on ohjelmoitunut sukusoluissa. Vasemmalla Hartsoekerin (1694) näkemys, jonka mukaan jokaisessa sukusolussa oli valmiina pieni ihminen, homunculus. Oikealla Lauri Saxénin moderni näkemys siitä, miten DNA määrää ihmisen ulkonäön.

## Monisoluisen organismin kehityksen perustapahtumat

Hedelmöittyneen munasolun kehitys monisoluisiksi yksilöksi koostuu useista samanaikaisista ja toisiinsa liittyvistä tapahtumaketjuista. Samalla kun solujen määrä lisääntyy nopeasti, solut erilaistuvat eri tehtäviin ja muodostavat eri solutyypeistä koostuvia kudoksia ja elimiä. Koko alkion kolmiulotteisen kehityksen ja akseleiden muodostuksen taustalla on ikään kuin pohjapiirustus, kaava, joka ohjaa eri rakenteet oikeille paikoilleen (kuva 1.3).



**Kuva 1.2. Kehityksen alkuvaiheen samankaltaisuus.** Selkärankaisten alkioita muistuttavat toisiaan kehityksen varhaisvaiheessa, mutta yksittäisten elinten kehityksen alkamisessa ja nopeudessa on merkittäviä eroja. Eri lajien alkioiden suhdetta ei kuvassa esitetä luonnollisessa mittakaavassa. Kuva: Michael Richardson.



**Kuva 1.3. Sikiönkehityksen perustapahtumat.** Kehityksen aikana solut jakautuvat ja erilaistuvat. Alkion kaavoittuminen määrää alkion akselit ja elinten paikat, ja soluryhmien yhteistoiminnan seurauksena muotoutuvat eri rakenteet ja elimet. Kehityksen ohjelma on paitsi kunkin solun tumän DNA-koodissa, myös kromatiinin tilassa. Geenien luentaa ja kromatiinin avautumista säätelevät myös epigeneettiset mekanismit (ks. luku 2 DNA ja geenisäätelyn periaatteet).

## Kasvu

Solujen jakautuminen eli proliferaatio on ominaista sikiönkehityksen kaikille vaiheille. Solujen jakautuminen on kehityksen aikana ajallisesti ja paikallisesti tarkasti säätyntynyt. Solujen määrä vaikuttaa suoraan elinten kokoon, keskinäisiin suhteisiin sekä muotoon. Evoluution aikana syntyneet erot lajien ulkonäössä ovatkin usein seurausta paikallisista muutoksista solujen jakautumisessa (ks. luku 5 Malliorganismit ja vertaileva kehitysbiologia).

Solujen määrää säätelee kehityksen aikana myös ohjelmoitunut solukuolema eli apoptoosi, joka hävittää turhat solut. Apoptoosi poistaa esimerkiksi ylimääräiset hermosolut tai tehtävänsä suorittaneen viestikeskuksen (ks. luku 5 Malliorganismit ja vertaileva kehitysbiologia). Se myös muovaa elimiä. Esimerkiksi raajoissa sormet erkaantavat toisistaan, kun niiden välissä oleva kudos häviää apoptoottisesti.

Sikiön ja sen eri elinten kasvu ei johdu pelkästään solujen määrän lisääntymisestä. Joissakin kudoksissa solujen koon suureneminen kasvattaa rakenteita. Vielä suurempi on soluväliaineen merkitys. Suuressa osassa elimiä soluväliainetta on enemmän kuin soluja, ja joissakin rakenteissa, kuten luissa, solujen osuus kudossmassasta on vähäinen. Soluväliaineen tuottavat erilaistuneet solut itse. Sikiön ja sen eri elinten kokoon vaikuttaa myös soluväliaineen tuotanto.

