



FRAMTIDENS MAT

OM HUSDJURSAVEL OCH VÄXTFÖRÄDLING





Framtidens mat – om husdjursavel och växtförädling, andra utgåvan

ISBN 978-91-981907-2-4 (tryck svenska)

ISBN 978-91-981907-4-8 (PDF svenska)

ISBN 978-91-981907-1-7 (PDF engelska)

Redaktör: Anna Lehrman

Författare: Anna Lehrman, Sevasti Chatzopoulou, Dennis Eriksson, Elisabeth Jonas, Fredrik Levander, Alessandro Nicolia, Lotta Rydhmer, Helena Röcklinsberg, Per Sandin och Li-Hua Zhu.

Layout: Viktor Wrange, Wrange Design AB

Illustrationer: Fredrik Saarkoppel, Kobolt Media AB

Foto: Istockphoto.com (om ej annat anges)

Tryck: TMG Tabergs

Papper: 130 gr Arctic Matt (inlaga)
och 300 gr Munken Polar Laminated (omslag)

Citering: Lehrman, A. (red.). 2020. Framtidens mat – om husdjursavel och växtförädling. Uppsala, SLU. ISBN 978-91-981907-4-8

www.slu.se/shapingourfood



Den här knappen tar
dig till innehållssidan!



Innehåll

5	Förord	55	Regelverket för bioteknikbaserad växtförädling och djuravel i EU
7	Förädlingens och avelns historia	56	Innesluten användning
15	Livets byggstenar	57	Avsiktlig utsättning för fältförsök
15	Kromosomer	57	Kommersiell användning
15	Gener och proteiner	58	Märkning och spårbarhet
17	Genetisk förändring	60	Samexistens
17	Reproduktion	61	Andra organismer
18	Mutationer	62	Podcasten Shaping our food
18	Genotyp och fenotyp	64	Lästips
19	Gener och miljö	65	Ordlista
19	Epigenetik		
21	Avels- och förädlingsmetoder		
21	Djuravel		
21	Avelsmål		
22	Avelsvärde		
24	Korsningsavel		
24	Inavel		
25	Artificiell insemination		
26	Embryotransfer		
26	Kloning		
27	Molekylära urval		
28	Quantitative trait loci		
30	Markörbaserad selektion		
30	Genomisk selektion		
30	Genetisk modifiering av djur		
32	Växtförädling		
33	Förädlingssystem		
36	Somatisk hybridisering		
37	Mutationsförädling		
37	Kromosomtalsfördubbling		
38	Växtvävnadsodling		
38	Molekylärt urval		
40	Genteknik		
49	Etiken inom avel och förädling		
49	Etiken i djuravel		
51	Etiken i växtförädling		





Förord

Domesticeringen av växter och djur är en lång och ständigt pågående process som har format, inte bara de domesticerade arterna och landskapet, utan även människorna. Till exempel har utvecklingen av vårt immunförsvar påverkats mycket av den nära kontakt som funnits mellan människor och tamdjur. Förändringarna hos de domesticerade djuren har varit dramatiska, från den vilda djungelhönan som får två kullar med totalt 20 kycklingar per år, till dagens värphönor som producerar mer än 300 ägg per år. Och på hundra år har den genomsnittliga veteskörden ökat från 2 till 6 ton per hektar i många europeiska länder. Även om en del av denna ökning beror på odlingsmetoder, gödning och bekämpningsmedel, har den genetiska förändringen en stor del i framstegen.

Genom ökad kunskap om evolution, förståelse för ärftlighet och upptäckten av kromosomer och gener har vi gått från ett omedvetet urval till avancerade förädlings- och avelsprogram. Vår ständigt ökande kunskap om mekanismerna som styr olika egenskaper kan användas för att skraddarsy vår mat. Tack vare dessa förädlings-

och avelsprogram har vi nu tillgång till friskare djur och grödor och producerar mjölk, kött och spannmål i nivåer som våra förfäder bara kunde drömma om.

Med den här boken vill vi ge en översikt över de metoder och tekniker som används i arbetet med att utveckla husdjur och växter. Vi beskriver också lagstiftningen och diskuterar etiska aspekter kring användningen av genteknik i växtförädling och djuravel.

Denna bok är publicerad inom forskningsprogrammet Mistra Biotech vilket finansieras av Stiftelsen för miljöstrategisk forskning (Mistra) och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Denna andra utgåva är en förkortad version av utgåvan som publicerades 2014. Ett stort tack till Inger Åhman och Marie Nyman för synpunkter under arbetets gång och Karin Eriksson för ovärderlig hjälp med textbearbetningen.

FINANSIERAD AV





Målning i Nakhts grav i Egypten (1400-talet f.Kr.).

7000-9000 f.Kr.

Människan började samla in och så frön och domesticeringen av stora djur startade

Förädlingens och avelns historia

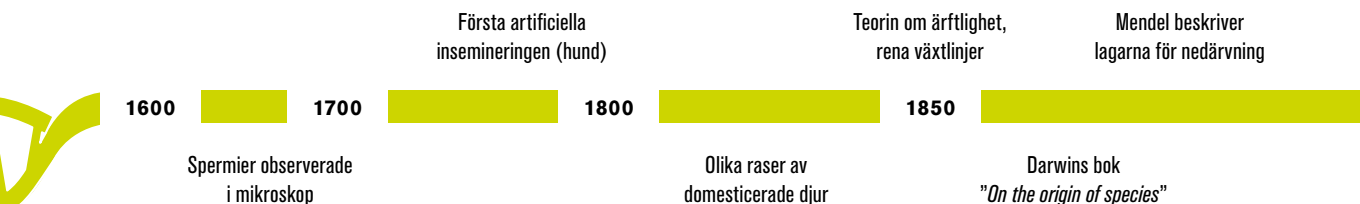
Förädlingen av växter startade omedvetet cirka 7000–9000 f.Kr., när människor började så frön från vilda växter istället för att bara samla in det man skulle äta. De plantor som gav mest avkastning förökades år efter år, och därmed ersattes den naturliga selektionen av konstgjord selektion styrd av människan. När nomadlivet byttes mot byliv baserat på odling blev jakten på djur koncentrerad till markerna kring byn. Detta minskade antalet vilda djur i närområdet, vilket i sin tur motiverade invånarna att hålla tamdjur. Det första djuret som domesticerades var hunden, för ungefär 10 000 år sedan. Rädsla för människor och aggressivitet var troligtvis de första egenskaperna som avlades bort. Allt eftersom människorna började välja föräldradjur kunde man också selektera för andra egenskaper, såsom storlek.

Hos växter är en av de mest problematiska egenskaperna frön som dräsar – de mogna fröna faller till marken eller sprids av vinden eller djur. Denna egenskap är avgörande för att en vild växt ska kunna sprida sig, men besvärlig om man vill skörda fröna på ett effektivt sätt. Därför var minskad dräsningsen av de första egenskaperna som man selekterade för i våra sädeslag. Insamlingen av frön från de bästa plantorna fortsatte samtidigt som jordbruket utvecklades; bevattning, ogrärensning och gödsling gav plantorna på åkern andra förutsättningar

än deras vilda släktingar som var tvungna att konkurrera om vatten, ljus, utrymme och näring. Det skulle dock dröja lång tid innan vi började förstå vilka mekanismer som ligger bakom grödornas förändring.

I mitten på 1800-talet kom teorin om ärftlighet och man upptäckte att man kunde skapa så kallade rena linjer genom inavel av växter (se sidan 34). Samtidigt visade Gregor Mendel att egenskaper såsom ärtfröets form och färg och plantans storlek nedärvs enligt ett visst mönster. Dessvärre skulle det dröja 40 år efter denna upptäckt innan man inom förädlingen insåg betydelsen av hans arbete. Darwins bok *On the Origin of Species* sålde däremot slut kort efter att den tryckts. Darwin förstod att egenskaper som är avgörande för överlevnad och reproduktion nedärvs, att dessa förmågor varierar och att resurserna är begränsade vilket gör att alla individer inte kan överleva. Genom att kombinera dessa tre insikter kunde han förklara evolutionen och hur domesticeringen fungerar, även om han inte visste något om gener.

När fler kontrollerade korsningar gjordes mellan olika raser eller sorter upptäckte man fenomenet heterosis (korsningseffekt) – när avkomman överträffar båda föräldrarna. Denna effekt är ofta framträdande i egenskaper





såsom resistens mot sjukdomar hos djur och biomassa hos växter. Ett decennium efter denna upptäckt förstod man att många egenskaper påverkas av flera gener, så kallade kvantitativa egenskaper, och man började utveckla statistiska modeller för att kunna ta hänsyn till sådana egenskaper inom djuraveln.

Liksom evolutionen är avel och förädling beroende av genetisk variation och rekombination av gener (utbyte av gener mellan kromosomer, se sidan 18). Den genetiska variationen kan vara mer eller mindre begränsad, speciellt i växter. Generna som styr en önskvärd egenskap kan också vara nära kopplade till gener för oönskade egenskaper, vilket innebär att selektion för den önskade egenskapen kan resultera i att du samtidigt selekterar för en oönskad. Upptäckten att mutationsfrekvensen (förändringar i generna) kan ökas har resulterat i ett viktigt verktyg inom växtförädlingen. Genom strålning eller gifter kan antalet mutationer ökas tiotusentals gånger. Få av individerna överlever men med lite tur kan ett dåligt anlag försvinna, eller så skapas en ny förmåga i de överlevande plantorna. De flesta kornsorter som odlas i dag bär på gener som förändrats genom sådana framkallade mutationer, och totalt finns det över 2 500 kända växtsorter som har utvecklats med hjälp av mutationstekniken. Inom djuraveln är en sådan metod inte möjlig, av etiska och ekonomiska skäl.

Jämfört med växter får djur väldigt få avkommor men genom utvecklingen av artificiell



Gregor Mendel, känd som "den moderna genetikens fader", odlade cirka 29 000 ärtplantor under sina studier av ärftlighet. Foto: Wikimedia Commons.

insemination fick uppfödarna ett effektivt sätt att producera flera avkommor från en hane än vad som skulle vara möjligt med naturlig parning. De första försöken med artificiell insemination gjordes på hundar 1780, men det var inte förrän i början av 1900-talet som metoden utvecklades för praktisk användning.

Spontan kromosomfördubbling, vilket ofta resulterar i större växter, hade tidigare noterats i vilda arter, men det var inte förrän i början av 1930-talet som man upptäckte att ett ämne kallat kolchicin kunde hindra kromosomerna

Kommersiell växtsort förädlad
genom kontrollerad korsning

Cellkultur
(växt)

Heterosis
(hybrideffekten) upptäcks

Haber & Bosch's metod för
kvävefixering

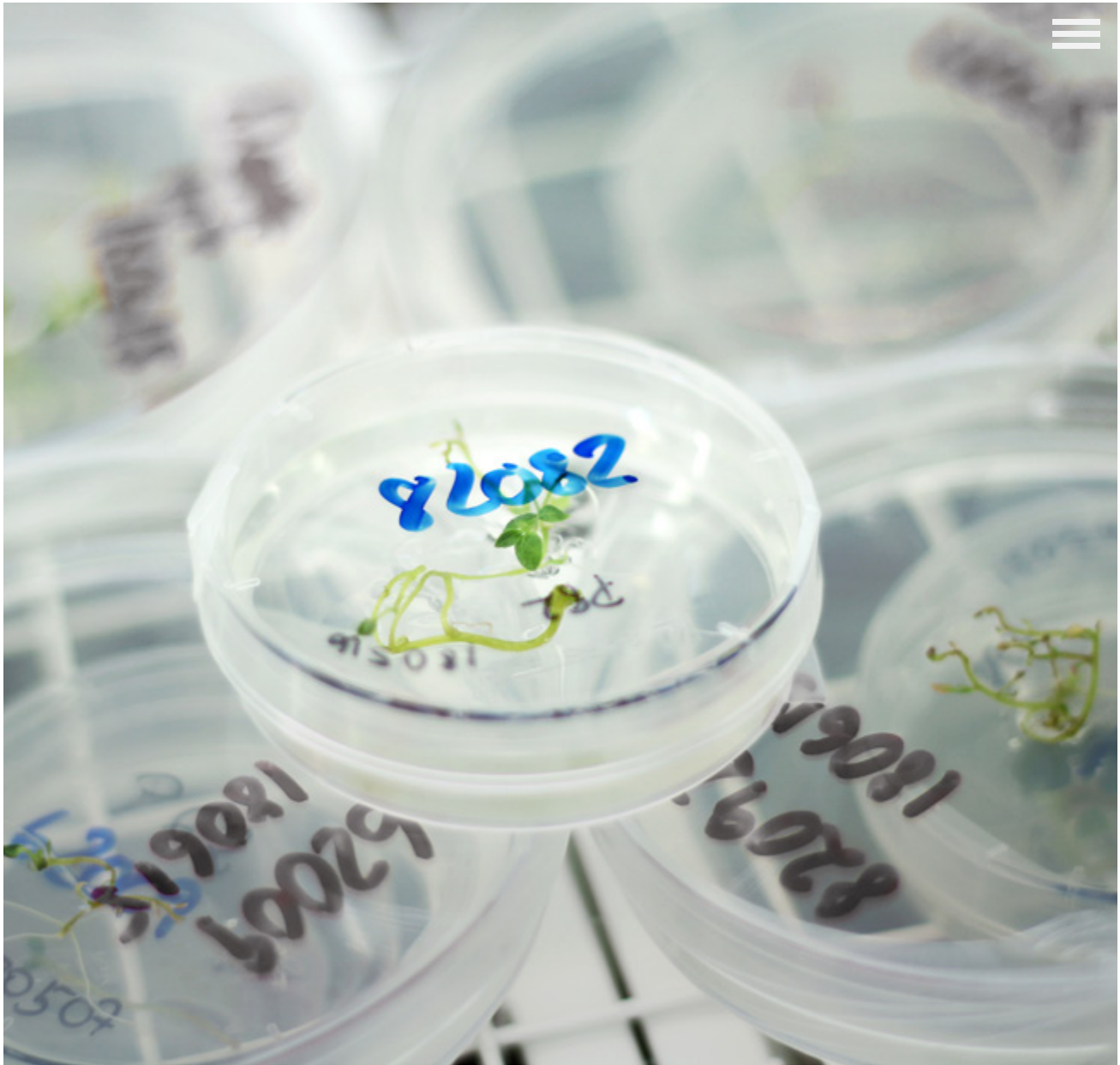
1900

1910

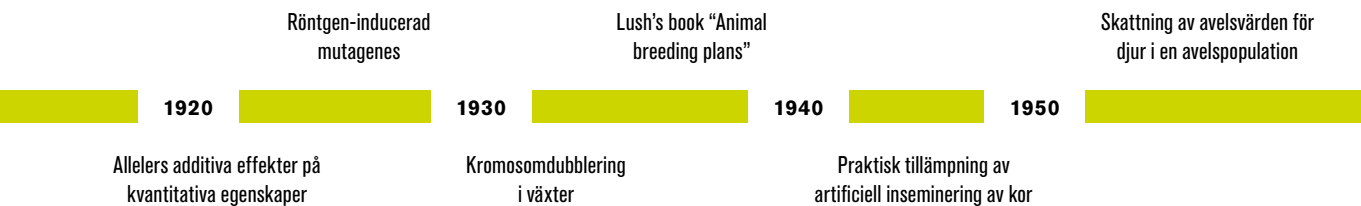
Växtsort förädlad för sjukdomsresistens
genom kontrollerade korsningar

Cellkultur
från växtembryo

Kromosomernas roll
(bärare av gener) beskrivs



Vävnadskultur är en metod där vävnad från en växt kan förmås att växa till en ny planta. Detta är ett viktigt verktyg inom växtförädlingen. Foto: Anna Lehrman, SLU





från att separera innan celldelningen. Därmed fick förädlarna ett verktyg med vilket de kunde öka kromosomantalet i växter och få fram större plantor. Med kolchicin blev det också möjligt att producera sterila växter. Genom att fördubbla de två uppsättningarna kromosomer (diploid) till en tetraploid (fyra uppsättningar) och sedan korsa tetraploiden med den ursprungliga diploiden skapas en triploid. En triploid är steril och bildar därför inga frön.



Kolchicin har använts bland annat till att ta fram vattenmeloner utan frön.

Parallellt med genombrotten inom genetiken togs de första stegen mot vävnadsodling – att driva fram plantor från celler i ett odlingsmedium, en viktig teknik i modern växtförädling. Två stora framsteg var provrörsbefruktningen som gjorde det möjligt att göra korsningar mellan nya arter och möjligheten att odla fram plantor från enstaka somatiska celler (kroppsceller, alltså icke-könsceller) och därigenom kunna producera tusentals plantor från en liten bit vävnad.

Eftersom Mendel studerade kvalitativa egenskaper, som färg och fröernas form, vilka styrs av få gener, och Darwin studerade kvantitativa egenskaper, som tillväxthastighet som styrs av många gener, verkade deras teorier först att motsäga varandra. Det var inte förrän under 1930-talet som forskare började förstå hur egenskaper nedärvs, och med upptäckten att det genetiska materialet består av deoxiribonukleinsyra (DNA) och beskrivningen av DNA-molekylens struktur föll bitarna på plats.

Flera år tidigare hade man lyckats framställa ammoniak från kvävgas och vätgas, men denna metod användes i första hand för att producera sprängämnen under första världskriget, innan den kom att användas för att producera konstgödsel i större skala. Gödningen fick en enorm effekt på jordbruket och växtförädlingen – den gröna revolutionen hade tagit sin början. Norman Borlaug utvecklade nya vetesorter, och den ökande användningen av ogräsmiddel motiverade förädling för herbicidresistenta grödor.

DNA-molekylens
beskrivs

Korn med
inducerade mutationer

Genetiska
koden beskrivs

Restriktionsenzymer
upptäcks

Första genetiskt modifierade
organismen (bakterie)

1960

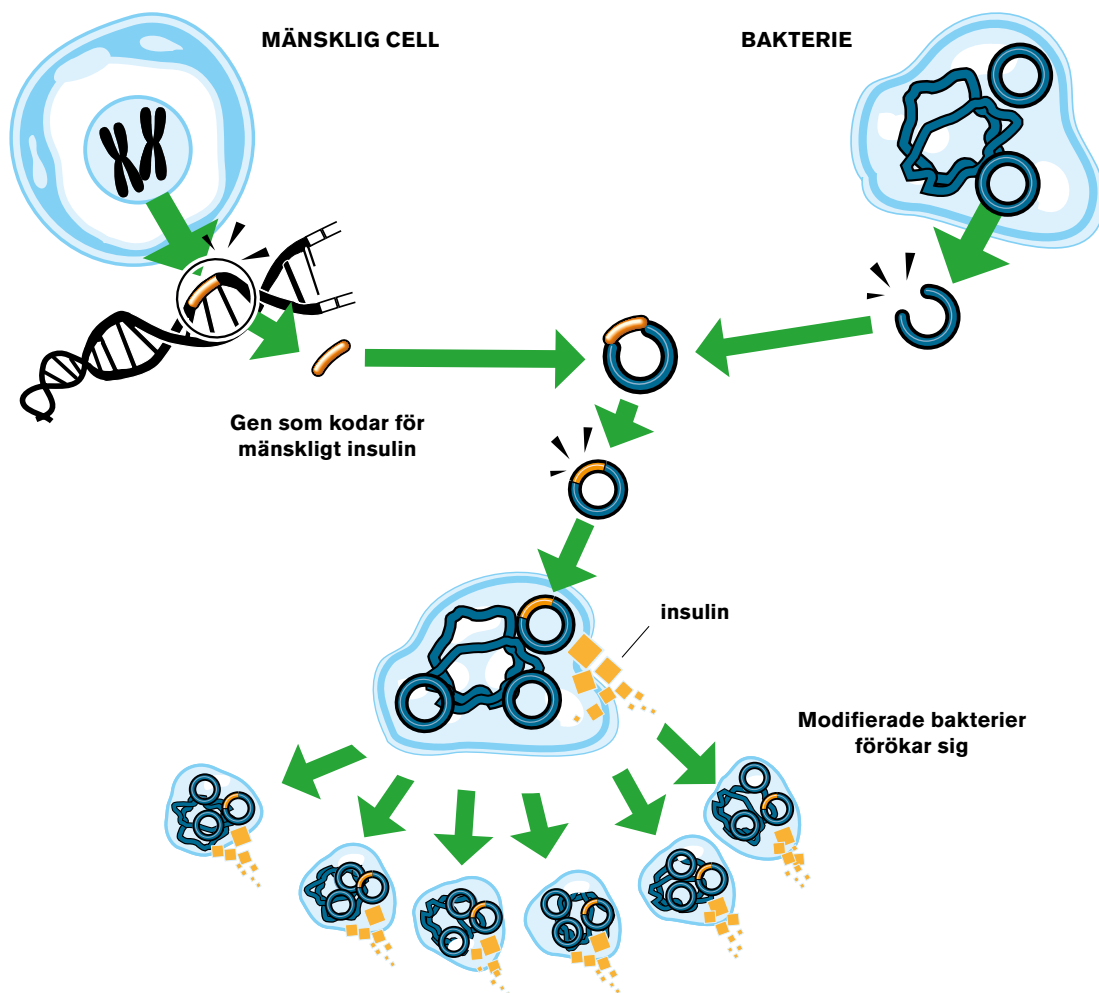
1970

Grödor toleranta mot
herbicer utvecklas

Provrörsbefruktning mellan
sexuellt inkompatibla växter

Somatisk hybridisering (celler
från olika arter) av växter

Embryotransfer
i nötkreatur



Den första genetiskt modifierade organismen var en bakterie. Idag produceras insulin av bakterier som har fått den gen som kodar för insulin infogad i en av dess plasmider. En plasmid är en liten DNA-ring.