## Erilaistuminen

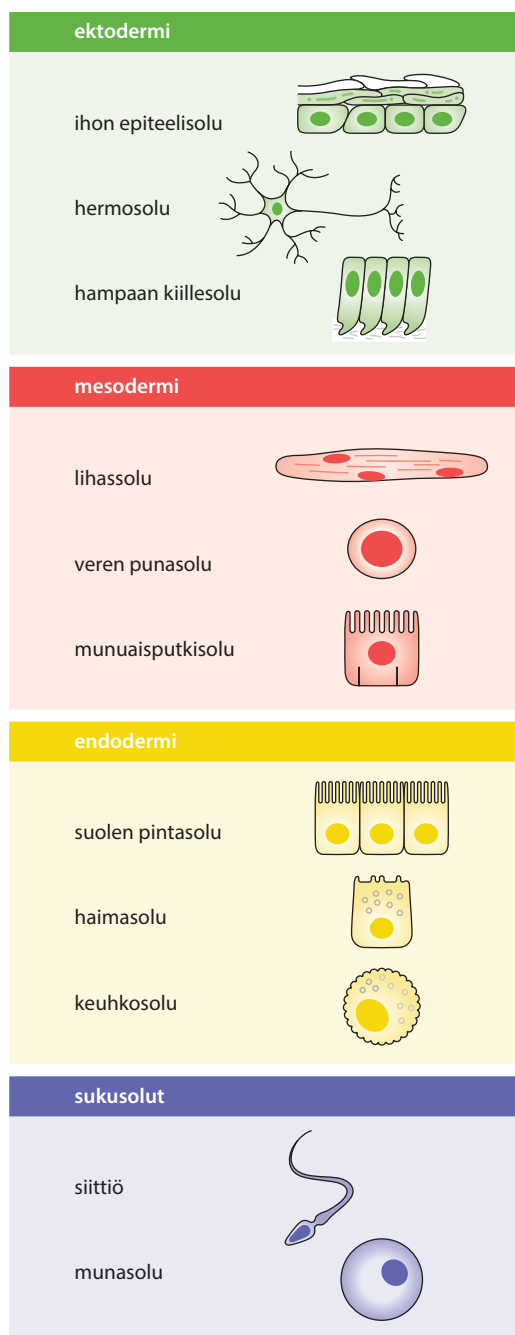
Solujen erilaistuminen tapahtuu vaiheittain. Se alkaa solujen vielä jakautuessa. Aikuisen lopullisesti erilaistuneet solut jakautuvat hitaasti verrattuna esimerkiksi sikiön soluihin tai niiden jakautuminen loppuu kokonaan. Määräytymisellä (determinaatio, kommittoituminen) tarkoitetaan

sitä varhaista tapahtumaa, jossa solut ohjelmoituvat jollekin kehityslinjalle. Solujen muoto ja ominaisuudet muuttuvat tämän jälkeen asteittain, ja lopulta solut saavat kyseiselle erilaistuneelle solutyypille ominaisen ulkomuodon ja toimintaominaisuudet. Esimerkiksi ihmisessä on ainakin 300 erilaista solutyppiä (kuva 1.4).

Hedelmöittynyt munasolu (ks. luku 8 Gametogeneesi ja hedelmöitys) jakautuu ja erilaistuu ensin sisäsolumassaksi (inner cell mass) ja ulkosolumassaksi. Tämän jälkeen sisäsolut muodostavat kolme alkion lehteä (ektodermi, mesodermi ja endodermi). Alkion lehdet erilaistuvat vaihe vaiheelta aikuisen elimistön lukuisiksi solutyypeiksi. Kaikilla näillä on oma geenien ilmentymiskuvionsa ja toimintansa. Hermosolut synnyttävät sähköisiä aktiopotentiaaleja kuljettaakseen viestin viejähaaraketta pitkin aisteista keskushermostoon. Sähköinen viesti muuntuu hermosolun synapseissa kemialliseksi eritykseksi, joka laukaisee vastaanotavassa solussa aktiopotentiaalien aallon. Haiman saarekesolut mittaavat jatkuvasti verensokeripitoisuutta. Aterian jälkeen pitoisuus suurenee, jolloin saarekesoluissa käynnistyy nopeasti voimakas insuliinin erityys, joka lisää sokerin hyväksikäyttöä eri elimissä. Munuaisputken solut seuraavat veren suolan määrää ja korjaavat suolatasapainon poikkeamat lisäämällä tai vähentämällä virtsan eritystä. Monisoluisten organismien solut toimivat yhdessä ja palvelevat erilaisten viestijärjestelmien yhdistämänä kokonaisuutta. Jokaisen solutyypin toiminta tukee elimistön tasapainoa ja yksilön hengissä säilymistä.