Riktad mutagenes
utvecklas

Kalv föds efter
konstgjord befruktning

Första genetiskt
modifierade djuret

PCR-teknik för snabb
uppförökning av DNA

1980

Jordbakterie används för att
föra in nytt DNA i växter

Insulinproducerande bakterie
kommerialiseras

Genkartor
för djur



I början av 70-talet lyckades man för första gången sammanföra celler som inte var könsceller från två tobaksarter och därigenom skapa den första somatiska hybriden. Kunskaperna om cellernas funktioner och genreglering ökade och med möjligheten att använda restriktionsenzym, cellernas "saxar", kunde man klippa ut specifika gener i DNA. Detta var ett viktigt genombrott som resulterade i de första genetiskt modifierade (GM) organismerna, exempelvis den GM-bakterie som producerar insulin än idag.

I början av 80-talet lyckades forskare ta fram den första genetiskt modifierade växten, en tobak, med hjälp av jordbakterien *Agrobacterium tumefaciens*. Denna bakterie infogar sitt eget DNA i växtens DNA och gör att den bildar galler (tumörer). Nu hade man tekniken för att kunna byta ut de gallbildande generna mot de gener man önskade. Alla växter är inte mottagliga för *A. tumefaciens* vilket ledde till att man utvecklade andra metoder, till exempel en "genkanon" där generna man vill föra in skjuts in i växtcellerna. Snart producerades GM-grödor på flera håll i världen, först i olika försök och senare även i kommersiell odling.

Parallellt med denna utveckling på växtsidan blev artificiell insemination rutin inom grisproduktionen, och för att kunna få så många kalvar som möjligt från de bästa korna etablerades metoder för embryotransfer i mjölkkor. Genmodifiering utvecklades också för djur; det första GM-djuret var en mus som fick gener som styr tillväxt från en råtta. Men

den kommersiella tillämpningen av tekniken har varit begränsad på husdjur, främst på grund av etiska och ekonomiska aspekter.

Även om han låg bakom flera felaktiga och tvivelaktiga teorier (som eugenik) bidrog Francis Galton (1822–1911) till grunderna för en av de viktigaste metoderna som används inom husdjursaveln idag – genomik. Han var en av pionjärerna inom användningen av statistik för att beräkna kvantitativa egenskaper (egenskaper som ofta påverkas av flera gener och miljön), och samma slags statistik används än i dag. I genomisk selektion använder man sig av genetiska markörer som är spridda över hela genomet för att välja ut de mest lämpade individerna för fortsatt avel. Sedan början av detta århundrade har kostnaderna för analyser av genetiskt material minskat drastiskt. Parallellt har utvecklingen i datakapacitet gjort det möjligt att analysera stora data-set, vilket behövs för de statistiska analyserna.

På grund av det låga antalet avkommor och de långa generationstiderna har man inom djuraveln haft en annan strategi än i växtförädlingen. Forskarna har fokuserat främst på skattning av djurs avelsvärden och användningen av genkartor, vilka ger information om hur generna är placerade på kromosomerna (se sida 29). Genkartor innehåller genetiska markörer som, även om de (oftast) inte kodar för någon speciell egenskap, kan vara lokaliserade nära gener som påverkar viktiga egenskaper. Idag används sådant markörbaserat urval i både växtförädling

Första domesticerade
GM-djuret (gris)

"Genkanon" för att
introducera nytt DNA i växter

Markörbaserat
urval i djuravel

Första djuret från kloning
av somatisk cell (får)

1990

Fältförsök med
en GM-gröda

Kommersiell GM-gröda
(virusresistent tobak, Kina)

RNA-interferens
i växter



Fisken AquAdvantage® Salmon (bakre) är en GM-atlantlax som bär på en gen för tillväxthormon från Chinooklax vilken gör att den växer snabbare under ett tidigt skede av livet och därför når full storlek ett år tidigare än ickemodifierad atlantlax (främre). Foto: AquaBounty Technologies)

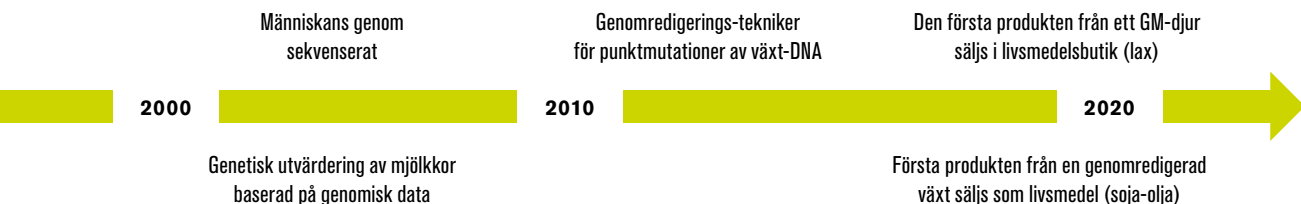
och djuravel. Sedan det första husdjuret (höns) fick hela genomet sekvenserat (kartläggning av ordningen på baserna A, T, C och G i hela arvsmassan) har de flesta lantbruksdjurens genom sekvenserats. DNA-sekvensen berättar dock inget om funktionen hos generna.

Termen “proteomik” myntades inte förrän under tidigt 1990-tal, även om kartläggning av proteiner startade redan på 1970-talet. Det positiva med proteomik är också vad som gör det svårt. Till skillnad från genomet som är tämligen konstant, skiljer sig sammansättningen av proteiner mellan celler och från en tidpunkt till en annan. Informationen används för att hitta och förstå funktionen hos olika gener och kan också användas inom avel och förädling (se sidan 39).

Utvecklingen från slumpvisa mutationer genom strålning eller behandling med gifter till precisa förändringar genom riktade mutationer, också

kallat genom-redigering, har tagit cirka 40 år.

Det är inte förrän på senare år som dessa nya metoder har blivit tillräckligt förfinade för att komma till kommersiell användning i jordbruket. Den mest kända genomredigerings-tekniken är CRISPR/Cas9 som presenterades 2012, men liknande tekniker hade utvecklats tidigare, zink finger nucleaser (ZFNs) och speciellt transcription activator-like effector nucleases (TALENs) under 2010. Med dessa ”gensaxar” är det möjligt att förändra specifika gener, jämfört med andra mer slumpmässiga metoder (se sidan 43). Framgången med CRISPR/Cas ligger i att det är snabbare och smidigare än ZFN och TALEN.





Livets byggstenar

Varför ser vi och alla djur, växter och andra organismer ut och beter oss som vi gör? I det här kapitlet ger vi en översikt över de strukturer och mekanismer som är basen för alla organismer, med fokus på växter och däggdjur.

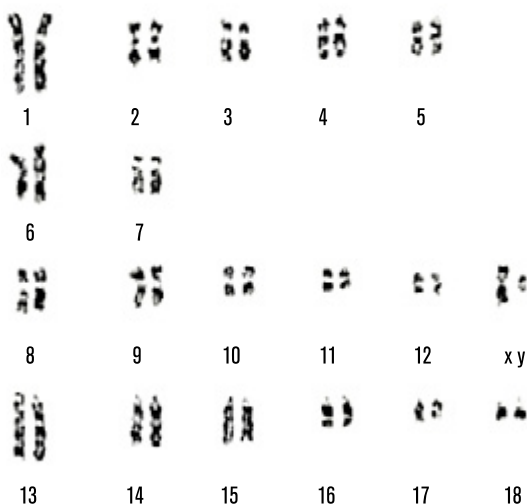
Kromosomer

Det finns blomfrön som är mindre än punkten i slutet av den här meningen. I dessa frön, precis som i djurcellerna, finns genomet, det vill säga alla generna. De får fröet att gro och växa till en planta av specifik storlek och utseende, som trivs i en speciell miljö, blommar vid en viss tidpunkt och har en speciell doft. All information som behövs för att reglera växtens liv måste finnas i fröet.

Generna finns i kromosomer, vilka förekommer i par hos däggdjur och många växter. Sådana organismer kallas diploider. Till

exempel har tamgrisen 19 kromosompar där varje par består av en kromosom från mamman och en från pappan. Anlagen kallas alleler, och för varje gen finns en allel från mamman och en från pappan. En homozygot har samma alleler på båda kromosomerna, medan allelerna hos en heterozygot är olika. Hur de olika allelerna i en gen tillsammans påverkar egenskapen beror på om de är dominant eller recessiva (som till exempel allelerna för bruna eller blå ögon) eller om de har en additiv effekt (som längd) (se också Genotyp och fenotyp på s.18).

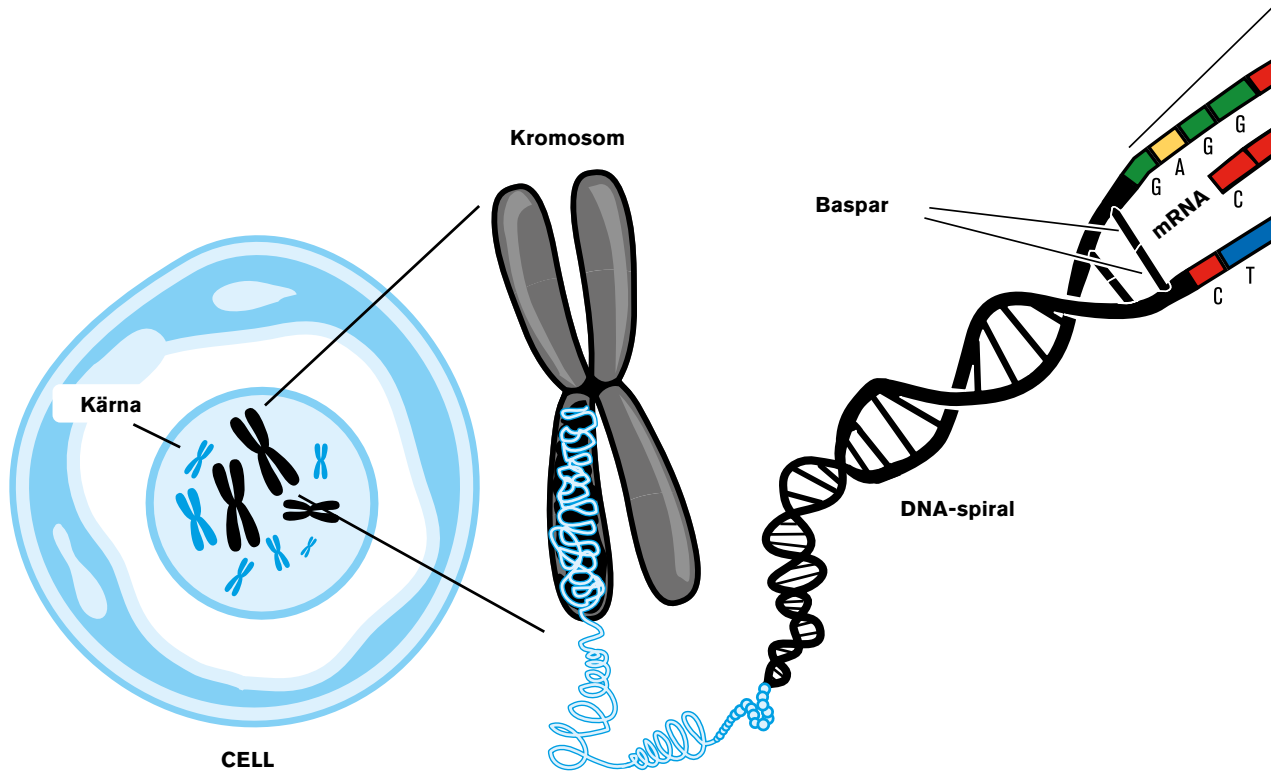
Många växter har fler än två uppsättningar kromosomer – de är polyploider. Autopolyploider är resultatet av kromosomfördubbling inom samma art, medan en allopolyploid är resultatet av en kombination av kromosomer från olika arter. Exempelvis är durumvete en allotetraploid – den har två uppsättningar kromosompar som kommer av en hybridisering mellan vilda gräs. Durumvete har i sin tur hybridiserat med ytterligare ett vilt gräs (diploid) vilket resulterat i dagens hexaploida brödvete som bär på tre uppsättningar kromosompar (sex kromosomuppsättningar).



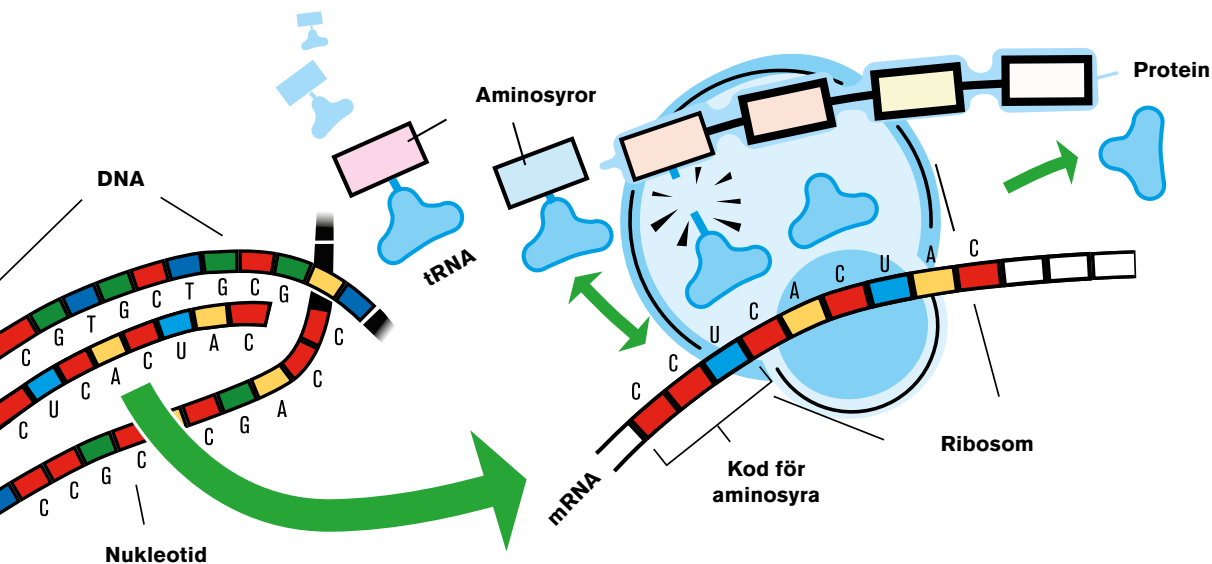
Grisar har 38 kromosomer, 19 från respektive förälder.

Gener och proteiner

Som nämnts tidigare består generna av DNA. DNA är en dubbelhelix som ser ut som en spiralformad steg där varje steg utgörs av ett par av de fyra nukleotiderna adenin (A), guanin (G), cytosin (C) och tymin (T). Dessa benämns ofta som "baser". A sitter alltid i par med T och C sitter alltid i par med G vilket gör att de två "strängarna" på stegen är varandras spegelbilder. Basernas ordning bestämmer vilken aminosyra de kodar för. Varje aminosyra kodas av tre baser,



Kromosomerna består av DNA tätt packat av proteiner. Dessa proteiner kan veckla ut kromosomen så att DNA-strängarna exponeras och kan kopieras. Ett enzym använder en av strängarna som mall och bildar en "budbärar-ribonukleinsyra" (messenger ribonucleic acid - mRNA). Skillnaden mellan mRNA och DNA är att det förstnämnda är enkelsträngat och i stället för tymin innehåller det uracil. Utifrån den genetiska koden översätts sedan mRNA till en specifik sekvens av aminosyror, som sedan viks till ett funktionellt protein. Precisa veckningar och regleringar på den här nivån är unika för komplexa organismer som djur och växter, jämfört med enkla organismer som bakterier.



till exempel utgör de tre baserna AAG koden för aminosyran lysin.

Proteiner styr nästan alla processer som sker i en levande organism. Exempelvis är enzymer och vissa hormoner proteiner, och även muskler består till största delen av protein. Proteiner består av aminosyror och det är deras specifika ordning som avgör strukturen och egenskaperna hos proteinet, exempelvis värmekänslighet, om det binder till andra specifika protein eller om proteinets form och funktion påverkas av ett ändrat pH-värde.

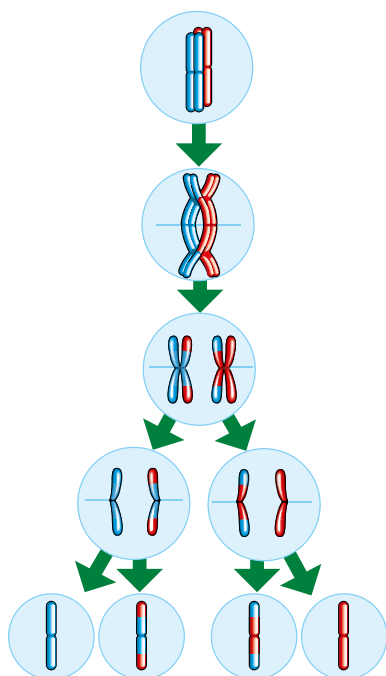
Genetisk förändring

Alla arters förmåga att överleva och föröka sig beror på om de kan anpassa sig till nya eller förändrade miljöer. Stor genetisk mångfald ökar sannolikheten för att några av individerna i en population har de egenskaper som är fördelaktiga i en specifik miljö, vilket gör att dessa individer kommer att få fler avkomor än andra individer. Mutationer och rekombination (utbyte) mellan kromosomerna skapar den genetiska mångfald (diversitet) som är avgörande för evolutionen.

REPRODUKTION

Generna kodar för produktionen av olika protein och de för över denna information till de nya cellerna vid celledningen. Encelliga organismer, som bakterier, förökar sig genom en enkel celledning. Bakteriers gener finns oftast i en cirkulär kromosom och i flera mindre ringar av DNA eller RNA, kallade plasmider. Djur och växter består däremot av myriader av celler med specialiserade funktioner. Några av dessa är könsceller, så kallade gameter.

Könscellerna bildas i två steg. Först skapas kopior av kromosomerna och de två dubblerade kromosomerna (för en diploid organism) radas upp bredvid varandra. I detta stadium kan bitar av DNA-strängarna på motsvarande kromosomer byta plats med varandra i en process som kallas rekombination. Detta utbyte gör att avkomman får en genupsättning som skiljer sig från båda föräldrarna. I nästa steg dras respektive kromosompar åt var sitt håll och cellen delar sig. Därefter separeras kromosomparen och cellerna delas ytterligare en gång, vilket resulterar i könsceller med halva uppsättningen kromosomer (jämfört med de somatiska cellerna). I en diploid organism har könscellerna bara ett exemplar av



Rekombination av gener under meiosen. När könsceller (spermier och äggceller hos djur) bildas, utbyter varje kromosompar vissa delar av sitt DNA med varandra innan de separerar. Vilka delar av kromosomerna som byts ut varierar. Ibland blir utbytet obalanserat vilket kan ge skadliga effekter på organismen.

varje kromosom. Vid befruktningen slås halva moderns och halva faderns genetiska uppsättning samman och den nya individen får därmed en unik genuppsättning.

Det finns djur som kan föröka sig asexuellt, till exempel bladlöss, och många växter kan också föröka sig vegetativt genom lökar (t. ex. vitlök), knölar (t. ex. potatis) eller revor (t. ex. jordgubbar).

MUTATIONER

Vilken som helst av baserna i DNA-strängen kan bytas ut mot en annan, detta kallas mutation. För att mutationen ska ha någon effekt måste förändringen ske i en region som kodar för ett protein eller är involverad i uttrycket av en gen. Dessutom måste ändringen av bas leda till en ändrad aminosyra (flera aminosyror har mer än en kod), och även om aminosyran ändras måste

det leda till att proteinet får en ändrad funktion för att mutationen ska få någon effekt. De flesta mutationer repareras av cellen, men om en mutation sker i en könscell och inte repareras nedärvs mutationen till nästa generation.

Många mutationer i könsceller är skadliga, en del så skadliga att avkomman aldrig utvecklas. Trots detta är mutationer avgörande för evolutionsprocessen. En liten del av mutationerna är till fördel för förmågan att överleva och föröka sig (fitness). Beroende på hur mycket mutationen påverkar fitness kan den nya allelen bli mer och mer vanlig i populationen för varje ny generation. Kombinationen av etablerade mutationer, blandningen av föräldrarnas kromosomer och rekombination av alleler ökar den genetiska variationen i en population. Det gör det lättare för populationen att anpassa sig till ändrade förhållanden eftersom sannolikheten är större för att några individer klarar förändringarna, jämfört med om variationen varit låg. Om en population är isolerad kan en sådan utveckling leda till att det bildas en ny art. Inom avel och förädling använder sig människan av den genetiska variationen för att göra urval baserat på vilka egenskaper man vill ha i grödor och husdjur.

Genotyp och fenotyp

En organisms genuppsättning kallas genotyp. Hur organismen ser ut är dess fenotyp. Två individer med samma fenotyp kan alltså ha olika genotyp, exempelvis gener med "dolda" effekter såsom recessiva alleler hos en heterozygot. Två svarta får har samma färgfenotyp men den ena kan ha genotypen BB och den andra Bb. I detta fall är allelen B (Black) dominant över den recessiva allelen b (brown). Ett får måste alltså få b-allelen från båda sina föräldrar för att få brun päls. Oftast är egenskaper mer komplicerade än så och beror på samverkan mellan flera gener som kan ge upphov till flera olika fenotyper.



Allelen för svart färg hos får är dominant över allelen för brunt, därför är svarta får vanligare.

Många egenskaper styrs av flera gener med additiva effekter vilket resulterar i avkommor med fenotyper som är en kombination eller ett melanting av föräldrarnas fenotyper. Det är svårt att med blotta ögat särskilja specifika genotyper bakom egenskaper som nedärvs på detta vis. Istället kan man försöka skatta genotypen utifrån individen och dess släktingars fenotyp. För att komplicera det ytterligare så påverkas fenotypen också av miljöfaktorer.

GENER OCH MILJÖ

En organisms fenotyp beror alltså inte bara på genotypen, utan dess egenskaper kan också vara ett resultat av miljöns påverkan på genernas uttryck. Vissa egenskaper påverkas inte nämnvärt av miljön, medan andra varierar kraftigt med specifika förutsättningar. När en genotyp resulterar i olika fenotyper i olika miljöer kallas det gen-miljöinteraktion. Det kan vara viktigt för till exempel modersbeteende hos suggor; kanske är suggan med den bästa genotypen med avseende på modersbeteende i en intensiv produktion inomhus inte den bästa suggan i ett frigående system utomhus? Ett annat exempel är granplantor där man väljer genotyp utifrån vilken region de ska planteras i. För vissa egenskaper är det lätt att förutsäga hur avkomman

blir genom att titta på föräldrarna, men för andra egenskaper är sådana förutsägelser väldigt svåra på grund av miljöns inverkan.

EPIGENETIK

Epigenetik är ett relativt nytt men växande forskningsområde där man undersöker ärftliga, men reversibla, förändringar i genuttrycket som inte beror på ändringar i gensekvensen. I alla levande organismer slås delar av genomet på och av vid specifika tidpunkter i specifika celler under olika utvecklingsstadier. Denna reglering sker genom en rad kemiska reaktioner, och i vissa fall förs dessa förändringar över i de nya cellerna, efter celledelning, och vidare till nästa generation. Nedärvningen av sådana epigenetiska regleringar anses vara viktig för många arters förmåga att snabbt kunna anpassa sig till nya eller förändrade miljöer.

Epigenetiska förändringar kan till exempel ske under de första stegen av genregleringen när DNA-strängen vecklas ut eller genom att metylgrupper binds till DNA. För en förädlare är det viktigt att förstå vilka alleler som betar sig på ett epigenetiskt vis eftersom de inte nedärvs på klassiskt mendelskt vis. Något som gör det svårare att koppla sådana alleler till olika egenskaper.



Avels- och förädlingsmetoder

Som beskrivits i tidigare kapitel har människan förädlat växter och djur mer eller mindre medvetet under en väldigt lång tid. Med ökad kunskap om hur egenskaper nedärvs och om molekyलगenetik samt tillgång till kraftfulla datorer och statistiska mjukvaruprogram har nya avels- och förädlingsmetoder kunnat utvecklas.

Djuravel

Det finns två grundläggande frågor som husdjursuppfödare måste ställa sig vid valet av föräldrar att para. Den första handlar om avelsmålet: "Vilket djur är det bästa?" Är det kon som producerar mest mjölk, den som lever längst, eller den som både producerar mycket mjölk och har friska klövar? Är det suggan som ger stora kullar, den som har fler spenar, den som tar hand om sina kulingar bäst, eller den friskaste? Frågorna kan diskuteras, och det finns inte ett enda rätt svar, utan man måste definiera målet för avelsarbetet. Avelsmålet anger riktningen och avgör vilka djur som får bli föräldrar.

Den andra frågan är "Hur kan vi identifiera det bästa djuret för att kunna förbättra kommande generationer?" För att kunna svara på den frågan krävs kunskap om både djuravel och genetiska principer. I det här kapitel försöker vi förklara båda dessa frågor.

Husdjursavel är en långsiktig process i flera steg som har som mål att förbättra framtida populationer för att bibehålla livsmedelsproduktionen eller att bevara djurpopulationer. För att aveln ska bli framgångsrik krävs att man studerar genetiken bakom egenskaperna och skattar i vilken utsträckning en egenskaps variation mellan individer beror på genetiska effekter, det vill säga vilken arvbarhet egenskapen har (se

sidan 23). Det andra steget i en sådan undersökning är att bestämma i vilken grad olika egenskaper är genetiskt kopplade till varandra. Det genetiska sambandet mellan två egenskaper beskrivs med den "genetiska korrelationen". Både arvbarhet och genetisk korrelation behöver skattas för att man ska kunna förutsäga resultatet av avelsprogrammet. Steg tre är att registrera de egenskaper som ska förändras. Det är viktigt att varje individ får en unik identitet så att släktskapet mellan djur kan följas. Denna information kan sedan användas för att skatta deras avelsvärden. De mest lämpade djuren, de med högst avelsvärde, väljs som föräldrar till nästa generation. Exaktheten i avelsvärdet beror på den tillgängliga informationen. I följande avsnitt beskrivs dessa steg mer detaljerat.

AVELSMÅL

Steg ett är att bestämma vilket mål man har, exempelvis snabbväxande friska grisar som inte är aggressiva. För nötkreatur skulle avelsmålet kunna vara robusta kor som kan kalva utan problem. Men målet ändras ofta över tid på grund av förändringar i lantbrukarnas och marknadens behov. Avelsmålet kan också skilja sig mellan olika organisationer och inom och mellan olika länder.

Ett avelsmål är ofta inriktat på en optimal kombination av olika egenskaper. Vilken vikt de olika egenskaperna får i ett avelsprogram beror på deras arvbarhet, den genetiska korrelationen mellan egenskaper och det ekonomiska värdet av en förändring av de olika egenskaperna. De vikter olika egenskaper får kallas ekonomiska vikter. Många avelsprogram innehåller mål relaterade till produktionsegenskaper (exempelvis tillväxthastighet eller mjölkproduktion) och reproduktions- och hälsoegenskaper (som robusthet, juver- och benhälsa).



För att ett avelsprogram ska vara framgångsrikt måste man hålla reda på varje enskilt djurs identitet och mäta djurens resultat i viktiga egenskaper. Foto: Jenny Svennås-Gillner, SLU

AVELSVÄRDE

En central del i varje avelsprogram är registrering av de olika egenskaper som ska förbättras, kopplade till olika individer. Denna information samlas i en databas och används för genetisk utvärdering och för att skatta djurens respektive avelsvärden.

Avelsvärdet är en skattning av värdet hos avkomman. Om till exempel en ko och en tjur med höga avelsvärden för mjölkproduktion korsas är chansen hög att de får en avkomma som ger mycket mjölk. Avelsvärdet kan uttryckas i ekonomiska termer (exempelvis mängden

producerat kött i kronor), i enheter (exempelvis kg kött), eller som relativa värden (såsom negativ eller positiv avvikelse från medelvärdet).

De mest lämpade djuren, de med bäst avelsvärde, väljs som föräldrar. Tack vare databasen, som inkluderar all släktskap, är det också möjligt att skatta avelsvärdet för individer som inte har några mätvärden registrerade. En bagge kan alltså ha ett avelsvärde för modersbeteende, och en unghingst, för ung för att kunna tävla, kan ha ett avelsvärde för dressyr.

I vissa avelsprogram, exempelvis för mjölkkor, kombineras avelsvärden för olika egenskaper (så



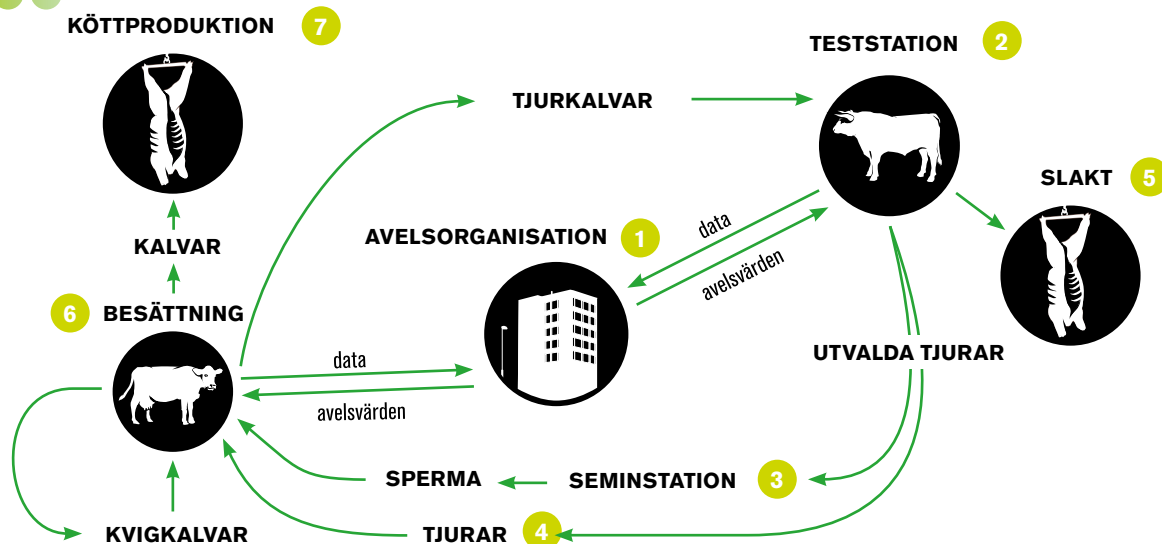
ART	EGENSKAP	ARVBARHET					
		låg		måttlig		hög	
Ko	Klövhälsa	x					
Ko	Mjölkavkastning			x			
Hund, får & gris	Kullstorlek	x					
Hund, får & gris	Tillväxthastighet			x			
Laxfisk	Färg på laxens kött			x			
Räv	Rädsla för människor		x				
Honungsbi	Honungsavkastning			x			
Häst	Travhastighet, prispengar			x			
Häst & ko	Kroppsstorlek (mankhöjd)					x	
Människa	Längd					x	
Människa	Verbal förmåga			x			
Mus	Förmåga att hitta vägen i en labyrint			x			
Gris	Procent kött, mätt på levande djur				x		
Gris	Procent kött, mätt efter slakt					x	
Gris	Ålder vid könsmognad			x			
Får	Lammöverlevnad	x					

Arvbarheten för olika egenskaper hos olika arter. Om arvbarheten är hög, kan den genetiska förändringen från generation till generation gå snabbare.

som mjölkavkastning, tillväxt, överlevnad hos kalvar, klövhälsa) med egenskapernas ekonomiska vikter för att skapa ett sammanfattande index som beskriver djurets totala avelsvärde baserat på alla dess egenskaper. Denna avelsvärdering görs ofta av avelsföretag. Värderingen kan kombineras med användningen av AI (artificiell inseminering). De bästa tjurarna kan då befrukta fler kor, även i andra länder.

Hur pricksäker avelsvärderingen är beror på hur mycket information som finns tillgänglig. Ju mer data som används för att uppskatta avelsvärdet, desto mer tillförlitligt är det. Tjurar som

används för AI har tusentals döttrar, och avelsvärdet för förmågan att bli dräktig kan därmed beräknas med hög träffsäkerhet. Vissa egenskaper (exempelvis aptit eller äggvikt) kan mätas flera gånger på samma individ medan andra (exempelvis könsmognad eller köttkvalitet) endast kan mätas en gång. En annan viktig faktor som avgör hur rättvisande avelsvärdet blir är arvbarheten. För egenskaper med låg arvbarhet, som hur lätt ett djur blir dräktigt, kullstorlek eller överlevnad hos kulingar, är det speciellt viktigt att få så många mätvärden som möjligt.



Avelsorganisationen (1) är navet i detta avelsprogram för nötköttproduktion. Här lagras all fenotypisk och genetisk information i en databas, och det är här avelsvärderingen utförs. På teststationen (2) testas ungtjurar för olika egenskaper av intresse (t. ex. tillväxt). Efter detta flyttas de tjurar som har högst avelsvärden till en seminestation (3) där sperman samlas in och distribueras till många besättningar. Bra tjurar, men inte det allra bästa, säljs till lantbrukare (4) för att användas för naturlig betäckning. De tjurar som har lägst avelsvärden slaktas (5). Kor (6) blir antingen inseminerade eller betäckta. De flesta kalvar föds upp för slakt (7), men de bästa honkalvarna väljs ut för att bli mödrar till nästa generation (6). Vissa tjurkalvar skickas till teststationen (2). Valet av avelskor bygger på avelsvärden för modersegenskaper (t. ex. kalvöverlevnad). Egenskaper som köttkvalitet kan endast mätas efter slakt och kan därför inte mätas på blivande föräldrar. Istället samlas information om köttkvalitet och djurens identitet in på slakteriet (7).

För egenskaper såsom magert kött som har en hög arvbarhet kan urvalet bli framgångsrikt även utan stora avelsprogram och avancerade statistiska modeller. Bara att välja ut föräldradjur i besättningen kan ge snabba genetiska framsteg. Men det skulle aldrig gå att förbättra en egenskap som smågrisars överlevnad på besättningsnivå.

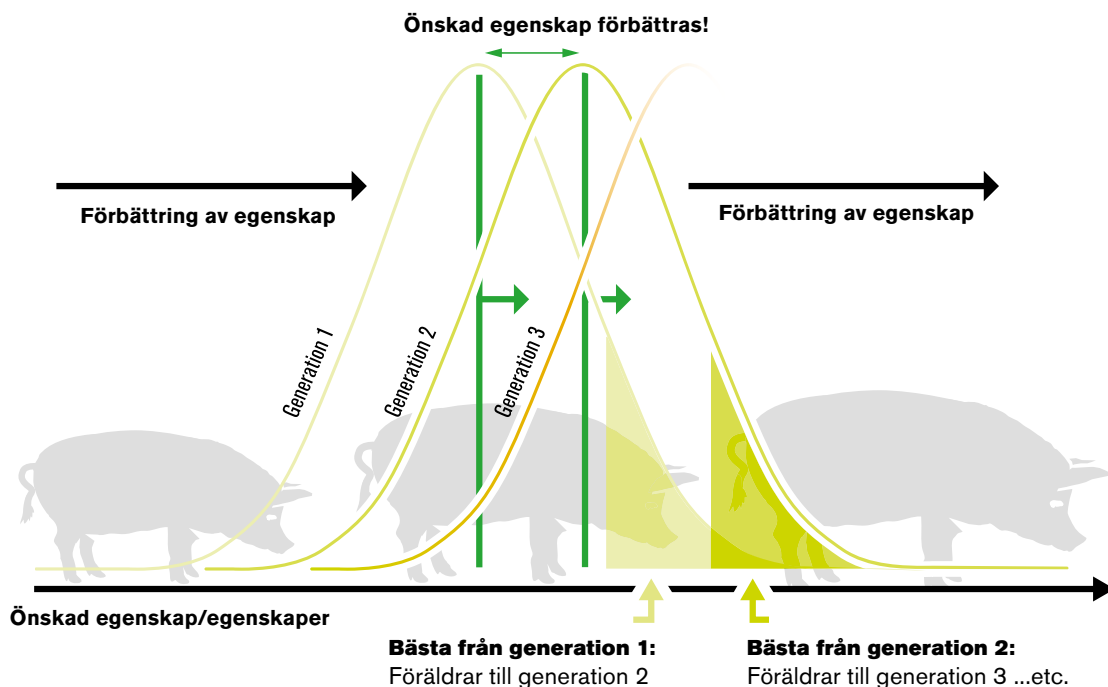
KORSNINGSAVEL

Målet med korsningsavel är att öka korsningseffekten (heterosis). För en egenskap med tydlig heterosis är avkomman bättre än genomsnittet av föräldrarna. Heterosis är speciellt viktigt för egenskaper som överlevnad, reproduktion och hälsa (du kan läsa mer om korsningar och heterosis i avsnittet om växtförädling). Grisavel har exempelvis ofta en hierarkisk struktur. Genetisk

utvärdering och urval görs i några få avelsbesättningar med renrasiga djur från "honlinjer", där urvalet baserats på moders-egenskaper som reproduktion, och "hanlinjer" där urvalet gjorts för köttkvalitet. De flesta av suggorna i kommersiella besättningar kommer från korsningar av honlinjer, vilka sedan korsas med galtar från hanlinjer för att producera slaktgrisar. Tack vare korsningseffekten är de både friskare och växer snabbare än de renrasiga. Korsningsavel används också för många andra husdjur.

INAVEL

Om individer som är nära släkt parar sig leder det till inavel. Inavlade individer får en ökad homozygoti (får samma alleler från båda föräldrarna) och recessiva defekta alleler får större



Djuren som har bäst avelsvärde används som föräldrar till nästa generation.

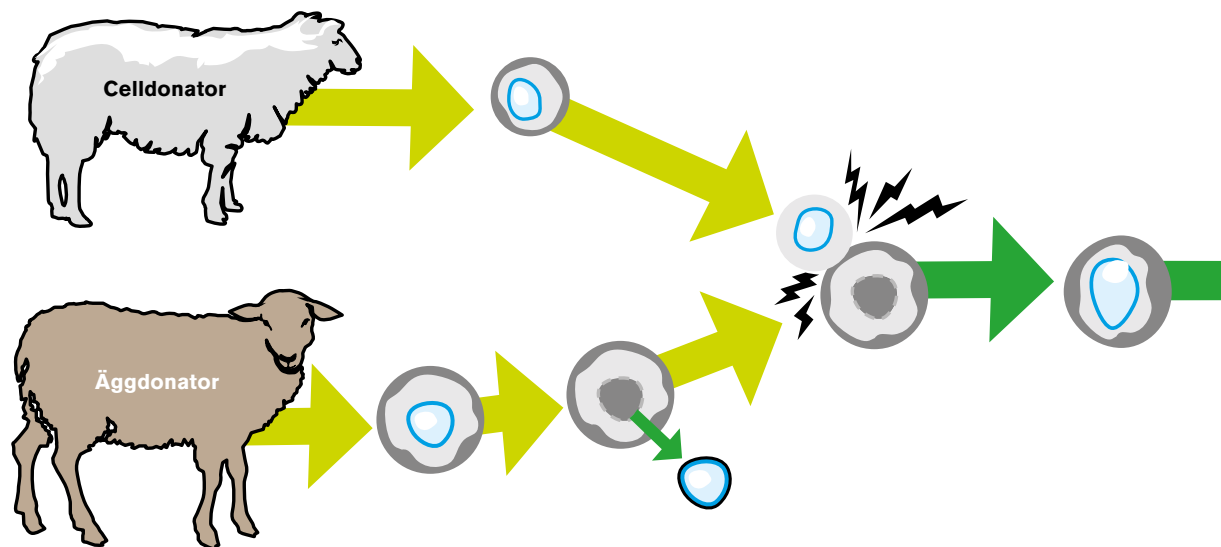
genomslag. Detta fenomen, kallat inavelsdepression, kan minska ett djurs prestationsförmåga betydligt.

När släktingar parar sig minskar den totala genetiska variationen i populationen och den minskade heterozygotin resulterar i nedsatt produktion, överlevnad, hälsa och reproduktion. Avelsurvalet har minskat den genetiska variationen i vissa raser markant. I dag används till exempel bara ett begränsat antal tjurar av Holstein-rasen som fäder till de mest använda semintjurarna världen över. På kort sikt kan inavel undvikas på gårdsnivå genom att aldrig para nära släktingar, men i långsiktiga avelsprogram krävs ett noggrant val av unga tjurar vilket ställer högra krav på avelsorganisationen.

ARTIFICIELL INSEMINATION

Det har tidigare varit en begränsning i avelsprogrammen att en hane bara kan para sig med ett visst antal honor, inom ett begränsat område, under en begränsad tid. Genom artificiell insemination kan sperma samlas in och användas till flera honor. Detta resulterar i en mer effektiv användning av tjurarna eftersom en enda individ kan producera hundratals doser i en enda utlösning. Sperman kan frysas, förvaras under lång tid och lätt transporteras över världen. En fördel med detta är att förbättrad genetik kan distribueras till fler gårdar. En annan fördel är att risken för att sjukdomar ska överföras från hanen till honan minskar, jämfört med naturlig betäckning.

För lantbrukaren innebär semin-användningen också minskade kostnader och ökad säkerhet. Att



Vid somatisk kloning av djur smälts kärnan från en somatisk cell (icke-könscell), från det djur som skall klonas (celldonator), samman med en äggcell där kärnan avlägsnats. Cellen delar sig och utvecklas till ett embryo som sedan placeras i livmodern hos en surrogatmamma.

hålla en eller flera hanar på en gård är ofta dyrt, och beroende på deras storlek och aggressivitet kan hanarna också utgöra en fara för dem som arbetar på gården.

EMBRYOTRANSFER

Antalet avkommor från en hona kan ökas genom embryotransfer (ET). Det är en reproduktionsteknik där embryon från honor med högt avelsvärde samlas in och förs över till andra honor som fungerar som surrogatmödrar. ET-tekniker har använts i de flesta av de domesticerade djurslagen men också i exotiska djur.

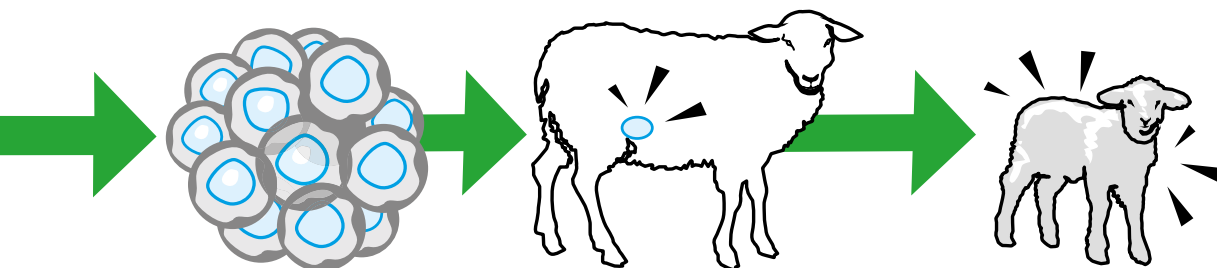
Konceptet MOET (multiple ovulation and embryo transfer) används främst för att snabba på den genetiska förändringen. Tekniken tillämpades tidigt inom ko-aveln för att kringgå begränsningen i antalet kalvar en ko kan föda. I MOET flyttas de korna med de bästa avelsvärdena till speciella besättningar och behandlas för att de ska producera många ägg. Äggen befruktas därefter med sperma från de mest

lämpade tjurarna. De befruktade embryona förs sedan över till surrogatmödrarna. Kalvarna föds upp, paras och jämförs utifrån egenskaper som exempelvis mjölkproduktion. De bästa individerna används som föräldrar till nästa generation.