## Muotoutuminen

Muotoutuminen eli morfogeneesi on kehityksen keskeinen tapahtuma. Sen aikana eri elimet ja ruumiinosat saavat tyypillisen muotonsa ja kokonsa. Muotoutumista tapahtuu kaikissa kehityksen vaiheissa. Alkion varhaiskehityksen tärkein morfogeneettinen tapahtuma on gastrulaatio. Siinä eri alkiokerrokset muodostuvat solujoukkojen liikkeiden seurauksena. Selkärankaisalkion alkusuoli (vatsapuoli) ja hermostoputki (selkäpuoli) muodostuvat, kun kaksiulotteinen, levymäinen epiteelisolujen muodostama pinta poimuuntuu uurteiksi ja sulkeutuu putkiksi (ks. luku 9 Var-



**Kuva 1.4. Eri alkiokerroksista kehittyviä solutyyppejä.** Sukusolut eivät ole peräisin alkiokerroksista, vaan ne erottuvat omaksi populaatiokseen ennen gastrulaatiota.

## I Kehitysbiologian perusteet

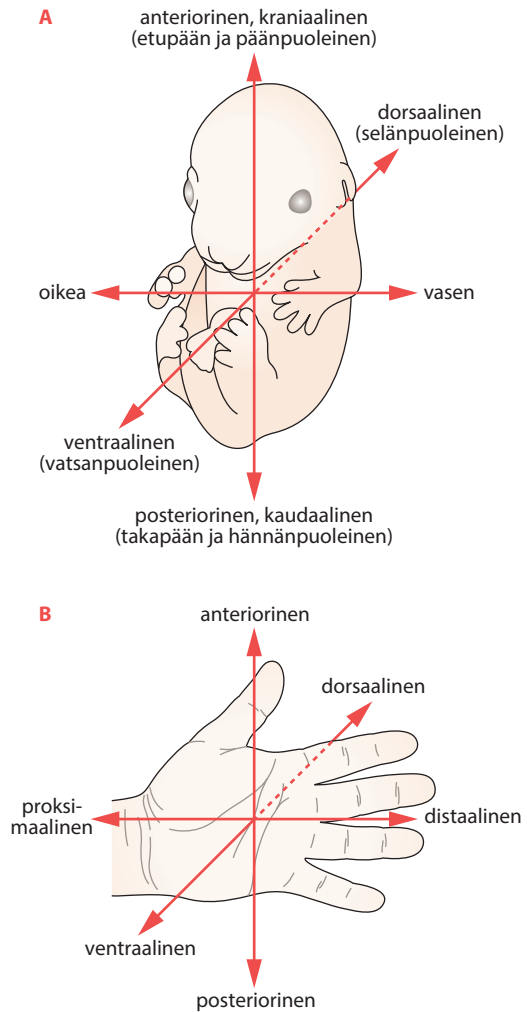
hainen alkionkehitys). Elinten muotoutumisessa eli organogeneesissa epiteelisolukon silmuista käynnistyvä laskostuminen ja haarautuminen sekä mesenkyymisolujen tiivistyminen (kondensaatio) ovat tyypillisiä morfogeneettisiä tapahtumia.