Nya tekniker utvecklas hela tiden och befintliga tekniker förfinas, inklusive de för infrysning och långtidsförvaring av embryon. Sådan köldförvaring kan vara ett komplement i arbetet med att bevara arter och raser som hotas av utrotning.

KLONING

Embryon från föräldrar med höga avelsvärden har ett högt ekonomiskt värde. Hos arter där det bara föds en avkomma åt gången, som hos exempelvis kor och hästar, kan värdefulla embryon delas för att få två eller till och med fyra nya embryon. Somatic kloning är en process där genetiskt material förs över inom samma generation, till skillnad från normal reproduktion där



generna förs över från en generation till nästa. Med denna teknik skapas en individ som är en genetisk kopia av en annan, samtida eller tidigare existerande, individ. Fåret Dolly är det klassiska exemplet på denna teknik.

Praktiskt går det till så att cellkärnan och dess DNA från en somatisk cell (icke-köns cell) förs över till en "tom" äggcell, alltså en äggcell där man tagit bort kärnan. I fallet Dolly togs DNA från en juvercell. Den återuppbyggda äggcellen måste sedan behandlas kemiskt eller med ström för att stimulera celledning. När embryot når lämpligt utvecklingsstadium förs det över till mottagarens livmoder där det utvecklas fram till födsel.

Denna teknik gör det möjligt att föra vidare gener från kastrerade djur, och några framstående tävlingshästar har klonats. Man bör dock vara medveten om att fenotypen, i detta fall hopphästens framgång, inte bara är ett resultat av generna utan också av hästens uppväxt och träning (se sidan 19 om gener och miljö). En köpare av en klonad hopphäst riskerar alltså

att bli besviken på den nya individen oavsett hur framgångsrik donatorn var.

Terapeutisk kloning är kloning av celler för att kunna behandla patienter med celler som har exakt samma genetiska uppsättning som dem själva. Terapeutisk kloning görs alltså inte för att skapa en ny individ utan för att använda cellerna. Tekniken är också viktig i den medicinska forskningen på sjukdomar som Alzheimer, cancer och hjärtsjukdomar.

MOLEKYLÄRA URVAL

De flesta egenskaper som är viktiga inom djurproduktionen har en kvantitativ genetisk bakgrund där många gener lämna ett litet bidrag till egenskapen. Men några egenskaper styrs av endast en gen. Till exempel beror grisars förmåga att hantera stress (Porcine stress syndrome) till stor del på en mutation i en enda gen. Ett annat exempel är en mutation hos hästar som påverkar deras rörelser och därmed hästens möjlighet att bli en framgångsrik travare.



Om en gen med stor effekt på en viktig egenskap identifieras kan individer väljas ut baserat på en molekylär analys av deras DNA. Men även om genen som kodar för egenskapen inte är känd kan DNA-analysen vara användbar om man har kunskap om genetiska markörer – DNA-sekvenser, på kända positioner, vilka är ligger nära genen man är intresserad av på kromosomen. Det genetiska materialet till en sådan analys kan komma från blod, hårsäckar eller något annat som innehåller DNA.

År 2005 blev höns det första djurslaget att få hela sitt genom kartlagt, det vill säga, hela dess DNA blev sekvenserat. Full kartläggning av genomet betyder dock inte att man vet alla geners funktioner, men kartan kan användas till att identifiera individer med önskade egenskaper (se sidan 30).

Varje genom innehåller en enorm mängd data, till exempel finns det ungefär 6 miljoner baspar

i det mänskliga genomet, och för att kunna hantera all denna information krävs datorer med hög kapacitet. Sekvenseringen av kons genom tog 6 år och involverade över 300 forskare från 25 länder. Man kom fram till att 14 000 av kons 22 000 gener finns hos alla däggdjur, inklusive människan. Listan över arter som fått genomen sekvenserade är lång.

QUANTITATIVE TRAIT LOCI

Quantitative trait loci (QTLs) är regioner i DNA-sekvensen som ligger nära gener med stor effekt på kvantitativa egenskaper som till exempel modersbeteende eller tillväxthastighet. Även om många gener påverkar sådana egenskaper kan vissa gener vara viktigare än andra. Det finns ofta flera QTL för en viss egenskap och de kan finnas på olika kromosomer.

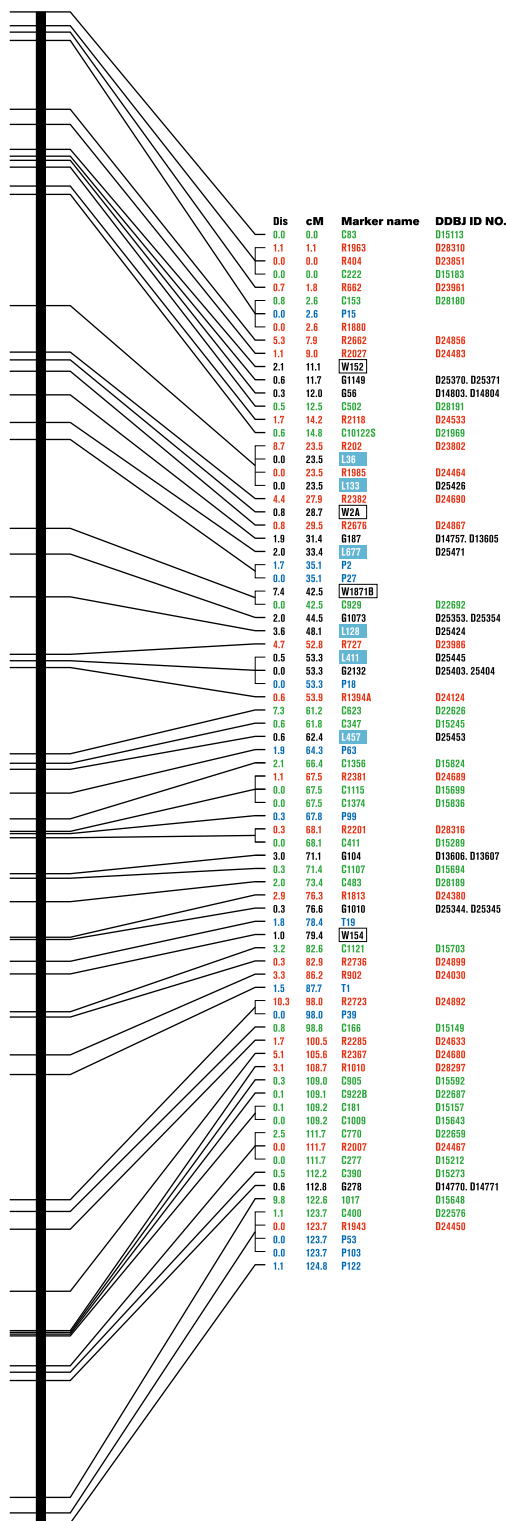
Om man vet antalet QTL och hur stor påverkan respektive QTL har på en viss



2005 sekvenserades hela arvsmassan hos höns. Det var första gången en full kartläggning av genomet gjordes på ett djur.



En genkarta av riskromosom nummer åtta. Genkartor visar positionerna för gener och genetiska markörer på kromosomerna. Ordningen och avståndet mellan gener och markörer på kartan baserar sig på deras rekombinationsfrekvens snarare än deras faktiska fysiska avstånd. Om två gener eller markörer har en låg rekombinationsfrekvens (dvs. de följs ofta åt), antas de ligga nära varandra.
(Med tillstånd från Nature Publishing Group)





egenskap får man information om genetiken som kan användas i förädlingsarbete. Men man bör komma ihåg att QTL bara ger en uppskattning av var generna finns, inte hur egenskaperna styrs eller egenskapernas fysiologiska bakgrund.

Att hitta ett QTL är ofta det första steget i arbetet med att lokalisera en gen som styr en egenskap. Ett QTL pekar på ett visst område på en kromosom och detta område kan sedan sekvenseras och resultatet listas i en databas där sekvensen kan jämföras med andra gener vars funktion redan är känd. Jämförelser mellan arter är till stor hjälp eftersom stora delar av genomet har bevarats under evolutionen.

MARKÖRBASERAD SELEKTION

Vissa delar av DNA-sekvensen varierar mycket mellan individer, och ofta hänger sådana variationer ihop med variationer i specifika egenskaper. Om en DNA-sekvens hänger samman med en viktig egenskap (exempelvis ökad sjukdomsrisk) kan man välja att gallra bort de individer som bär på den sekvensen. Sådana identifierbara DNA-sekvenser kallas markörer, och metoden kallas markörbaserad selektion. Idén bakom metoden är att markören kan användas för att identifiera individer som bär på en fördelaktig allel (eller gallra bort dem som bär på en ofördelaktig) även om den faktiska genen eller generna som kodar för egenskapen inte har identifierats.

Markörbaserad selektion kan användas i avelsprogram som ett komplement till avelsvärdering. På grund av överkorsningen mellan kromosomerna när könscellerna bildas kan markörer som fungerar för en ras vara oanvändbara i en annan. Om en markör ligger väldigt nära genen som styr egenskapen är det väldigt låg sannolikhet för att det sker en överkorsning emellan dem. Tillförlitligheten i markörbaserad selektion är alltså bättre ju fler markörer som finns för en egenskap och desto mindre avståndet är mellan markörerna och de gener som styr egenskapen.

GENOMISK SELEKTION

I genomisk selektion drar man nytta av genetiska markörer över hela genomet. Här använder man sig av "enbas-polymorfi" (single nucleotide polymorphism – SNP) där varje SNP består av en bas i DNA, en nukleotid (A, T, C eller G) med stor variation mellan individer.

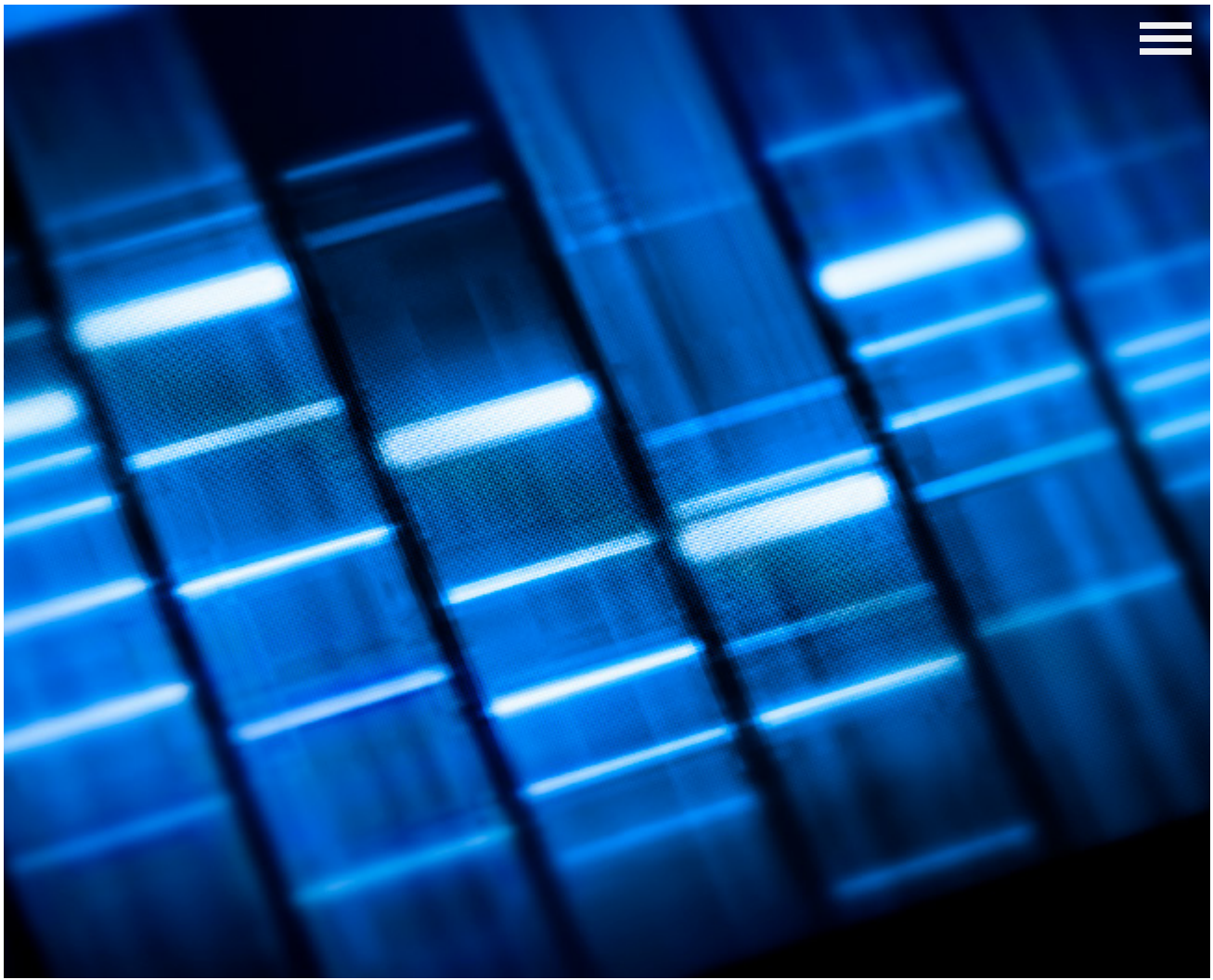
Det första steget i genomisk selektion är att länka markörer till egenskapen man är intresserad av. Genom att jämföra SNP-markörerna med fenotypen för en grupp djur kan man skatta SNP-markörernas betydelse för en egenskap. Dessa djur, som har kända markörer och registrerade egenskaper, kallas för referenspopulationen. I det följande steget tittar man på urvalskandidaternas genotyper och jämför dem med referenspopulationen. Detta gör det möjligt att skatta urvalskandidaternas genomiska avelsvärde och därigenom kan man välja ut unga individer enbart på information om deras SNP-markörer. Om genomisk selektion kan användas på ett framgångsrikt sätt i ett avelsprogram blir det möjligt att välja ut de bästa avelsdjuren på ett tidigt stadium och öka hastigheten på det genetiska framsteget eftersom man sparar tid i urvalsprocessen.

Genomisk selektion har varit framgångsrik inom aveln på mjölkkor, särskilt i rasen Holstein. Metoden gör det möjligt att välja ut tjurar för avel så snart det går att provta dem för att få information deras genom. Om urvalet endast baseras på fenotyp behöver man vänta i 6 år för att få information om deras döttrars egenskaper, som till exempel mjölkproduktion.

För information om proteomik och metabolik, se sidan 39 i kapitlet om växtförädling.

GENETISK MODIFIERING AV DJUR

Genetisk modifiering kan tillämpas på djur. Liksom i växter innebär detta att DNA-fragment förs in i kromosomerna med mekanismer som baseras på cellernas reparationssystem. Den första transformationsmetoden som utvecklades för



Genom gelelektrofores kan DNA-molekyler separeras beroende på storlek. Därefter kan man skära ut det "band" man är intresserad av och sekvensera DNA.

djur baserades på mikroinjektion av DNA in i kärnan hos ett nybefruktat ägg. Äggcellerna som överlevde transplanterades in i livmodern. Denna teknik användes för att ta fram det första gen-modifierade (GM) djuret 1985, och sedan dess har många GM-djur avlats fram. Mikroinjektion är emellertid en ganska ineffektiv metod som ofta leder till oönskade bieffekter orsakade av den slumpmässiga integrationen av nya gener.

Listan över alternativa tekniker är lång. Ett exempel är DNA-överföring som utnyttjar spermernas förmåga att binda och ta upp DNA innan befruktningen av ägget. En lovande metod är att använda virus som vektorer för att

föra in DNA i äggceller. Vissa typer av virus, så kallade retrovirus, kan integrera sitt eget genom in i andra arters genom. Även vi människor har många genetiska rester av sådana virus i våra genom, inkorporerade under evolutionens gång, men sällan med några negativa effekter. Genom att överföra vektorer från retrovirus in i unga embryon kan DNA som kodar för specifika protein föras över till djuret. Dessa individer används sedan som föräldrar till den nya populationen GM-djur som då bär på den nya egenskapen, exempelvis djur som producerar hormoner för medicinsk behandling av människor.



Brassica oleracea finns i många former och färger, till exempel rödkål, broccoli, blomkål och brysselkål.

Växtförädling

Precis som inom husdjursaveln förädlas växter för att bli resistent eller toleranta mot sjukdomar och insekter eller andra organismer som skadar växten. Grödor förädlas också så att de fördelar sina resurser till de delar av plantan som ger oss hög skörd, exempelvis av frön och frukter. För att få ut så mycket som möjligt av dessa grödor, speciellt säd, förädlar man för att de ska mogna i tid, för att de ska ha ett växtsätt som underlättar skörd och för att de ska stå emot skadegörare och sjukdomar under lagring.

Tillgången på effektiva maskiner och ogräsmiddel (herbicer) har minskat behovet av grödor som kan konkurrera med ogräs.

Dessutom har man utvecklat grödor som är toleranta mot herbicider vilket gör att man kan kontrollera ogräsen utan att skada grödan. Även om mycket arbete lagts ner på att förädla fram grödor som är resistent mot sjukdomar och insekter, har bekämpningsmedlen erbjudit en enkel och snabb lösning i många fall. Billig konstgödsel och bristande kunskaper om negativa konsekvenser av näringsläckage har inte uppmuntrat till förädling för effektivare näringsupptag. Men dagens krav på minskat näringsläckage och minskad användning av bekämpningsmedel har inneburit ändrade förädlingsmål.

Förädling av ettåriga grödor är inte nödvändigtvis snabbare än husdjursavel, även om generationsintervallet är betydligt kortare, eftersom



Med molekylär information kan de bästa individerna väljas ut i ett tidigt skede vilket kan förkorta förädlingsprocessen för till exempel träd avsevärt.

det krävs många förädlingscykler för att få fram en sort av hög kvalitet. Förädling av träd innebär ännu längre generationsintervall än för husdjur som kor och hästar.

Beroende på hur växten förökar sig, förädlingsmål och finansiella begränsningar finns det flera metoder och tekniker för att förbättra grödors egenskaper.

FÖRÄDLINGSSYSTEM

Växter kan grovt delas in i tre grupper beroende på hur de förökar sig: självpollinerare, korspollinerare och de som förökar sig vegetativt.

Majoriteten av de viktigaste ettåriga grödorna förökar sig genom frön och är självpollinerare, strikt eller delvis (kan också korspollineras). Med dessa grödor är det enkelt att ta fram så kallade rena linjer, vilka är homozygoter (bär samma alleler i generna på båda kromosomerna).

I stort sett alla korspollinerare är två- eller fleråriga arter som inte är anpassade till homozygoti i samma utsträckning som självpollinerande växter och därför förlorar livskraft om

de inavlas. Men även strikta korspollinerare kan självbefruktas genom olika tekniker.

Många växter kan också förökas med hjälp av kloning, exempelvis genom knölar (t. ex. potatis) eller sticklingar (t. ex. fruktträd), vilket gör förädlingen enklare. Ett stort antal avkommor och mindre behov av omvårdnad gör att växtförädlare kan arbeta med större populationer jämfört med vad man kan inom djuraveln.

MASSURVAL

Massurval är den äldsta formen av växtförädling och har använts av människan i årtusenden, allt sedan vi började samla in frön för sådd. Metoden är fortfarande användbar för vissa arter, speciellt korspollinerare. Urvalet sker genom att man samlar in frön från utvalda plantor i en population och sedan sår ut fröblandningen för att ta fram nästa generation. Ett alternativ har varit att rensa bort alla plantor med oönskade egenskaper innan fröna samlas in.

Många gamla lantraser har tagits fram genom massurval och sorterna har förts vidare mellan generationer av lantbrukare.



SELEKTION FÖR RENA LINJER

Rena linjer är något som främst används i självpollinerande grödor, men kan ibland tillämpas efter korsningar av korspollinerare. I denna metod väljer man ut ett antal överlägsna individer och studerar deras avkommor (var för sig), ofta i flera generationer. Lovande linjer utvärderas sedan ytterligare och de absolut bästa säljs som nya sorter.

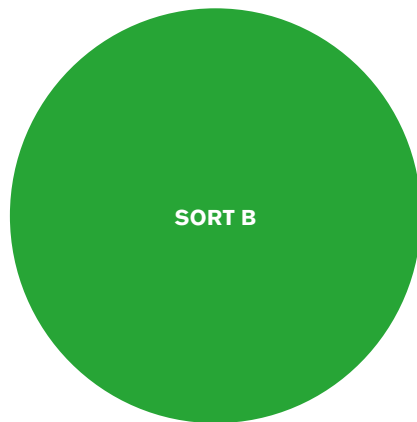
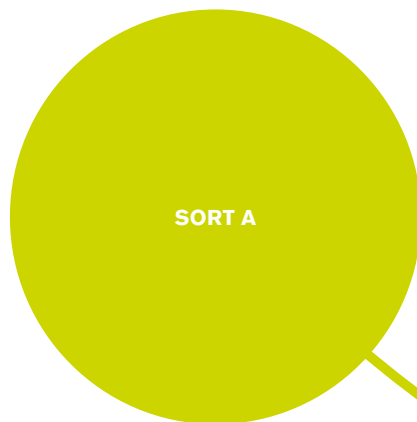
De tidiga framgångarna med metoden berodde på den höga genetiska variation som finns i många lantsorter. För att selektion av rena linjer ska vara effektivt krävs en population med stor genetisk variation, vilket gör denna metod mindre relevant för fortsatt utveckling av dagens största grödor, men den används fortfarande i mindre hårt selekterade arter.

HYBRIDISERING

Denna förädlingsmetod börjar normalt sett med att man korsar två homozygota linjer med önskvärda egenskaper för att producera en avkomma som överträffar föräldrarna. I första generationen har alla individerna samma genetiska uppsättning bestående av halva moderns och halva faderns kromosomuppsättning. Beroende på hur olika föräldrarnas genetiska uppsättningar är kan det bli miljarder olika genotyper i andra generationen. Utifrån bland annat artens förökningssätt följer därefter olika urvalsmetoder.

PEDIGREEFÖRÄDLING

Pedigreemetoden involverar korsning av två genotyper där båda bär på en eller flera önskvärda egenskaper, som saknas i den andra genotypen. Om de två föräldrarna inte bär på alla önskade egenskaper kan en tredje förälder inkluderas genom att den korsas med en av avkommorna i första generationen (kallad F1). Överlägsna individer väljs sedan ut i flera generationer. Det första urvalet görs vanligtvis i den andra generationen (F2) vilken har hög variation på grund av den stora graden heterozygoti.

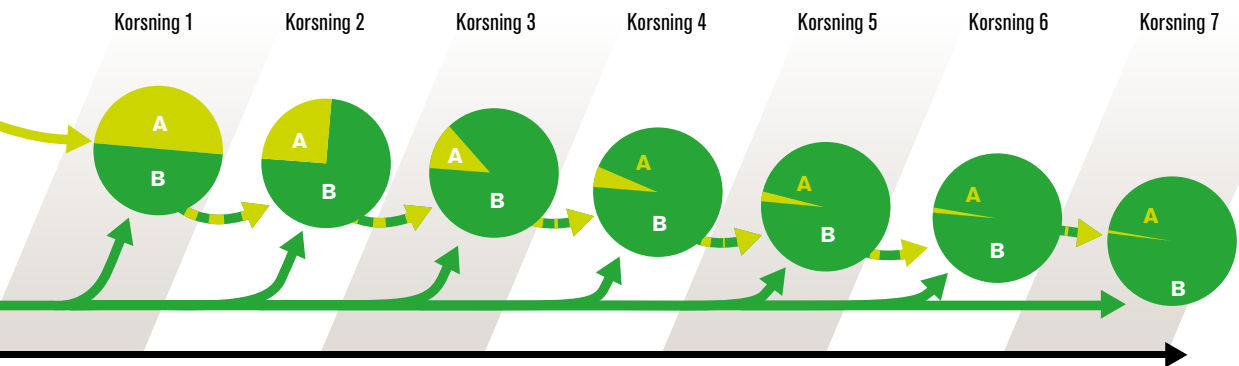


I detta steg fokuserar man på att rensa bort plantor med oönskade alleler som har tydlig påverkan på egenskaper som till exempel resistens mot en viss sjukdom.

I självpollinerande arter kan man göra urval för rena linjer tills nästan total homozygoti har uppnåtts, vilket oftast sker i den femte generationen (F5). Vid detta stadium skördas fröna från alla plantor tillsammans, för att sedan testas i fältförsök. Ungefär vid generation 7 eller 8 fokuserar man på en mer precis utvärdering.

BULKMETODEN

Denna metod skiljer sig från pedigreemetoden främst vad det gäller sättet som hybridavkomman hanteras på. I bulkmetoden sås F2-generationen ut i en försöksruta och fröna skördas tillsammans. Dessa sås sedan ut på nytt utan noggrannare



Återkorsning används för att föra in en särskild egenskap i en sort men utan att samtidigt få med andra ogynnsamma egenskaper. Efter den första korsningen korsas den bästa avkomman med den ursprungliga sorten (B), tills man fått en hybrid med alla de önskade egenskaperna.

registrering av respektive plantas bakgrund. Planter med låg överlevnadsgrad gallras bort genom naturlig selektion och andra med oönskade egenskaper rensas också bort. Ibland skördar man tidigt för att selektera för planter med tidig mognad. Dessa steg följs av urval av enskilda planter och utvärdering på samma sätt som i pedigreemetoden. Fördelen med bulkmetoden är att man kan sålla fram ett stort antal individer till en låg kostnad.

ÅTERKORSNING

Förädling av växter startar vanligtvis med en sort som är bra, men saknar en specifik egenskap, som till exempel resistens mot en viss sjukdom. Ett sätt att föra över denna egenskap är att använda återkorsning. Sannolikheten för att återkorsningen ska fungera är större om det endast

är en eller ett fåtal gener som styr egenskapen.

Till att börja med måste man hitta en planta som bär på den önskade egenskapen och som kan korsas med sorten man vill förbättra. Efter den första korsningen väljs de individer ut som bär på egenskapen (i F1-generationen) och dessa korsas återigen med den ursprungliga sorten man vill förbättra. Detta återupprepas fem eller sex gånger för att få fram en hybrid som bär på ursprungssortens alla egenskaper inklusive den nya egenskapen. Fördelen med denna metod är att det inte behövs så många planter i varje generation och att den är snabb och relativt förutsägbar. Nackdelen är att om den önskade egenskapens gener är tätt länkade till generna för oönskade egenskaper minskar sannolikheten för att man ska kunna separera dem, oavsett hur många återkorsningar man gör.

Hybridsorter – exemplet majs

Utvecklingen av hybridmajs har haft en enorm effekt på avkastningen och är ett exempel på en stark heterosis-effekt. Majs pollineras med hjälp av vinden som för pollen från ståndare till pistiller, och kontrollerade korsningar kan därför lätt göras i fält genom att plantera en rad med föräldraplantor som bidrar med pollen och två eller tre rader av fröplantor där man tar bort hanblommorna innan de släpper sitt pollen. För att undvika problemet med lågproducerande inavlade linjer, produceras de flesta hybridmajssorter genom att först korsa fyra inavlade linjer i par ($A \times B$ och $C \times D$) och sedan korsa deras avkommor ($AB \times CD$). På detta sätt blir fröproduktionen mer effektiv, vilket sänker utsädespriset. I stället för att ta bort hanblommorna för hand kan man använda hansterila plantor som är oförmögna att producera funktionella pollen.



Hybridmajs (t.v.) jämförd med en icke-hybridmajs (t.h.).

HYBRIDSORTER

Hybridsorter är inte detsamma som sorter producerade genom hybridisering, vilket kan vara förvirrande. När hybridsorter produceras startar man med att inavla utvalda plantor i flera generationer för att skapa rena linjer, vilka sedan korsas. En korsning mellan två specifika homozygoter resulterar alltid i samma genotyp vilket innebär att när man väl lyckats identifiera de rena linjer som ger den bästa hybriden kan den nya sorten produceras löpande. En annan fördel med hybrider är heterosis-effekten vilken ofta ger ökad tillväxt, tidigare blomning och ökad avkastning. Effekten beror på att många ofördelaktiga egenskaper kodas av recessiva alleler och den höga graden av heterozygoti i F1-generationen minskar sannolikheten för att avkomman får två alleler av samma sort i en gen. Däremot uppstår problem om man sår frön från

F1-generationen eftersom nästa generation kommer att bestå av plantor av väldigt varierande kvalitet med en genomsnittlig avkastning långt under den i F1-generationen. Detta innebär att frön från en hybridsort fungerar dåligt som utsäde, och lantbrukaren måste därför köpa nytt frö varje år.

SYNTETISKA SORTER

En syntetisk sort tas fram på samma sätt som vid massurval. Skillnaden är att alla korsningar görs mellan linjer som man vet ger högpresterande avkommor, oavsett hur de kombineras. Det leder till heterosis-effekt och användbara frön för nästa säsong. Många syntetiska sorter är vallväxter där produktion av hybridsorter skulle bli för dyr.

SOMATISK HYBRIDISERING

Vid somatisk hybridisering, eller protoplast-hybridisering, sammanfogas celler som inte är



I Sverige är samtliga sockerbetsorter som producerats i förädlingsprogram hybrider.

könsceller. Först avlägsnas cellväggarna och sedan smälts de kvarvarande protoplasterna samman med hjälp av elektriska stötar eller kemisk behandling. Cellen behandlas därefter med hormon så att cellväggen återbildas och förökas till en cellklump, för att till slut växa till en planta. Denna metod gör det möjligt att korsa arter som vanligtvis inte går att hybridisera, men används också för att korsa sorter av samma art, till exempel blommande och icke blommande potatis. Om växterna inte kan kombineras med andra förädlingsmetoder än somatisk hybridisering regleras de som GMO (se sidan 55).

MUTATIONSFÖRÄDLING

Mutationer är förändringar i en organisms nukleotidsekvens och orsakas av fel i replikationsprocessen (se sidan 16), strålning eller gifter. Även om mutationer sker i en väldigt låg frekvens i naturen skapar de en genetisk variation som är nödvändig för evolutionen. Egenskaper förändras, försvinner eller tillkommer.

Ett sätt att öka den genetiska variationen är att öka mutationsfrekvensen. Kemisk mutagenes innebär att man behandlar fröna med någon mutagen kemikalie, exempelvis etylmetansulfonat (EMS) eller dimetylsulfat. Beroende på vilken kemikalie som används blir förändringarna mer eller mindre specifika. Till exempel leder EMS vanligtvis till att ett GC-baspar

ersätts av ett AT-baspar. Strålning kan leda till kromosombrott och en mängd förändringar i nukleotidsekvensen. Den vanligaste strålningen som används inom mutationsförädlingen är röntgen- och gammastrålar. Raps, korn, bomull och ris är några exempel på grödor där mutationsförädling har använts.

Ett problem med denna metod är att mutationerna är slumpmässiga. Detta gör urvalet av önskade fenotyper svårt, tidskrävande och kostsamt. Tusentals plantor kan behövas för att hitta en livsduglig individ som bär på den önskade genetiska förändringen. Ett annat problem med denna metod är att de flesta mutationerna är oönskade. Viktiga gener kan muteras och det kräver ytterligare förädling, till exempel genom återkorsning, för att återställa sorten till dess ursprungliga kvalitet.

KROMOSOMTALSFÖRDUBBLING

Som beskrivits tidigare har många växter fler än två uppsättningar kromosomer – de är polyploider. Polyploider har ofta mer biomassa och/eller större frukter och frön jämfört med diploider, vilket ofta är önskvärt. Potatis och bananer är exempel på autopolyploider (alla deras kromosomer kommer från samma art). I allopolyploider kommer kromosomerna från olika arter. Raps är ett exempel på en allopolyploid från korsningen mellan kålrot och rybs. Om en diploid korsas med



en tetraploid blir avkomman en triploid (en uppsättning från ena föräldern plus två uppsättningar från den andra). Triploider måste förökas vegetativt eftersom de är sterila. Flera banansorter och kärnfria vattenmeloner är triploider.

Polyploider uppstår naturligt men kan också skapas genom behandling med kolchisin som hindrar kromosomerna från att separeras från varandra under celldelningen. Kolchisin har använts för att ta fram autopolyploider och kärnfria triploider, men också för att återskapa fertilitet i triploider (exempelvis rågvete) genom att göra dem hexaploida (sex uppsättningar kromosomer).

VÄXTVÄVNADSODLING

Växtvävnadsodling är ett samlingsnamn för olika laborietekniker som används för att odla växtdelar under kontrollerade sterila förhållanden. Det kan vara celler, vävnad (delar av blad, blommor eller rötter), ståndare, mikrosporier eller meristem (med odefinierade celler). Metoden används för vegetativ massproduktion av plantor i många arter, speciellt vedartade trädgårdsväxter som är svåra att föröka genom ympning. Vävnadsodling är mycket användbar för långsiktigt bevarande av genetiskt material från utrotningshotade arter, och metoden har också viktiga tillämpningar inom växtförädlingen. Till exempel kan man skapa komplett homozygota linjer genom att förhindra separation mellan kromosomerna i den första celldelningen i utvecklat pollen (som i diploida arter bara bär på en kromosomuppsättning). Resultatet blir plantor som istället för diploider benämns dubbel-haploider. Vävnadsodling är dessutom ett viktigt steg vid genetisk modifiering av växter.

Teorin bakom växtvävnadsodling är att varje intakt cell har potential att utvecklas till en fullvuxen planta under optimala förhållanden, man säger att cellerna är totipotenta. Vävnadsodling kallas också *in vitro*-odling ("i glas" på latin) eftersom växterna ofta odlas i ett

växtmedium i en liten glasburk. Växtmediet innehåller normalt sett näringsämnen, exempelvis socker, salt och vitaminer, men också växthormoner som reglerar tillväxt och utveckling. För att undvika onormal tillväxt, på grund av att kulturerna tar upp för mycket vatten, tillsätts exempelvis agar (en polysackarid/pektin-blandning från rödalger) som gör mediet till en fast gelé.

Det finns också flytande odlingskulturer där växtceller eller vävnad odlas i en näringslösning i specialdesignade behållare som kallas bioreaktorer. Bioreaktorer kan användas för att odla växtceller eller vävnad för extraktion av viktiga ämnen som exempelvis har medicinskt värde. Det finns flera fördelar med den här tekniken, till exempel växtmaterial som är fritt från sjukdomar (speciellt virus), massproduktion av plantor på kort tid, året runt, i ett begränsat utrymme och utan behov av bekämpningsmedel.

MOLEKYLÄRT URVAL

Om man har kunskap om vilka alleler (genvarianter) som ger en viss fenotyp, vilka gener som påverkar en viss egenskap, eller bara vilket område i en arts DNA som kan associeras med en egenskap, kan de bästa individerna väljas ut utan att man behöver vänta tills plantan är fullt utvecklad, blommor, sätter frön osv. Detta sparar både tid och resurser. Följande molekyllära metoder kan användas som verktyg för urval i växtförädling.

QUANTITATIVE TRAIT LOCI

Som beskrivits i kapitlet om djuravel (sidan 30) är quantitative trait loci (QTL) regioner av DNA som har signifikant effekt på kvantitativa egenskaper, till exempel höjd. En egenskap påverkas ofta av flera QTL som kan finnas utspridda på flera kromosomer. I växter har användningen av QTL-analyser bidragit till identifiering av gener som styr exempelvis spannmålsproduktion planthöjd eller resistens mot patogener.

MARKÖRBASERAT URVAL

Majoriteten av de urvalsmarkörer som används inom växtförädlingen idag baseras på DNA, men urvalsmarkörer kan även vara morfologiska eller biokemiska. Som beskrivs i djurkapitlet (sidan 30) är teorin bakom denna metod att man kan använda markörer för att selektera för, eller emot, en gen som är associerad med en viss egenskap.

För att hitta DNA-markörer måste man jämföra individer med stor variation i den egenskap man är intresserad av. En bra markör är tätt länkad till genen man är intresserad av eftersom sannolikheten för att de två ska separeras under meiosen då är väldigt liten.

GENOMISK SELEKTION

Som beskrivits tidigare är genomisk selektion ett viktigt verktyg inom djuraveln, men genomisk information används också i grödor vilket gör det möjligt att hitta tusentals markörer i deras genom, men i de flesta växter har det gått långsamt med att få fram information om hela arvs-massan. Det främsta skälet till det är att många växter är polyploider, de har alltså fler än två uppsättningar kromosomer och därmed fler än två alleler för varje locus (se sidan 15). Dessutom har många växter komplexa genom med repetitiva sekvenser och pseudogener (gener utan funktion). Växtgenom är därför ofta mycket större än genomen hos djur och därför blir det svårare att ta reda på sekvenserna i hela genomet. Men tack vare minskade kostnader för sekvensering finns nu genomisk information om flera grödor, som exempelvis ris, majs, potatis och brödvete, och tekniker utvecklas för genomisk selektion i växter.

Träd är exempel på växter där förädlingen skulle tjäna på att använda genomisk selektion, eftersom deras reproduktionstid och tid till skörd eller avverkning är väldigt lång. Att kunna förutsäga framtida produktion av trämassa, mängden eller kvaliteten på frukt, på ett tidigt stadium skulle vara mycket fördelaktigt. Provtagning skulle kunna ske i ett tidigt skede

och deras genotyp kunde jämföras med äldre träd med kända fenotyper.

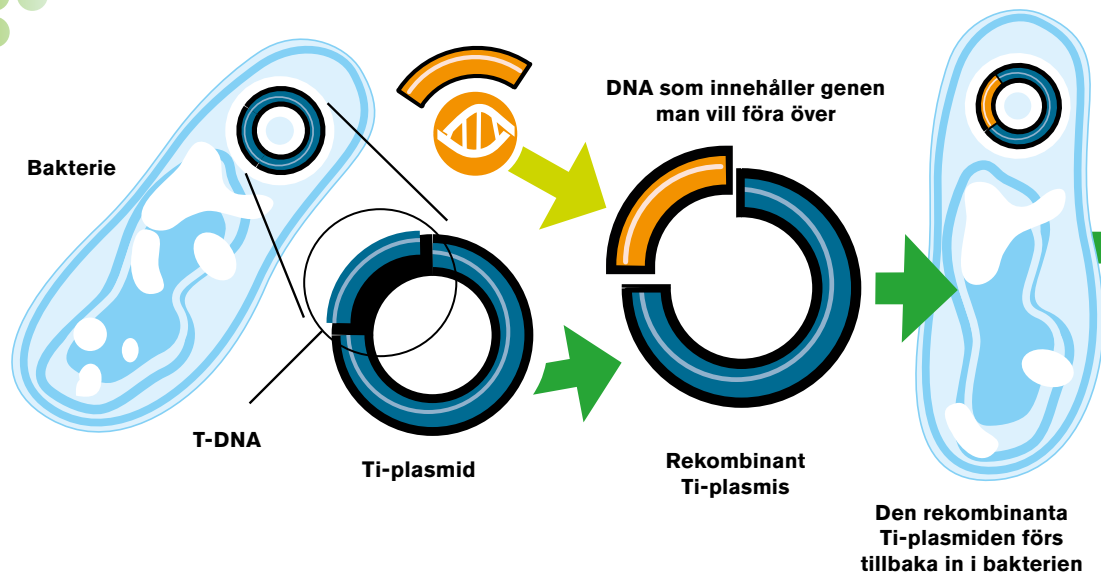
Miljöeffekter spelar en stor roll i förädlingen av både grödor och träd, och metoder utvecklas för att ta sådana effekter med i beräkningarna inom genomiskt urval.

PROTEOMIK OCH METABOLOMIK

Proteomik är när man studerar proteinerna i en organism. Genomik kan jämföras med en kokbok full med recept medan proteomik kan sägas vara de olika rätterna som kan lagas utifrån recepten. Medan genomik till viss grad kan förutsäga en organisms fenotyp så ger omfattande studier av protein och metaboliter, proteomik och metabolomik, en bättre bild av den faktiska fenotypen och är därför lättare att tolka.

Proteinerna utgör cellens maskineri och styr signaler och kemiska händelser genom katalysering av en mängd kemiska reaktioner. Genom att mäta nivåerna av specifika proteiner kan man förutsäga resultatet av korsningar av olika sorter i förädlingsprogrammen. Det kan användas som ett alternativ eller komplement till genomiska markörer. Ett sätt att studera olika proteiner i ett prov är att först bryta ner dem med ett enzym för att få fram peptider (små proteiner). Peptiderna separeras sedan utifrån vattenlöslighet, och nivån av de specifika peptiderna mäts. Med riktad masspektrometri, ”selected reaction monitoring” kan man mäta hundratal peptider i ett enda prov.

Metaboliter är små molekyler i cellerna, som exempelvis olika kolhydrater och aminosyror. De analyseras oftast genom masspektrometri på liknande sätt som proteiner. Metaboliterna identifieras ofta genom jämförelser med kända metaboliters specifika masspektra. Det finns fortfarande många tekniska utmaningar som behöver övervinnas innan fullständiga kartläggningar av proteiner och metaboliter kan genomföras, men teknikerna anses lovande för användning inom förädlingen.



Den vanligaste metoden för genetisk transformering av växter är att utnyttja jordbakterien *Agrobacterium tumefaciens* förmåga att överföra DNA. Bakterien har en plasmid som bär på tumörinducerande (Ti) gener som, tillsammans med andra gener, fogas in i DNA:t hos den infekterade växten. Ti-generna kan ersättas av en eller flera gener som förädlaren valt.