Morfogeneesia ohjaavat solujen väliset induktiiviset vuorovaikutukset (ks. luku 3 Solujen kommunikaatio ja induktiiviset vuorovaikutukset). Niihin liittyy aina solujen jakautumista, apoptoosia ja asteittaista erilaistumista. Epiteelipintojen muotoutuminen edellyttää solujen välisen tarttumisen (soluadheesio) ja solujen muodon muutoksia sekä solujen jakautumisen paikallista säätelyä. Solujen väliset induktiiviset vuorovaikutukset ovat tärkeitä myös mesenkyymien tiivistymien muodostumisessa.

Morfogeneesiin kuuluu myös solujen vaeltaminen eli migraatio. Jotkut soluryhmät syntyvät kaukana sieltä, missä ne lopulta toimivat, ja ne vaeltavat kehityksen aikana pitkiäkin matkoja. Esimerkiksi ituradan solut (sukusolut) erkaantuvat ensin muusta sisäsolumassasta, siirtyvät alkioita ympäröivän ruskuaispussin seinämään ja vaeltavat sieltä gastrulaation jälkeen alkusuolen seinämää myöten sukupiinaan (ks. luku 8 Gametogeneesi ja hedelmöitys). Hermostopienan solut puolestaan irtoavat ektodermistä, vaeltavat eri puolille sikiötä (ks. luku 9 Varhainen alkionkehitys) ja muodostavat useita kudoksia, mm. ääreishermoston osia, ihon pigmenttisoluja ja kasvojen luita. Solujen migraatiota ohjaavat sekä induktiivinen vuorovaikutus että vaeltavien solujen ja soluväliaineen vuorovaikutus.

## Kaavoittuminen

Alkionkehitykselle on välttämätöntä kolmiulotteisen kaavan syntyminen eli kaavoittuminen (patterning). Jotta taloa pääsee rakentamaan, piirretään ensin pohjapiirustus, jonka mukaan tehdään talon perustus, sitten seinät ja katto. Näin muodostuvat myös alkion akselit: selkä-vatsa, pää-häntä, oikea-vasen (kuva 1.5). Alkion eri osat saavat kaavoittumisessa identiteettinsä (ks. luku 3 Solujen kommunikaatio ja induktiiviset vuorovaikutukset). Niissä on jo varhain tieto siitä, mihin pitää muodostua pää, raajat ja kyljet. Tarkkoihin määräpaikkoihin syntyvät sitten eri elimet, kuten silmät, sormet ja kylkiluut. Kuten eri huoneilla



Kuva 1.5. Alkion akselit.

on käyttötärpeen mukaiset pohjapiirustuksensa, myös jokaisen elimen kehityksellä on kaavansa.

Kaavoittuminen ja muotoutuminen nivoutuvat läheisesti toisiinsa siten, että muotoutuminen seuraa kaavoittumista. Esimerkiksi aivojen kaavoittuminen tapahtuu, kun hermosto on vielä tasapaksu levyäinen rakenne, ja hampaan nystermin paikka kaavoittuu, kun hampaan kruunun pinta vielä on tasainen. Kaavoittuminen tapahtuu geenien ilmentymisen tasolla. Tunnetaan lukuisia geenejä, jotka säätelevät elinten kaavoittumista eri eläinlajeilla. Esimerkiksi banaani-karpäsestä

alun perin löytyneet homeoottiset geenit määräävät kaikkien eläinten ruumiin kaavoittumisen pää-häntäakselilla (ks. luku 2 DNA ja geenisäätelyn periaatteet). Eri eläinlajien keskeiset erot ovat kaavoittumiseroja. Nämä johtuvat yleensä eroista geenien säätelyalueilla, jotka määräävät sen, missä ja milloin geeni ilmentyy.