GENTEKNIK

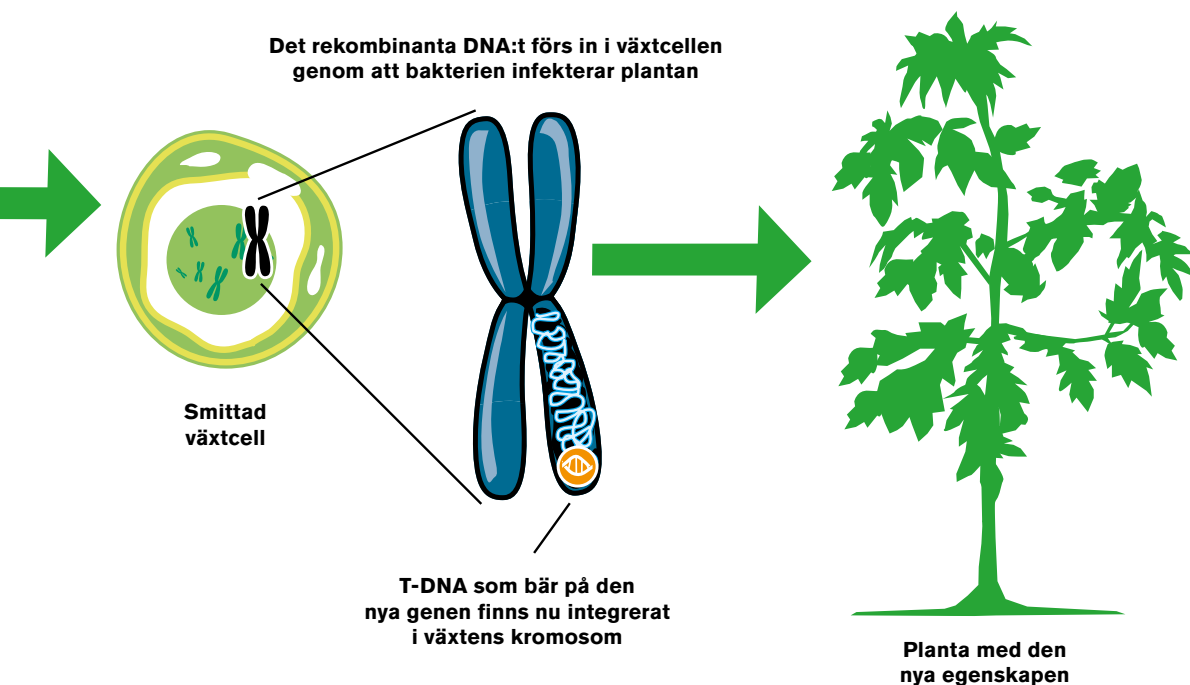
Detta avsnitt beskriver olika molekylära metoder för modifiering av växtgener. Det inkluderar tekniker där uttrycket av en gen förändras, eller en ny gen introduceras i en plantas genom för att få fram en ny egenskap i växten. Beroende på vilken teknik som används kan växten bli en genmodifierad organism (GMO). Nedan beskrivs de metoder som används i dag, men även några av de nya tekniker som förväntas få stort genomslag i framtida växtförädling. För definitioner av GMO, se sidan 55.

GENETISK TRANSFORMATION

Även om man kan ändra eller introducera en ny egenskap med hjälp av de traditionella förädlingsmetoderna som beskrivits tidigare, kan det ibland vara svårt och i vissa fall omöjligt att få önskat resultat. Det är i dessa fall genetisk transformering kan komma till användning. Denna teknik är speciellt fördelaktig när det handlar om att förbättra befintliga sorter som bara har några få brister eller oönskade egenskaper. Transformation innebär introduktion av en bit DNA eller en hel gen in i

en organism för att uttrycka en ny gen eller för att ändra uttrycket av en eller flera befintliga gener.

Grödor som modifierats på detta sätt kallas genetiskt modifierade grödor (GM-grödor). Eftersom funktionen hos generna som förs in eller förändras oftast är mycket väl karaktäriserade är dessa metoder mer precisa och direkta jämfört med konventionell förädling som görs med korsningar eller mutationer. Man kringgår också problemet med att flera oönskade gener följer med den önskade sekvensen, vilket är svårt att undvika i traditionell korsningsförädling. Genetisk transformation i växter görs vanligen med hjälp av jordbakterien *Agrobacterium tumefaciens*. I naturen kan bakterien infektera skadade växter och orsaka gallbildningar (en form av tumörer). I bakterier finns majoriteten av DNA:t i kromosomer, men också i cirkulära plasmider. *A. tumefaciens* har en tumörinducerande plasmid (Ti-plasmid) som innehåller så kallat T-DNA (transfer-DNA). T-DNA kan föras in i den skadade växtens celler och inkorporeras i dess genom och bär på gener som stimulerar celledelning utan att cellerna differentieras, vilket



annars leder till tumörbildning. Den del av plasmiden som gör att T-DNA inkorporeras i genom-et består av endast 25 baspar i början och slutet av sekvensen av T-DNA. Sekvensen däremellan kan bytas ut till vilken annan DNA-sekvens som helst utan att överföringen påverkas. Upptäckten av att denna naturliga DNA-överföring fungerar mellan arter har inneburit ett kraftfullt verktyg för att förändra växters egenskaper.

Restriktionsenzym, som fungerar som saxar, kan klippa itu DNA, medan ligaser, som fungerar som lim, gör att bitarna kan sättas samman igen. Dessa enzymer används för att ta bort gener som orsakar tumörer från T-DNA:t i den isolerade plasmiden och ersätta dem med den DNA-sekvens man vill föra in. Den modifierade Ti-plasmiden, nu kallad rekombinant plasmid eller transformationsvektor, förs tillbaka in i bakterien. Efter att bakterien förökats infekteras växten. Denna metod kan delas in i antingen vävnadsodlings-baserad transformation

eller *in planta*-transformation. I den förstnämnda odlas en bit vävnad eller ett organ *in vitro* (i ett odlingsmedium) och den nya genen förs över till växtvävnaden av bakterien. En GM-planta som bär den nya genen utvecklas sedan från vävnaden.

I *in planta*-transformation infekteras blommorna på en levande växt med *A. tumefaciens*. Den infekterade plantan kommer då att producera frön som bär på den nya genen. Metoden fungerar dåligt i många arter och används främst i backtrav (*Arabidopsis thaliana*) i forskningen.

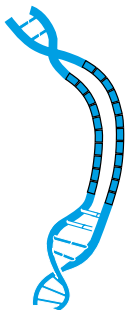
Transformation med *A. tumefaciens* har använts i många växter, speciellt dikotyledoner¹, för att förbättra olika odlingsegenskaper som till exempel insektresistens. Jämfört med dikotyledoner är monokotyledoner oftast mindre motagliga för *A. tumefaciens*. För att lösa detta problem har alternativa kemiska och fysikaliska transformationsmetoder utvecklats. Bland dessa är den mest använda en metod där en genkanon används för att skjuta in mikro-

¹ Dikotyledoner är blommande växter med två hjärtblad och fjädernerviga blad (jämför med monokotyledoner som har ett hjärtblad och parallella bladnerv, exempelvis spannmål och majs).

SDN 1

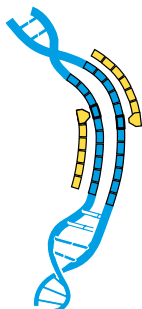
1

DNA som ska förändras.



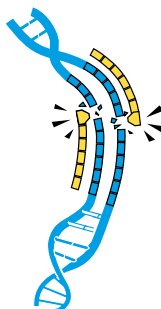
2

Ett proteinkomplex som består av en bindande del (platsspecifik) och en del som klipper strängen (nukleas).



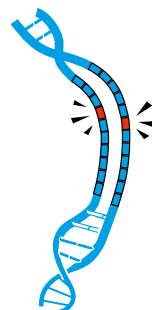
3

När proteinkomplexet har hittat det förutbestämda stället i genomet klipps båda strängarna av.



4

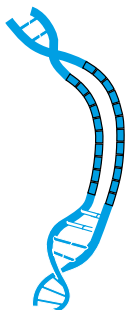
Cellen reagerar på dubbelsträngsbrottet och reparerar DNA-strängarna, ofta med någon ändring i nukleotidsekvensen, och skapar därmed en slumpmässig mutation på ett specifikt ställe.



SDN 2

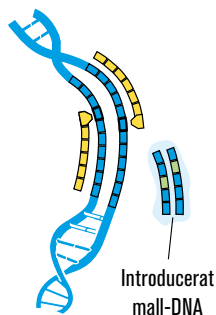
1

DNA som ska förändras.



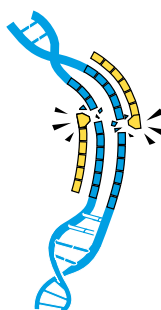
2

Liksom i SDN1 används ett proteinkomplex som består av en bindande del och en del som klipper strängen. Men i detta fallet inkluderas även en kort DNA-sträng som fungerar som en mall då den har samma sekvens som växtens DNA, med undantag för det baspar som ska ändras.



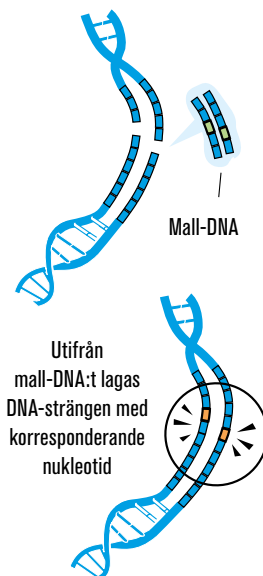
3

När proteinkomplexet har hittat det förutbestämda stället i genomet klipps båda strängarna av.

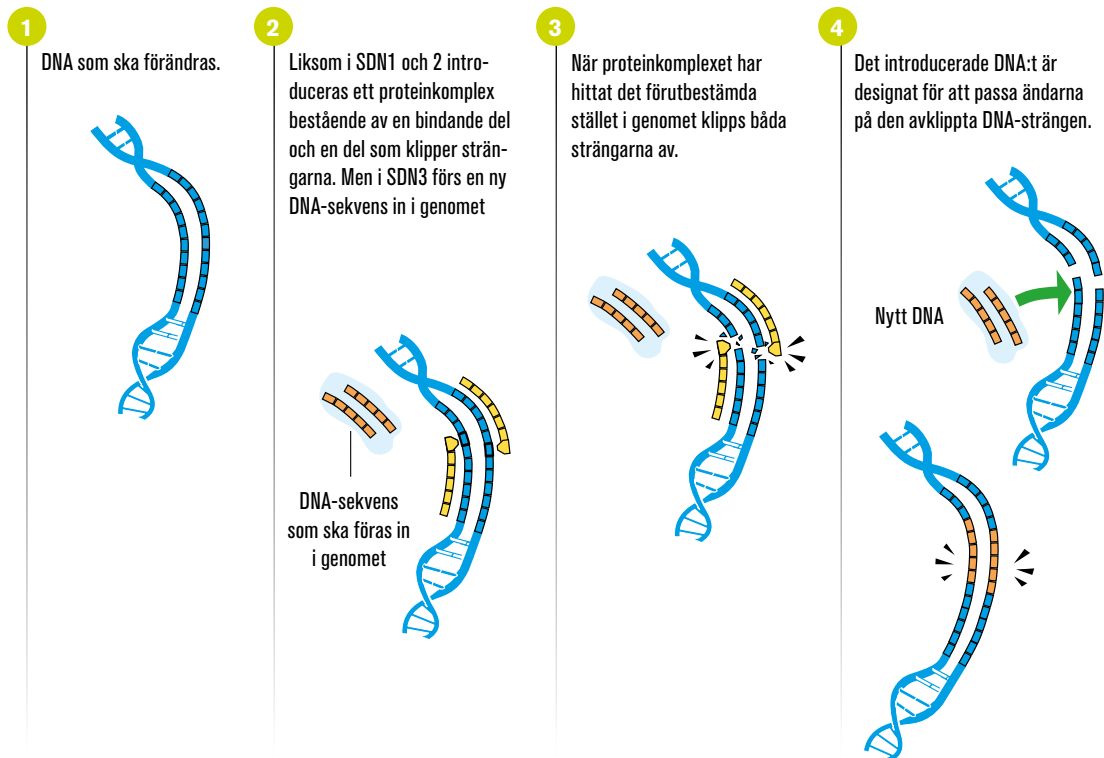


4

Liksom i SDN1 reagerar cellens reparationssystem, men i detta fall används det introducerade DNA:t som mall för den specifika nukleotidförändringen.



SDN 3



Exempel på riktad mutagenes med så kallade Site Directed Nucleases (SDN): Zinc Finger Nucleases (ZFN) och Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALEN), som bygger på samma princip. En domän som klipper kombineras med en konstruerad bindningsdomän som bestämmer var DNA-strängen klipps. I det första exemplet kan proteinkomplexet föras in via DNA, mRNA eller som ett färdigt komplex. Det är endast i det tredje exemplet som det införda DNA:t inkorporeras i genomet.

partiklar av guld eller tungsten klädda med det DNA man vill överföra. Dessa mikro-partiklar skjuts in i växtcellerna eller vävnaden med komprimerad gas (helium) eller elektrostatiske urladdning. Observera att även vissa varianter av riktad mutagenes, som beskrivs på kommande sidor, innebär genetisk transformation och resulterar i en GMO.

RIKTAD MUTAGENES – GENOMREDIGERING
Teknikerna för riktad mutagenes, även kallad genomredigering eller geneditering, har ut-

vecklats bland annat för att lösa problemet med de slumpartade förändringar som mutationsförädlingen innebär, vilka beskrivits i tidigare kapitel.

Teknikerna gör det möjligt att förändra specifika sekvenser på ett precist sätt. Riktad mutagenes kan åstadkommas med olika tekniker som Oligonucleotide Directed Mutagenesis (ODM), Zinc Finger Nucleases (ZFN), Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALEN), Homing endonucleases (HE), och nyligen Clustered Regulatory Interspaced Short



Palindromic Repeats (CRISPR) och CRISPR-Associated (Cas)-system. Samlingsnamnet för ZFN, TALEN, HE, och CRISPR/Cas är Site-Directed Nucleases (SDN).

SDNs är syntetiska restriktionsendonukleaser (enzymer som klyver DNA) som består av en skräddarsydd del, som binder till en specifik DNA-sekvens, och en del som är en specifik nukleasdel. Tekniken gör det möjligt att klippa båda DNA-strängarna på ett specifikt ställe. Cellen reagerar med att reparera brottet vilket ofta leder till en slumpmässig mutation. Denna variant kallas SDN-1.

SDN-2 fungerar som SDN-1 med skillnaden att en mall för reparationen inkluderas. Mallen används av cellens reparationssystem vilket resulterar i en DNA-sekvens med specifika modifieringar i specifika nukleotider.

SDN-3 introducerar en DNA-sekvens på en specifik plats. Det som skiljer denna metod från att introducera DNA med *A. tumefaciens* eller en genkanon är att man kan styra platsen där DNA-sekvensen hamnar.

TALEN har liksom ZFN en skräddarsydd bindningsdel som sitter ihop med en nukleasdomän. Skillnaden är att bindningsdelen i TALEN kommer från bakterien *Xanthomonas* och är längre än i ZFN. Nukleasdelen kan klippa DNA-strängen i en enda nukleotid och bindningsdelen kan konstrueras till att känna igen upp till 30 baspar i genomet, vilket gör den mer specifik än ZFN. Med TALEN kan man göra dubbelsträngsbrott i praktiskt taget vilket DNA som helst med hög effektivitet. Liksom med ZFN kan TALEN användas för att skapa en mutation (slå ut en gen) eller för att inkorporera en ny DNA-sekvens på en specifik plats (alltså göra en genetisk transformation).

Homolog Endonucleases (HE) är naturligt förekommande enzymer som känner igen ovanliga DNA-sekvenser från 14 till 44 baspars längd. Detta gör dem användbara för riktad mutagenes. Både naturligt förekommande och

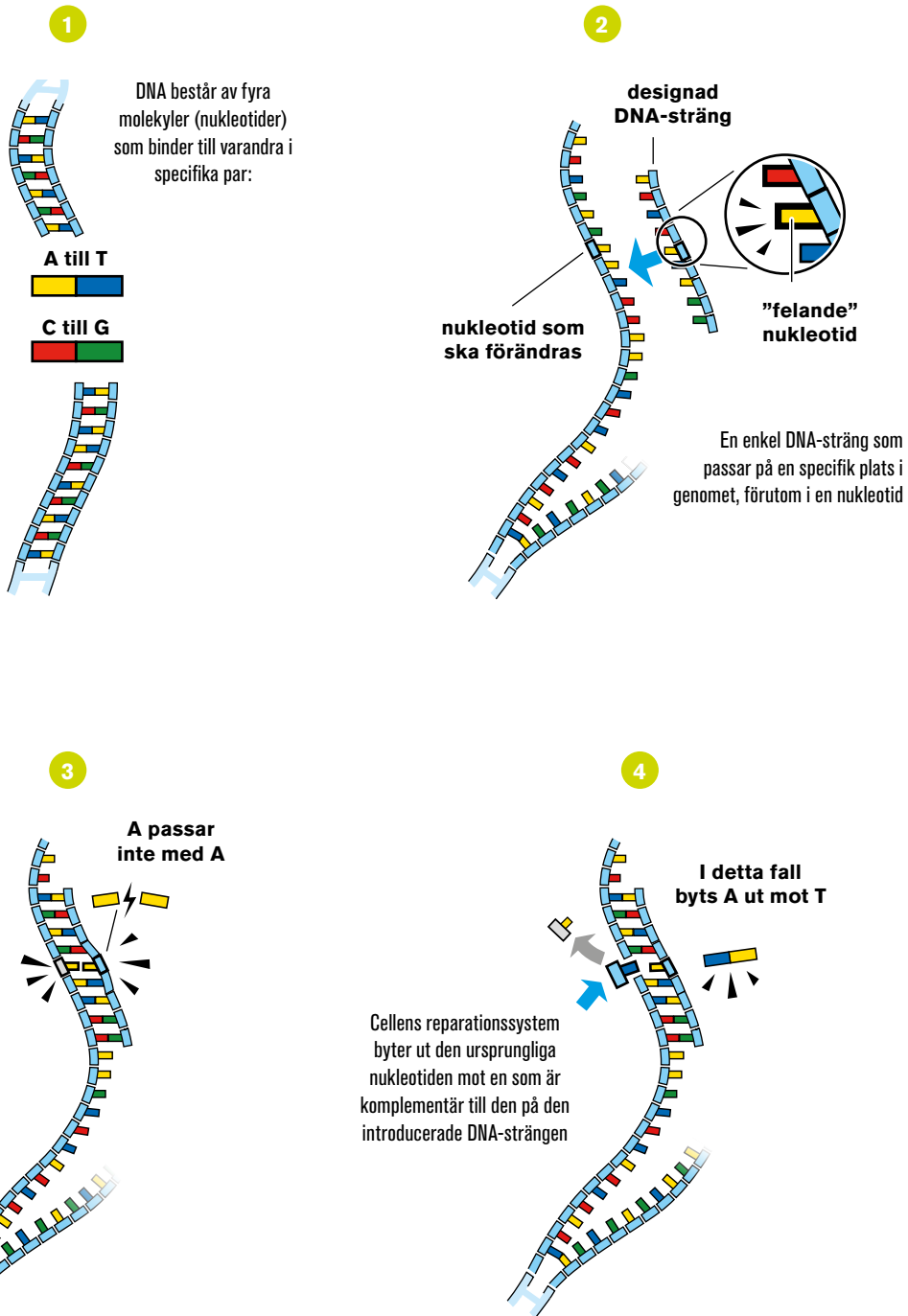
konstruerade HES har använts för att göra dubbelsträngsbrott i DNA, framförallt hos däggdjur. Den största begränsningen för HES är att bindingsdelen inte är riktigt avgränsad från nukleasdelen vilket komplicerar specifika mutationer. CRISPR/Cas-systemet kan också skapa dubbelsträngsbrott i nästan vilken DNA-sekvens som helst, men i detta fallet skapas specificiteten genom att binda nukleasen till små RNA-molekyler som är komplementära till en specifik DNA-sekvens.

Gemensamt för ZFN-, TALEN-, HE- och CRISPR/Cas-teknikerna är att de skapar förändringar på specifika platser i genomet. På grund av enkelheten har CRISPR/Cas inneburit ett stort genombrott både inom grundforskning och tillämpad forskning, och inte bara i växter. Tekniken utvecklas hela tiden då man hittar nya enzymer i mikroorganismer.

För att underlätta penetrering genom cellmembranet, och få in molekylerna i växtcellen, kan man behandla med polyetylenglykol (PEG) eller ett elektriskt fält (elektroporering). Vid transformationer med hjälp av dessa tekniker integreras inte DNA i genomet lika ofta som när man använder *Agrobacterium*, och i de flesta fall blir det bara ett temporärt uttryck av SDN. I det senare fallet skapas bestående förändringar utan att några nya gener lämnas kvar.

Även i de fall som ger en stabil integration av gener som kodar för SDN kan segregation resultera i avkommor som inte bär dessa nya gener. Andra metoder för att föra in SDNs som använts i till exempel däggdjur och insekter är injicering av mRNA som kodar för SDNs i embryot. Att föra in det färdiga SDN-proteinet skulle inte innebära överföring av DNA till genomet, men sådana tekniker kräver ytterligare utveckling för att kunna användas på ett effektivt sätt i växter.

Sammanfattningsvis så innebär genomredigering möjligheter att göra precisa förändringar



I Oligonucleotide Directed Mutagenesis (ODM) förs ett kort enkelsträngat DNA in som är komplementärt till sekvensen som ska redigeras, förutom för en nukleotid, in i cellen. Cellens reparationssystem reagerar på felet och ersätter nukleotiden med den komplementära. Det enkelsträngade DNA:t bryts därefter ner.



Soja har genomredigerats med TALEN för att producera en olja med höga halter oljesyra, utan transfetter och med mindre mättat fett.

i DNA. Vissa länder bedömer genomredigerade produkter som icke-GM ifall inget (tidigare) infört DNA finns kvar i växten medan andra länder kräver att ingen transformation ska ha skett under något steg i processen om den nya genotypen ska klassas som icke-GM. Enligt ett EU-domslut 2018 räknas alla genomredigerade produkter som GMO, oavsett om DNA har förts in i organismen eller ej.

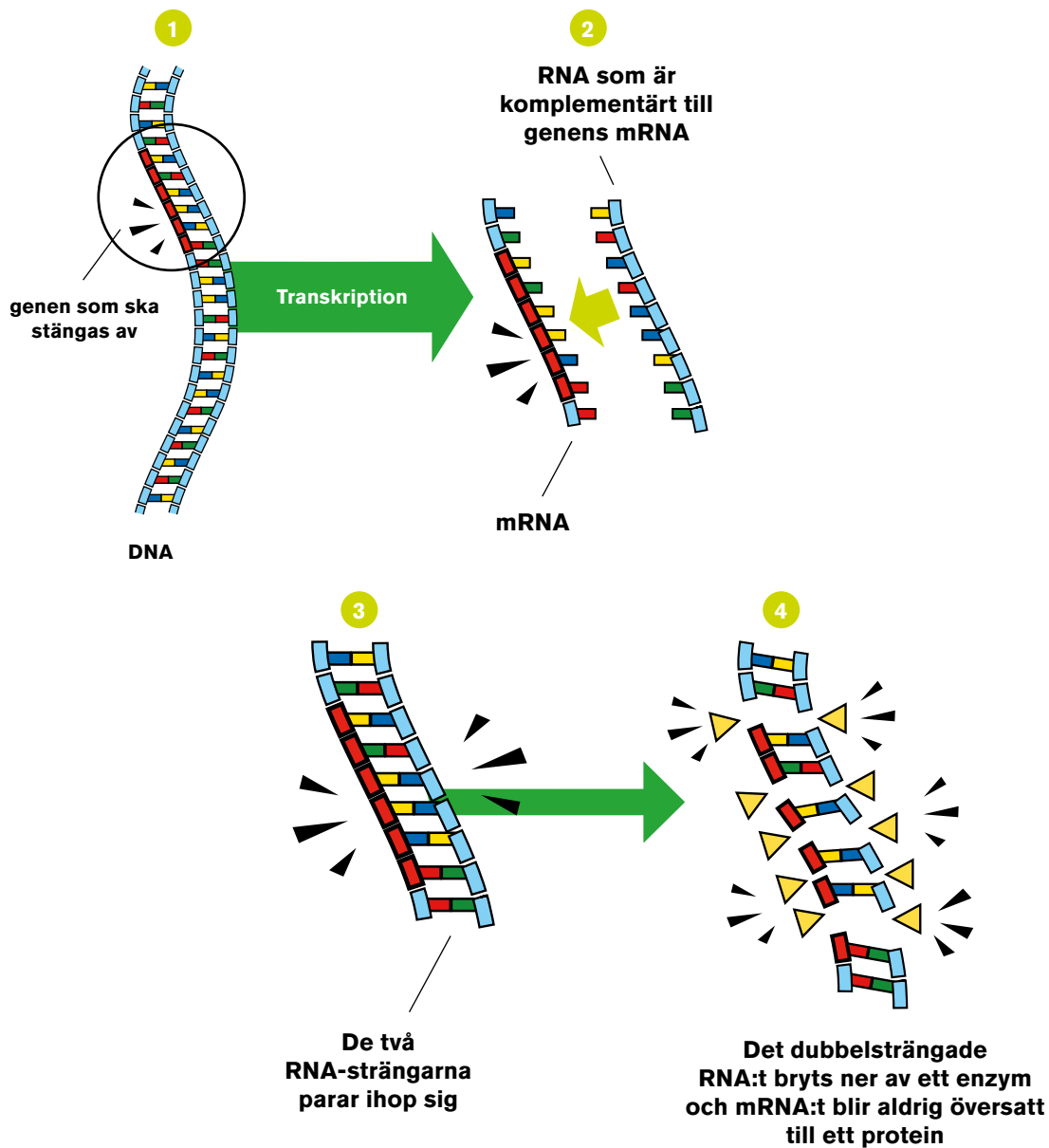
ODM-tekniken innebär att en kort sekvens (oftast 20–30 baspar) som bär på mutationen man vill göra, förs in i cellen med samma tekniker som i SDN (elektroporering, *Agrobacterium* eller PEG). ODM-sekvensen är komplementär till den specifika regionen i genomet, så när som på den nukleotid (bas) man vill ändra. Denna teknik är mycket enkel men effektiviteten är låg och andra oönskade mutationer kan förekomma. Tekniken har använts i majs, ris, tobak och raps för att ändra deras tolerans mot ogräsmedel.

MIKRO-RNA OCH RNA-INTERFERENS

Ett annat växande forskningsfält fokuserar på microRNA (miRNA) som är korta RNA-molekyler som inte översätts till proteiner utan reglerar geners uttryck genom att störa specifika

mRNA innan de hinner översättas till protein i ribosomerna. Om ett miRNA är komplementär till en del av mRNA-sekvensen kommer den att para ihop sig med det mRNA:t, vilket resulterar i ett dubbelsträngat RNA. Ett enzym vars uppgift i cellen är att förstöra virus-RNA klipper ner det dubbelsträngade RNA:t i småbitar (virus-RNA är ofta dubbelsträngade till skillnad från växters enkelsträngade RNA). Denna princip används för att minska uttrycket av specifika gener och kallas RNA-interferens (RNAi). För att föra in miRNA använder man vanliga transformationstekniker som *A. tumefaciens* eller genkanon.

Metoden har använts i stor utsträckning inom medicinforskningen men också i förädling av djur och växter. Exempelvis har man genom denna teknik ökat halten oljesyra i sojabönor till över 80 procent av det totala oljeinnehållet.



Principen bakom RNA-interferens (RNAi) används för nedreglering av specifika geners uttryck genom att hindra mRNA från att översättas till protein. En gen som kodar för ett RNA som är komplementärt till genens mRNA förs in i genomet. När generna läses av och deras respektive RNA bildas kommer de två RNA-strängarna att para ihop sig och bilda ett dubbelsträngat RNA. I växter existerar mRNA normalt endast i enkelsträngad form och dubbelsträngat RNA bryts snabbt ned av enzymer som skyddar växten mot virus (med dubbelsträngat RNA).



Etiken inom avel och förädling

Förädling och avel har som mål att genom urval förbättra växter, djur eller andra organismer för specifika användningsområden. Denna process väcker ibland etiska frågor, som till exempel när frågan om djurskydd eller miljökonsekvenser står på spel eller när gamla lantraser eller lantsorter med kulturellt värde inte längre finns tillgängliga. Målmedvetna förändringar av gener har också kritiserats med argument som hänvisar till religiösa eller etiska gränser för vad människan har rätt att göra med naturen.

Etiken i djuravel

Djuraveln härstammar från de första försöken att tämja djuren och göra dem användbara för våra egna syften. Generellt har detta resulterat i förändringar i många djurs beteenden och gett oss husdjur som är mindre rädda för människor, är mindre aktiva och har ett mer socialt beteende. Aveln har också lett till djur med högre reproduktionsförmåga och fenotypiska förändringar av exempelvis kroppsstorlek och pälsfärg. Hunden är inte bara den första arten som människan avlade utan också det tydligaste exemplet på stora fenotypiska förändringar – från varg till chihuahua. Avel på hundar gjordes ursprungligen i försök att uppnå förändringar i olika egenskaper för exempelvis jakt, vallning och vakthållning. Detta har resulterat i dagens många olika raser, även om endast en liten andel av dem används för dessa ändamål idag.

Bland lantbrukets djur har däremot ökad produktion varit det stora övergripande mål som influerat de flesta avelsprogrammen. Det kan gälla snabb tillväxt hos kyckling, hög mjölkproduktion hos mjölkkor eller stora kullar hos grisar. Strävan efter högre produktionseffek-

tivitet hos respektive djur har skett parallellt med industrialiseringen efter andra världskriget och har ofta beskrivits som civilisationens seger över fattigdom och undernäring. I många industrialiserade länder ses det inte längre som någon lyx att ha kött, korv osv. på matbordet.

Men den ökade köttdjursproduktionen kan också ha negativa sidoeffekter och kan ses som ett hot mot civilisationen. Till exempel innebär den globala spridningen av sjukdomar som svininfluensa, galna ko-sjukan (bovin spongiform encefalopati, BSE), fågelinfluensan och nyligen Covid-19, liksom ökningen av antibiotikaresistenta bakterier, stora utmaningar för människors hälsa. På samma sätt hänger klimatförändringarna och negativ miljöpåverkan ihop med strävan efter minskade produktionskostnader, ökad specialisering av produktionsgrenar och globalisering av djurproduktion och konsumtion, vilket ytterligare utmanar den ”moderna” livsstilen. I denna situation ses genetisk modifiering och genomredigering som värdefulla verktyg både för att öka avkastningen per djur på ett smartare vis, och att hantera negativa sidoeffekter såsom sjukdomar.

Men, det finns anledningar att vara försiktig, och granskningen av dagens industrialiserade djurhållning, inklusive möjlig användning av genmodifiering och genomredigering, måste beakta flera olika perspektiv. Några viktiga frågor som behöver behandlas är exempelvis vilken roll aveln spelar i utvecklingen av dessa metoder, vad den kommer att bidra med i framtiden och hur avelsprogram kan bidra till att minska negativ miljöpåverkan. Husdjursavel är därför inte etiskt neutral, utan bygger snarare på etiska värderingar av vad som varit bra hittills, vad som behöver förbättras och hur framtida globala utmaningar kan hanteras på bästa sätt.



Den genomsnittliga mjölkkon i Sverige producerar över 8000 kg mjölk per år. Finns det några etiska aspekter kring att öka produktionen ännu mer?

Inom all husdjursavel behöver man definiera det övergripande målet med aveln samtidigt som man klargör varför målet är viktigt. Men de etiska aspekterna rör alla steg i processen där val behöver göras (se figur på sidan 24) gällande metod och teknik, val av variabler som ska mätas, kriterier för avelsvärdering och utvärderingen av den skattade genetiska vinsten. Som beskrivs på sidan 21 innehåller alla dessa steg inslag av val som görs av avelsorganisationen och uppfödarna. Valen bygger på deras utvärdering av avkomman – fick vi vad vi ville? Om inte, beror det på begränsningar i kunskapen om egenskaperna eller har man använt fel metoder? Hur kan man avgöra när en gräns nåtts och när bör man omvärdera avelsmålet? Dessa frågor har etisk relevans eftersom de rör levande djur. Det finns en risk att man åsamkar dem lidande eller smärta när man använder metoder som horm-

onbehandling av äggdonatorer, surrogatmödrar och inseminering. Hanar som ofta hålls isolerade från andra djur tenderar att vantrivas. Om ett avelsmål inte utvärderas ordentligt riskerar djur att användas i onödan eller så kan en bättre behandling försenas.

I tvärvetenskaplig forskning som kombinerar avel, djurvälstånd och djuretiska aspekter diskuteras en annan viktig fråga. Bör djur avlas för ändrat beteende så att de tolererar miljön, eller borde miljön anpassas till djurets beteende och välbefinnande? Detta relaterar till den grundläggande etiska frågeställningen om vår "rätt" att använda djur för våra egna ändamål och deras "rätt" att må bra och att inte reduceras till verktyg. Inom djurhållningen och dess avel används djuren som verktyg, men detta kan självklart ändå kombineras med respekt för deras välmående. Hittills har det främst argumenterats

att den riktiga lösningen är att skapa djurhållningssystem anpassade för djuren, snarare än att avla för mindre lättskrämde eller mindre stressade djur, bl.a. eftersom avsaknad av stressreaktioner inte nödvändigtvis betyder att djuret mår bra.

Dessutom är ytterligare etiska aspekter kring djuravel relevanta på gårdsnivå, alltså i den dagliga hanteringen av djuren. Generellt anses djurhälsa vara viktig men tillskrivs ofta begränsad vikt om den inte kan mätas i ett konkret ekonomiskt värde, men vidare aspekter av djurvälstånd är också relevanta. Som nämnts tidigare är mastit ett vanligt hälsoproblem i mjölkko-besättningar och alla lösningar på detta problem välkomnas. Å andra sidan anses sjukdomen vara genetiskt kopplad till produktionsnivån och en genomsnittlig ökning i avkastning, även om naturligtvis inte varje enskild ko som producerar mycket mjölk får mastit.

Ett annat etiskt dilemma är kullstorleken hos sugor som får fler ungar än vad de har spenar. En intervjustudie med svenska mjölk- och grisbönder visar att de troligen skulle acceptera lägre mjölkproduktion och mindre kullar om det skulle öka djurhälsan och därmed minska sjukdomsriskerna och dödligheten bland djuren, och därmed indirekt minska kostnaderna. Så, från en etisk synvinkel behöver både målet med avelsarbetet och valet av målegenskaper vägas in. Men också generella etiska frågor behöver beaktas. Kring avelsmål uppstår bl.a. dessa frågor – vilken roll spelar högproducerande kor och sugor i ett globalt perspektiv, och vilka är de etiska skälen att avla på dem? Vad har till exempel den ökade produktionen per djur för konsekvenser för livsmedelsförsörjning, lantbrukarnas inkomster, global sjukdomsbekämpning (antibiotikaresistens) och djurskydd? Vilka egenskaper är nödvändiga för ett robust djur och hur ska en sådan robusthet definieras? Även om det kan vara ekonomiskt försvarbart att

avliva högproducerande kor vid 4-5 års ålder på grund av mastit, istället för att använda raser som producerar sämre men är friskare, är detta hållbart från ett miljömässigt perspektiv? Och vilka är de sociala aspekterna? Vad tycker lantbrukarna och vad vet konsumenterna? Ur etisk synvinkel kan varenda rådande praxis granskas och diskuteras för att hitta de mest solida argumenten för respektive position.

En annan grundläggande etisk frågeställning är om djur har ett egenvärde. Kritik mot genetisk modifiering av husdjur har ofta handlat om deras egenvärde, medan genetisk modifiering av möss för medicinska ändamål ses som en nödvändighet. Det vill säga, andra aspekter såsom djurets etiska värde, vår relation till djuret, eller helt enkelt tradition, har en stark påverkan på vad vi ser som etiskt acceptabelt att göra med djur. Dessutom, med tanke på de olika metoder som kan användas för att förändra ett djurs genetiska uppsättning (beskrivs på sidorna 24-31) kan det vara svårt att se någon klar skillnad mellan konventionell avel och genetisk modifiering, och än svårare att se hur genomredigering skiljer sig från konventionell avel. Är den mest relevanta etiska aspekten vilken metod som används, själva metoden som sådan, eller konsekvenserna av metoden eller ”produkten” som metoden resulterar i? Det finns ett antal etiska aspekter att ta hänsyn till när det gäller betydelsen av olika metoder. Det här beskrivs i det följande kapitlet om etiken i växtförädling. Flera av de frågor som behandlas där gäller även djuravel.

Etiken i växtförädling

Till skillnad från djuravel har växtförädling sällan ansetts innehålla några kontroversiella etiska aspekter. Däremot tycker många att just genetisk modifiering av växter innebär sådana frågeställningar. Det är en vanlig uppfattning att genetisk



modifiering är fel, men vad innebär ett sådant påstående och vad har det för följder?

Somliga motsätter sig tekniken som sådan. De anser att det finns ett inneboende fel med genetisk modifiering som gör tekniken kvalitativt annorlunda än tekniker som förändrar genomet på mer traditionellt vis, som genom selektiv reproduktion. Ett sådant argument går ut på att genetisk modifiering är onaturligt och därför omoraliskt, eller åtminstone moraliskt problematiskt. Ett exempel är när prins Charles i BBC Radio 4 (Reith-föreläsningarna) år 2000 med enfaset hävdade att vi bör vinnlägga oss om "att använda vetenskap för att förstå hur naturen fungerar – inte att ändra det som naturen är, som när vi med genmanipulering försöker förändra processen för biologisk evolution till något helt annat".

Detta är ett starkt påstående. Och även om många människor delar uppfattningen att genmodifiering är "onaturligt", verkar det vara ett mindre moraliskt problem i medicinska tillämpningar såsom användningen av genmodifierade mikroorganismer för att producera insulin till diabetiker. Andra motståndare är sig inte kritiska till tekniken som sådan, utan vissa tillämpningar av den, inte minst i lantbruket, och i synnerhet i livsmedelsproduktionen. Denna kritik handlar om teknikens konsekvenser. Vissa människor betonar risker och osäkerheter med denna som de ser det obekanta teknik, och hävdar antingen att det finns miljö- eller hälsorisker, eller att det *skulle kunna* uppstå sådana risker. Argumentet i det senare fallet är att medan risker med etablerade tekniker kan bedömas och hanteras, kan nyare innovationer innebära överraskningar. Därför bör någon form av försiktighetsprincipen tillämpas.

Förespråkarna å sin sida framhåller att genetisk modifiering har använts i flera decennier och därför är en tämligen väl beprövad teknik. De menar också att grödorna som sådana inte är mer riskabla än andra jordbruksgrödor. De lutar sig

mot de omfattande riskbedömningar som gjorts på genmodifierade grödor.

Men många människor som är kritiska mot genmodifierade grödor är inte kritiska för att de tror att grödorna är farliga, utan av andra anledningar. Somliga menar att dessa grödor bidrar till att upprätthålla en ekonomisk, social och kulturell världsordning som omfattar storskaligt industriellt jordbruk. Denna kritik riktar sig alltså inte mot själva tekniken, utan mot de förutsedda sociala konsekvenserna. Genmodifiering, hävdas det, är ett annat sätt att föra över makten från konsumenter och lantbrukare till några få multinationella företag, från fattiga till rika, och från utvecklingsländer till utvecklade länder.

En annan sorts kritik mot genmodifierade grödor handlar om avsaknad av tydliga *fördelar* för användarna och samhället. Första generationens genmodifierade grödor har framför allt förändrade odlingsegenskaper (insectresistens och tolerans mot ogräsmiddel). Detta innebär praktiska fördelar för odlaren, men påverkar inte kvaliteten på produkten nämnvärt. Choklad som tillverkas av genmodifierad soja och sockerbetor smakar inte bättre choklad från konventionellt framtagna råvaror, så det verkar inte finnas någon riktig anledning för konsumenten att köpa den.

Om dessa argument är rimliga eller inte kan diskuteras, och det är troligt att några av dem tappar kraft allt eftersom tekniken och regelverken utvecklas. När vi får gentekniskt förädlade grödor med märkbara konsumentfördelar, såsom godare eller hälsosammare produkter, faller argumentet om brist på sådana fördelar. Dessutom kan politiska reformer luckra upp kopplingen mellan tekniken och specifika företag så att företagets dominans minskar. Sådana reformer skulle kunna innebära ändrade patentregler eller ökad offentlig delaktighet i utvecklingen av nya grödor.





Regelverket för bioteknikbaserad växtförädling och djuravel i EU



EU-direktiv 2001/18/EG om avsiktlig utsättning av GMO i miljön definierar GMO som "en organism, med undantag för människor, i vilken det genetiska materialet har ändrats på ett sådant sätt som inte sker naturligt genom parning och/eller naturlig rekombination".

Det övergripande regelverket för genmodifierade organismer (GMO) inom EU utgör en del av livsmedelslagstiftningen som fastställts genom förordning nr 178/2002 av EU-rådet och Europaparlamentet. De första bestämmelserna om GM-produkter dyker däremot upp redan i rådets direktiv 90/220/EEG, om avsiktlig utsättning av genetiskt modifierade organismer i miljön. Detta följdes 1997 av Europaparlamentets och rådets förordning (EG) nr 258/97 om nya livsmedel och nya livsmedelsingredienser.

En serie allvarliga livsmedelsrelaterade händelser under 1990-talet, bland annat utbrott av galna ko-sjukan (bovin spongiform encefalopati, BSE), *E. coli*- och salmonella-utbrott och upptäckten av dioxinrester i livsmedel, resulterade i ett antal viktiga förändringar inom EU rörande reglering av livsmedel, och dessa föreskrifter gäller än idag.

En av förändringarna var övergången från "vertikal harmonisering" till "horisontell harmonisering". Vertikal harmonisering innebär att bestämmelserna för ett specifikt livsmedel gäller alla produktionsnivåer. Införandet av horisontell harmonisering i lagstiftningen gäller bestämmelser för hela livsmedelskedjan och alla livsmedel och foderprodukter, eller produktgrupper, inom olika sektorer samtidigt.

GMO-lagstiftningen utvecklas enligt det ordinarie lagstiftningsförfarandet efter Lissabonfördraget där både Europaparlamentet och rådet beslutar om ny lagstiftning. EU-lagstiftningen bygger på gemensamma direktiv och förordningar som tillämpas i de nationella lagstiftningarna och implementeras av varje medlemsstat. Dessutom kan varje medlemsland också införa nationella lagar om specifika detaljer, till exempel inneslutningsåtgärder, fältförsök och samexistens, men alltid i enlighet med EU:s gemensamma lagstiftning. Reglerna för GMO gör också en åtskillnad mellan innesluten användning, avsiktligt utsättande i miljön och kommersiell användning.

Syftet med GMO-lagstiftningen är att undvika negativa effekter på djur och människors hälsa och miljön. Därför utvärderas alla GMO genom en riskbedömning från fall till fall. Europeiska myndigheten för livsmedelssäkerhet (EFSA) finns i Parma, Italien, och ansvarar för riskbedömningar och riskkommunikation i vetenskapliga frågor, medan EU-kommissionen, närmare bestämt generaldirektoratet för hälsa och livsmedelssäkerhet (GD Sante), ansvarar för godkännandeförfarandet.

Beroende på användningsområde och typ av organism, är en eller flera av de olika nationella myndigheterna ansvariga för tillämpningen av GMO-lagstiftningen. I Sverige har till exempel tio olika myndigheter ansvar relaterade till myndighetsbeslut gällande GMO: Jordbruksverket, Skogsstyrelsen, Kemikalieinspektionen, Livsmedelsverket, Läkemedelsverket, Havs- och vattenmyndigheten och Arbetsmiljöverket. Naturvårdsverket och Gentekniknämnden ger råd till de behöriga myndigheterna. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap konsulteras i frågor som berör transport av GMO.