## Geenit sisältävät kehityksen ohjelman

Hedelmöityneessä munasolussa yhdistyvät äidiltä ja isältä tullut perintöaines. Jos solun perimä rullattaisiin auki, siitä muodostuisi noin 1,8 metriä pitkä DNA-ketju. Kaikki geenit ovat tumassa pakkauneina kromosomeihin. Ihmisellä kromosomeja on yhteensä 46, ja niistä kaksi on sukupuolikromosomeja ja loput autosomeja. Tyttöillä on kaksi X-kromosomia ja pojilla X- ja Y-kromosomit. Geenit kopioituvat tumassa esiaste-RNA:ksi. Siitä syntyy lähetti-RNA:ta, joka siirtyy solulimaan eli sytoplasmaan. Lähetti-RNA:n ohjeen mukaan aminohapot liittyvät ketjuiksi, joista syntyvät valkuaisaineet eli proteiinit (ks. luku 2 DNA ja geenisäätelyn periaatteet).

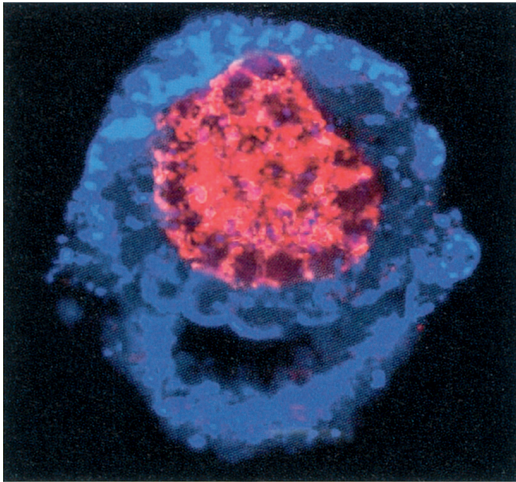
Ennen hedelmöityneen munasolun ensimmäistä jakautumista kaikki kromosomit – ja samalla niiden sisältämät geenit – kahdentuvat. Näin tytär soluilla on alkuperäinen määrä genejä. Sama toistuu kaikissa solunjakautumisissa. Sukusoluja lukuun ottamatta sikiön lähes kaikissa soluissa onkin samat geenit (ks. luku 8 Gametogeneesi ja hedelmöitys). Eri elinten soluissa on niiden toiminnasta ja ulkonäöstä riippumatta siis sama geneettinen tieto. Erilaisuus johtuu siitä, että solut lukevat eli ilmentävät osittain eri genejä, jolloin solujen tuottamien proteiinien kirjo on erilainen. Erilaistumisen moninaisuus perustuu niihin mekanismeihin, jotka säätelevät kehitystä ohjaavien geenien ilmenemistä eri paikoissa eri kehitysvaiheissa. Aikuisen elimissä ilmenevät ne geenit, jotka ovat tarpeen toimintojen ja rakenteen ylläpitoon. Monet sikiönkehitystä ohjaavat geenit puolestaan lopettavat toimintansa, kun elimen kehitys on päättynyt.

Hedelmöityneessä munasolussa on järjestelmä, joka määrää, mitä genejä solu ilmentää. Kehityksen edetessä solut saavat ulkopuoleltaan tiedon siitä, mitä genejä ne ilmentävät. Keskeisessä asemassa on solun lähiympäristö, jonka muodostavat naapurisolut ja soluväliaine. Solujen välinen viestintä on tärkein tekijä geenien ilmentämisen säätelyssä (ks. luku 3 Solujen kommunikaatio ja induktiiviset vuorovaikutukset). Myös sikiön ulkopuolelta eli ympäristöstä tulevat ärsykkeet voivat olla tärkeitä kehityksen säätelijöitä. Esimerkiksi krokotiileilla munien haudontalämpötila vaihtelee ympäristön mukaan ja säätelee sukupuolen määräytymistä. Nisäkkäillä alkion ulkopuolelta vaikuttavat tekijät eivät ole normaalin kehityksen säätelyssä yhtä merkittäviä kuin muilla eläimillä. Kuitenkin kehitystä voivat häiritä ns. teratogeeniset tekijät eli teratogeenit, kuten alkoholi, lääkeaineet, säteily tai virusinfektiot (ks. luku 7 Sikiönkehitys ja sen häiriöt).

## Erilaistuminen etenee vaiheittain

Sammakkoeläinten munasolu on epäyhtenäinen jo ennen hedelmöitystä. Hedelmöityessään sammakon munasolu kaavoittuu, kun siittiön tunkeutumiskohta määrää selkä-vatsa-akselin suunnan. Jo ensimmäisten solunjakautumisten jälkeen tytär solut ovat erilaisia. Jos nelisolainen kynsisammakon alkio halkaistaan selänpuoleiseen ja vatsanpuoleiseen osaan, puolikkaat muodostavat eri osia alkioista. Vain se puolikas, johon selänpuoleiset rakenteet jäävät, kykenee muodostamaan kokonaisen yksilön (ks. luku 3 Solujen kommunikaatio ja induktiiviset vuorovaikutukset).

Nisäkkäiden alkion ensimmäiset solut (blastomeerit) säilyttävät kykynsä kokonaisen yksilön muodostamiseen ensimmäisten jakautumisten aikana (ks. luku 9 Varhainen alkionkehitys). Blastomeerit alkavat erilaistua, kun osa niistä jää alkion keskelle muiden kokonaan ympäröimäksi. Näiden solujen kohtalon määrää muuttunut ympäristö, ja ne määräytyvät eri linjalle kuin ympäröivät solut. Ulkopuolella olevat solut muodostavat istukkaan



**Kuva 1.6. Rakkulavaiheisen alkion solujen varhainen erilaistuminen näkyy niiden ilmentämien geenien eroina.** Blastokystin epiblastin solut ilmentävät Oct4-transkriptiotekijää (punainen). Alkiota ympäröivät trofoblastit sekä primitiivisen endodermin solut ilmentävät Pem-transkriptiotekijää (sininen). Kuva: Janet Rossant ja Dan Strumpf.

ja sikiökalvoihin liittyviä rakenteita, kun taas sikiö kehittyy keskelle jääneistä soluista. Nämä jakautuvat ja muodostavat blastokystissä eli rakkulavaiheisessa alkiossa sisäsolumassan. Solujen erilaistuminen etenee sisäsolumassassa, kun blastokystin onteloon kosketuksissa olevat solut muodostavat primitiivisen endodermin (hypoblastin) (kuva 1.6). Tästä varhaisesta endodermisolukosta kehittyy sikiön ulkopuolisia (ekstraembryonaalisia) kudoksia. Muut alkionystyn solut muodostavat alkiolevyn (epiblastin), josta kehittyy valtaosa alkiota. Tässä vaiheessa määräytyy myös alkion selkä-vatsa-akseli.

Solujen erilaistuminen etenee sikiönkehityksen aikana asteittain, ja tämä näkyy sikiön ilmentämien geenien muutoksina. Lopullisesti erilaistunut aikuisen yksilön solu ilmentää sille tyypillisiä geenejä ja tuottaa proteiineja, joita ei ole välttämättä muiden elinten soluissa. Samalla se lakkaa ilmentämästä lukuisia sikiönkehitystä sääteleviä tai kehittyville kudoksille ominaisia geenejä. Mekanismit, joilla kehitysgeenien ilmeneminen estyy, ovat ainakin suurimmaksi osaksi palautuvia (ks. luku 4 Solujen keskeiset tapahtu-

mat ja kantasolut). Vaikka elinten morfogeneesi ja kaavoittuminen määräävät lopullisen muodon ja ovat edellytys elimen normaalille toiminnalle, elinten erilaistuminen ja muotoutuminen ei ole riippuvainen paikasta. Normaalin näköinen raaja voi kehittyä väärään paikkaan, jos raajan kehitystä ohjaava geeni aktivoidaan väärässä paikassa (ks. kuva 2.7 ja 3.10).

## Kantasolut – monikykyisiä hyvässä ja pahassa

Nisäkkäiden varhaisalkion solut eivät ole määrättyneet lopullisesti. Kokeet, joissa irrotettiin 32-soluisen hiiren alkion solut toisistaan, osoittivat, että solut ovat täyskykyisiä eli totipotentteja. Myös alun perin ulommaisiksi jääneet solut voivat yksin muodostaa koko alkion, jos niiden annetaan muodostaa tiivis solurykelmä. Silloin muiden ympäröimiksi joutuvat solut ohjelmoituvat uudestaan muodostamaan alkiota. Blastokystin sisäsolumassan soluilla on kyky muodostaa kaikki alkion kudokset istukkaa lukuun ottamatta. Ne ovat erittäin monikykyisiä eli pluripotentteja. Ihmisalkiossa on vielä alkiolevyvaiheessakin säilynyt pluripotenttisyys, koska samanmunaiset kaksoset voivat erkaantua toisistaan vasta tässä vaiheessa kahdeksi täydelliseksi yksilöksi.

Erilaistuvien solujen kyky määräytyä uudestaan tai muodostaa toisenlaisia soluja vähenee sitä mukaa kun erilaistuminen etenee. Kuitenkin aikuisellakin yksilöllä on elimistössään kantasoluja, jotka ovat säilyttäneet kyvyn jatkuvaan jakautumiseen ja erilaistumiseen. Tällaisia soluja tunnustetaan jatkuvasti lisää. Niitä on jopa keskushermostossa, jota aikaisemmin pidettiin lopullisesti erilaistuneena kudoksena, jossa hermosolut eivät enää uusiudu. Kantasoluja on kaikissa aikuisen uudistuvissa kudoksissa, muun muassa luuytimessä, joka tuottaa veren ja luun soluja, ihossa, joka uudistuu koko ajan, ja suolistossa, jonka pintaepiteeli vaihtuu jatkuvasti (ks. luku 4 Solujen keskeiset tapahtumat ja kantasolut).

Aikuisen lopullisesti erilaistuneet solut pystytään nykyisin ohjelmoimaan takaisin monikykyi-

siksi kantasoluiksi molekyylibiologian keinoin. Tekniikka perustuu siihen, että solut pakotetaan ilmentämään varhaisen alkion soluille tyypillisiä transkriptiotekijöitä (iPS-solut, ks. luku 4 Solujen keskeiset tapahtumat ja kantasolut). Erilaistuneet solut voidaan monissa tapauksissa myös ohjelmoida suoraan toiseksi soluiksi, kun näiden ”transkriptiotekijäkoodi” tunnetaan. Näiden menetelmien avulla voidaan ihmisen omia soluja periaatteessa käyttää kudosten rakentamiseen. Syöpäkasvaimissa solujen erilaistumisaste vähenee, solu irtaantuu elimistön säätelystä, alkaa jakautua nopeasti ja muodostaa kasvaimia. Useimmista syöpätyypeistä onkin löydetty akti-

voituneina sikiönkehitykseen vaikuttavia geenejä. Syöpää voidaan tarkastella väärälle raiteelle johtaneena solujen kasvulinjana, jossa erilaistumisen kello on kääntynyt taaksepäin ja solu saa uudelleen sikiön solujen tai kantasolujen piirteitä.

Äärimmillään aikuisen solujen piilevä täyskykyisyys tulee esille aikuisen eläimen somaattisesta solusta kloonatuissa yksilöissä (ks. luku 4 Solujen keskeiset tapahtumat ja kantasolut). Kloonauksen onnistuminen osoittaa, että sikiökauden aikana toimineet kehityksen perusmekanismit voidaan aktivoida uudelleen käyntiin, vaikka ne ovat kerran aikaisemmin pysähtyneet.