INNESLUTEN ANVÄNDNING

Innesluten användning avser användning av GMO under förhållanden där kontakt mellan genetiskt modifierade organismer och den omgivande miljön och allmänheten är begränsad. Användning av GMO i godkända laboratorier och växthus är exempel på innesluten användning och kan involvera GM-djur, GM-växter och GM-mikroorganismer i forskningslaboratorier, såväl som GM-mikroorganismer som används exempelvis för produktion av enzymer eller protein som används i livsmedels- och läkemedelsindustrin. T-celler (typ av vita blodkroppar)

och virusvektorer som modifierats för medicinsk användning klassas också som GMO

I Sverige regleras innesluten användning av GMO genom förordningen om innesluten användning av genetiskt modifierade organismer (SFS 2000:271). Arbetsmiljöverket är den behöriga myndigheten i fråga om GM-mikroorganismer och cellodlingar av högre organismer. Havs- och vattenmyndigheten ansvarar för akvatiska GMO, medan Jordbruksverket ansvarar för innesluten användning av alla andra genetiskt modifierade organismer, inklusive landlevande växter och djur.

§

EXEMPEL FRÅN EU-LAGSTIFTNINGEN RÖRANDE GENETISKT MODIFIERADE ORGANISMER

Europaparlamentets och rådets direktiv 2001/18/EG om avsiktlig utsättning av genetiskt modifierade organismer i miljön.

Europaparlamentets och rådets förordning (EG) nr. 178/2002 om allmänna principer och krav för livsmedelslagstiftning, om inrättande av EFSA och om förfaranden i frågor som rör livsmedelssäkerhet.

Rådets direktiv 2002/53/EC om den gemensamma sortlistan för arter av lantbruksväxter.

Europaparlamentets och rådets förordning (EG) nr. 1829/2003 om genetiskt modifierade livsmedel och foder.

Europaparlamentets och rådets förordning (EG) nr. 1830/2003 om spårbarhet och märkning av GMO och spårbarhet av livsmedel och foderprodukter som är framställda av GMO.

Europaparlamentets och rådets förordning (EG) nr. 1946/2003 om gränsöverskridande förflyttning av GMO och införlivandet av Cartagena-protokollet om biosäkerhet i EU-lagstiftningen.

Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2015/412 om ändring av direktiv 2001/18/EG vad gäller medlemsstaternas möjlighet att begränsa eller förbjuda odling av genetiskt modifierade organismer inom sina territorier.

Dessutom finns det ett antal förordningar, genomförandebeslut och direktiv (inklusive de som ändrar tidigare direktiv) som hänvisar till specifika uppgifter om genetiskt modifierade organismer.

AVSIKTIG UTSÄTTNING FÖR FÄLTFÖRSÖK

Den svenska miljöbalken definierar avsiktlig utsättning som all avsiktig introduktion av GMO i miljön (utan inneslutning). Exempel är fältförsök med genetiskt modifierade växter, kliniska försök med GM-mikroorganismer och gårdsbaserade försök med GM-djur.

Ett GMO-försök måste uppfylla de krav som anges i del B i direktiv 2001/18/EG och sådana försök kräver tillstånd från nationella behöriga myndigheter. I Sverige regleras detta av förordningen om avsiktig utsättning av GMO (SFS 2002:1086). För fältförsök med genetiskt modifierade djur och växter behövs tillstånd av Jordbruksverket, eller av Skogsstyrelsen i fråga om träd för virkesproduktion.

Eftersom fältförsök med GM-växter sker utomhus ställs krav om extra försiktighetsåtgärder i många EU-länder, såsom staket, insektsnät, fröfallor och minimiavstånd (beroende på gröda) till bikupor och närbesläktade grödor. Syftet är att begränsa sannolikheten för spridning till omgivningen. Eftersom dessa försiktighetsåtgärder inte är definierade i EU-lagstiftningen är det upp till medlemsstaterna själva att bestämma vilka krav som ska gälla för fältförsök med GM-växter. I Sverige kan krav ställas på minimiavstånd till andra odlingar, skydds-bård, samt rensning av spillplantor nästkommande säsong. Vid djurförsök måste försiktighet vidtas för att undvika att GM-djur rymmer och att de parar sig med vilda djur.

KOMMERSELL ANVÄNDNING

Kommersiell användning av GMO anges i lagstiftningen som "utsläppande på marknaden". Tillstånd för att placera en GMO på marknaden kan omfatta en eller flera möjliga användnings-

områden såsom odling, import och bearbetning av levande GMO, eller användning av GMO som livsmedel eller djurfoder. Beslut om utsläppande av GMO på marknaden fattas gemensamt av EU:s medlemsländer.

Det finns två sätt att ansöka om att släppa ut en GMO på marknaden i EU. Man kan antingen följa direktiv 2001/18/EG, som reglerar avsiktig utsättning (både fältförsök och kommersiell odling) inom EU och import av GMO från länder utanför EU, eller förordning (EG) nr. 1829/2003 som reglerar kommersiell odling, import, bearbetning och användning av genetiskt modifierade livsmedel och foder. I dagsläget har de flesta av ansökningarna lämnats in i enlighet med förordning (EG) nr. 1829/2003 (se flödesschemat över godkännandeprocessen). Ansökan om att släppa en GMO på marknaden som livsmedel eller foder kan lämnas till en behörig myndighet i vilket EU-land som helst och myndigheten skickar i sin tur ansökan till EFSA. EFSA:s GMO-panel genomför en vetenskaplig riskbedömning av GMO:n med avseende på potentiella risker för människors och djurs hälsa och för miljön. Riskbedömningen baseras på tillgänglig vetenskaplig litteratur och dokumentation inlämnad av sökanden som måste följa internationellt överenskomna riktlinjer i enlighet med *Codex Alimentarius*¹. GMO-panelen lämnar ett vetenskapligt yttrande till EU-kommissionen baserat på riskbedömningen. De nationella myndigheterna uppmanas att lämna synpunkter på ansökan. Beslutet att godkänna, eller att inte godkänna, ansökan fattas av Ständiga kommittén för växter, djur, livsmedel och foder, om en kvalificerad majoritet² kan nås bland medlemsländerna, eller av Överklagandekom-

¹ Samling av internationellt erkända standards, uppförandekoder, riktlinjer och andra rekommendationer relaterade till livsmedel, livsmedelsproduktion och livsmedelssäkerhet.

² En kvalificerad majoritet uppnås om två villkor är uppfyllda: 1) 55% av medlemsländerna röstar för – i praktiken innebär detta 15 av 27, och 2) förslaget stöds av medlemsstater som representerar minst 65% av EU:s totala befolkning.



mittén om kvalificerad majoritet ej nås i första instansen. Om inte heller Överklagandekommittén når kvalificerad majoritet ska Kommissionen, enligt lagstiftningen, ta beslutet. Beslut om godkännande gäller i hela EU.

Ansökan inlämnad enligt direktiv 2001/18/EG (avsiktlig utsättning i miljön) följer en liknande process; ansökan skickas till nationell myndighet för miljökonsekvensbedömning. Ett förslag till godkännande av ansökan följs av en invändningsfas och en överenskommelsesfas. Om det råder oenighet går frågan till EFSA, varefter den följer ett liknande förfarande som ovan (förutom att den första omröstningen äger rum i Regulatory Committee 2001/18/EC). Beslutet är i princip giltigt i alla EU-länder, men sedan 2015 tillåter EU-lagstiftningen (direktiv 2015/412) enskilda medlemsstater att förbjuda odling av GM-grödor inom sina egna gränser, även om grödan har godkänts för odling på EU-nivå.

MÄRKNING OCH SPÅRBARHET

Märkning och spårbarhet av GMO i livsmedel och foder regleras av EU-förordning 1830/2003. Livsmedel och foder som innehåller, består av eller har framställts av GMO, måste ha en väl synlig etikett med "genetiskt modifierad" eller "framställt av genetiskt modifierad x" på förpackningen för att säkerställa spårbarhet och valfrihet för konsumenterna³. Även förädlade livsmedel eller foder som inte har detekterbara nivåer av DNA eller proteiner men som är gjorda av genetiskt modifierade organismer, till exempel raffinerat socker eller rapsolja, måste märkas. Eftersom stora delar av världens produktion av baslivsmedel som majs, soja, ris och raps för närvarande kommer från GM-sorter är ofrivillig eller teknisk inblandning av GMO i konventionellt producerade livsmedel och foder ibland svår att undvika. GM-sorter eller produkter som framställts av GM-sorter som har godkänts inom EU får förekomma upp till en gräns på 0,9 procent av samma art i en produkt utan att de behöver GMO-märkas. Inblandning av icke godkända GMO är i allmänhet inte tillåtet inom EU, men en inblandning av upp till 0,1 procent i fodret accepteras under vissa omständigheter (se förordning (EU) nr 619/2011).

Vitaminer och enzymer framställda av GMO kräver inte märkning, inte heller textilier som framställts av GM-bomull eller oljor från GM-växter som används för tekniska eller kosmetiska ändamål såsom hudvårdsprodukter. Kött, ägg och mjölk från djur som har utfodrats med GM-foder behöver inte märkas eftersom djuren själva inte är GMO. I princip föreskriver lagstiftningen att livsmedel och foder bör märkas med vilka ingredienser maten innehåller, inte med vad den inte innehåller. Därför stöds inte livsmedelsmärkning som "GMO-fri" (som ofta förekommer i länder utanför EU) i den

³ Vissa spår av GMO i produkter kan vara oavsiktliga eller tekniskt oundvikliga. Sådana förekomster av GMO bör därför inte leda till krav på märkning och spårbarhet.

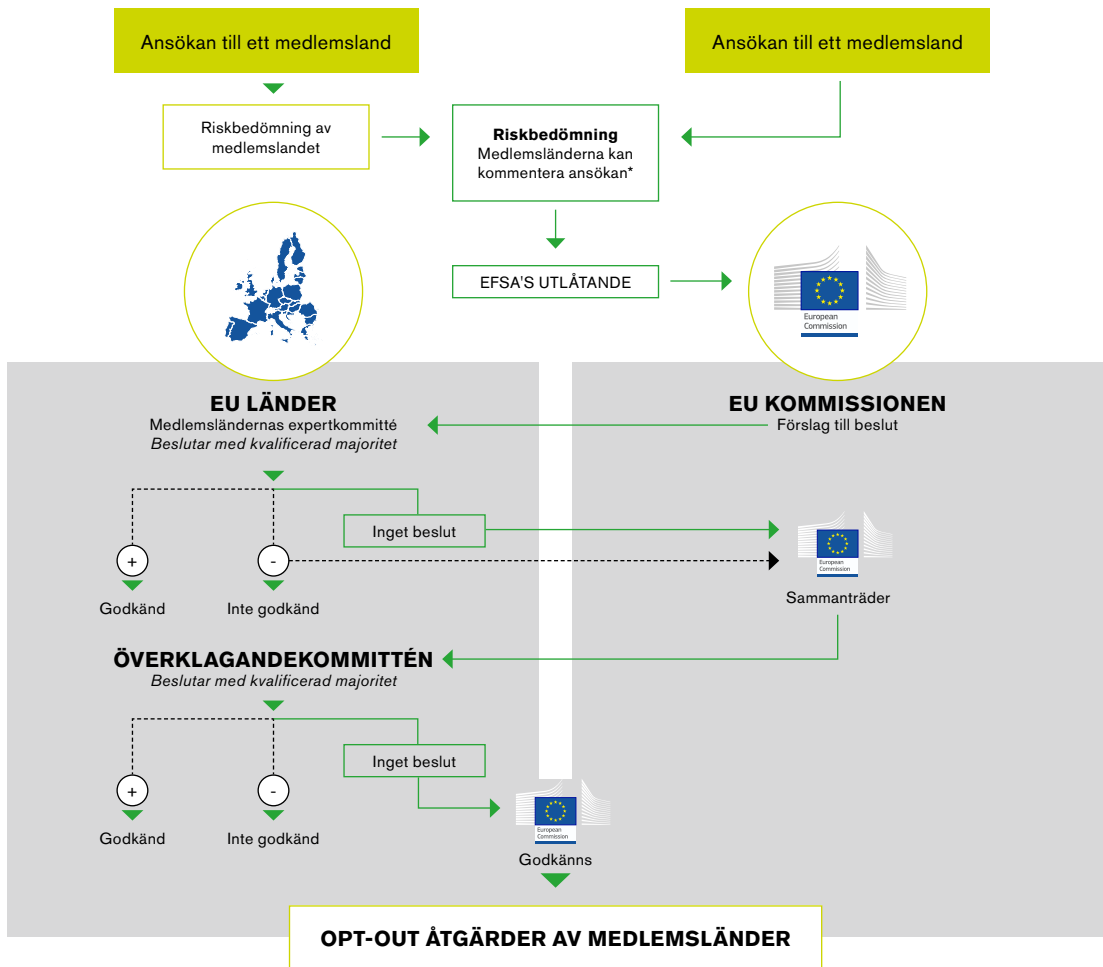
Beslutsprocessen för GMO i EU

GMO FÖR KOMMERSELL ODLING

(under förordning 1829/2003)

GMO FÖR LIVSMEDEL OCH FODER

(under förordning 1829/2003)



Medlemsstaterna kan anta nödgärder baserade på nya identifierade risker (av hälso- och miljöskäl)
*Opt-out är möjligt också i ansökningsstadiet.

ODLING

Odlingsdirektiv
Trädde i kraft i april 2015

MEDLEMSLÄNDERNA BESLUTAR
Om odling av GMO inom sina territorier



	Urvalsförädling	Hybridisering av arter	Mutations- förädling (strålning/kemisk)	Genetisk modifiering (genöverföring)	Genom- redigering (utan genöverföring)
Antal gener som påverkas	10 000 - 300 000 ¹	10 000 - 300 000 ¹	300 - 700 000 ¹	1-3 ²	1-3 ²
Utvärdering av effekter på människa och miljö krävs	X	X	X	✓	✓ ³
Krav på märkning ⁴	X	X	X	✓	✓ ³
Spårbar	X	✓	X	✓	X
Tillåtet i ekologisk odling	✓	✓	X ⁵	X	X
Exempel	De flesta växter vi äter	Äpplen, vete, ris, rågvete, raps	Päron, grapefrukt, raps, korn	Majs, raps, aubergine, soja, papaya	Champinjon, äpple, soja, raps, potatis

1. Beroende på art. 2. Fler gener kan påverkas. 3. Inom EU. I många andra länder anses inte dessa grödor vara GMO. 4. Inom EU måste produkter där en ingrediens innehåller mer än 0,9 procent GMO märkas. 5. Enligt IFOAM är mutationsförädling inte tillåtet men i praktiken kan detta inte kontrolleras för och många av dessa grödor odlas också på ekologiska gårdar. källor: Sikora et al. 2011. *Int J Plant Genom* doi:10.1155/2011/314829, Genetic Literacy Project.

nuvarande lagstiftningen, även om detta tolkas olika i olika EU-länder.

Kravet på spårbarhet föreskriver att en GMO, en produkt som innehåller GM-ingredienser eller är gjord av en GMO (förutom enzymer och vitaminer gjorda av GM-mikroorganismer) bör följas av dokumentation som gör det möjligt att spåra ingrediensen genom alla delar av livsmedelskedjan. Under 2018 beslutade EU-domstolen att alla organismer som utvecklats genom mutagenes klassificeras som GMO, medan endast de som utvecklats genom mutagenes-teknik som fanns tillgängliga före 2001 är undantagna från bestämmelserna i GMO-direktivet. Detta innebär att produkter som utvecklats med riktad mutagenes, alltså genomredigerings-tekniker, regleras som GMO. Eftersom det inte är möjligt

att avgöra om en mutation är ett resultat av genomredigering eller slumpmässigt inducerad mutagenes, eller om det är en naturligt förekommande mutation, kan kravet på spårbarhet och identifiering vara svårt att upprätthålla i framtiden med tanke på att flera länder utanför EU inte klassar dessa grödor och produkter som GMO.

SAMEXISTENS

Eftersom produkter som innehåller GMO måste märkas, utgör ofrivillig sammanblandning mellan konventionellt framställda produkter och GM-produkter en ekonomisk risk för producenter. Jordbrukare som använder konventionellt förädlade sorter kan behöva märka sina produkter om de innehåller mer än 0,9 procent



av en GM-gröda, och de jordbrukare som odlar GM-grödor kan avkrävas ansvar och åtalas.

Direktiv (EU) 2015/412 ålägger EU-länder som odlar GM-grödor att införa samexistensåtgärder i områden där de gränsar till EU-länder som inte odlar GMO. För att minimera risken för sammanblandning mellan GM-sorter och konventionellt förädlade grödor har de svenska myndigheterna utvecklat ett regelverk för odling av GM-grödor. Syftet är att minska sammanblandningen till en nivå under tröskelvärdet på 0,9 procent. Kraven omfattar odlingsavstånd till angränsande grödor (inrättat för majs och potatis), skyldighet att informera de lokala myndigheterna och angränsande lantbrukare om odlingen av GM-grödor, samt rengöring av utrustning som används för GM-grödor.

ANDRA ORGANISMER

För närvarande finns inga genetiskt modifierade däggdjur eller fiskar (eller produkter från sådana djur) på EU-marknaden, men EFSA har publicerat riktlinjer för miljöriskbedömning med syftet att utvärdera de möjliga direkta, indirekta, omedelbara eller fördröjda riskerna för människors hälsa och miljön, av sådana organismer samt relaterade frågor som rör djurhälsa och välfärd. Detta som ett stöd till eventuella framtida sökande när de lämnar in sina ansökningar om genetiskt modifierade däggdjur, fiskar, insekter, fåglar och härledda produkter för inträde på den europeiska marknaden.

Sortprovning och växtförädlarrätten

I Sverige och många andra länder kan alla kommersiella sorter skyddas av växtförädlarrätten enligt en internationell överenskommelse: International Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV). Patentlagen kan också tillämpas när en sort innehåller en bioteknologisk uppfinning för vilken ett eller flera patent gäller, men beror till stor del på den aktuella jurisdiktionen. I Europa är växtsorter undantagna från patenterbarhet enligt den europeiska patentkonventionen. Emellertid kan ett patent erhållas, som omfattar många växtsorter inom ramen för kravet, om uppfinningen inte är tekniskt begränsad till en specifik växtsort. Växtförädlarrätten innebär att man måste ha rättighetsinnehavarens tillåtelse för att få föröka, marknadsföra och sälja den skyddade sorten. Det så kallade gårdsundantaget, det vill säga rätten att spara utsäde för användning på den egna gården, är inom UPOV ett frivilligt undantag från växtförädlarrätten. I många länder är royalty-avgiften kraftigt reducerad om gården inte överstiger en viss produktionsvolym.

För att en sort skall bli skyddad och/eller upptagen på sortlistan i Sverige måste den godkännas av Jordbruksverket. För sortskydd måste sorten kunna skiljas från andra sorter, vara enhetlig och stabil, det vill säga att den inte förändras när den förökas. Jordbruksgrödor måste också ha ett tillfredsställande odlings- och bruksvärde – Value for Cultivation and Use (VCU). Sorter som listats i andra EU-länder kan säljas och odlas i Sverige utan ytterligare provning.

Alla frön av jordbruksgrödor och köksväxter som säljs i Sverige måste vara certifierade. För att bli certifierad måste sorten vara listad och vara av god kvalitet när det gäller grobarhet, vattenhalt och patogener. Det krävs också en viss grad av renhet med avseende på ogräsfrön, andra frön och skräp.

Växtförädlarrätten gäller i högst 25 till 30 år beroende på art. Detta hindrar dock inte att andra får använda de skyddade sorterna i forskning, försök eller som föräldrar i förädling.





Podcasten Shaping our food

Shaping our food är en podcast som producerats av Lisa Beste och Anna Lehrman inom forskningsprogrammet Mistra Biotech. Många av de ämnen som tas upp i podden överlappar eller relaterar till det som tas upp i denna bok. Varje avsnitt baseras på intervjuer med forskare och experter. Du hittar podden på flera plattformar så som Libsyn, Spotify och iTunes.

1. **Varför behöver vi växtförädling?** Gäst: Inger Åhman, professor i växtförädling på SLU.
2. **Varför behöver vi djuravel?** Gäst: Lotta Rydhmer, professor i husdjursgenetik vid SLU.
3. **Att tämja en vild växt.** Gäster: Emelie Ivarson, doktorand, Sten Stymne och Li-Hua Zhu, båda professorer i växtförädling vid SLU.
4. **Kampen mot algsvampen.** Gäst: Erik Andreasson, professor i växtskydd vid SLU.
5. **Havrens bästa tid är nu.** Gäster: Alf Ceplitis, senior breeder och technology manager på Lantmännen, Elisabeth Jonas, docent i kvantitativ genetik vid SLU, och Olof Olsson, professor i tillämpad biokemi och projektledare för ScanOats, Lunds Universitet.
6. **Hundra procent onaturligt.** Gäst: Per Sandin, lektor i bioetik och miljöetik vid SLU.
7. **Guld och gröna åkrar, inte gröna hav.** Gäster: Henrik Svennerstam, forskare vid Umeå Plant Science Centre och Martin Weih, professor i växtekologi och i jordbruksgrödors ekofysiologi vid SLU.
8. **Proteinerna tar oss närmare sanningen.** Gäst: Fredrik Levander, universitetslektor i immunteknologi vid Lunds universitet.
9. **Noaks ark på riktigt – genbankerna bevarar egenskaperna för framtiden.** Gäster: Ulrika Carlson-Nilsson, senior forskare och Pawel Chrominski, labansvarig på NordGen, och Denise Costich, senior forskare och chef för genbanken, och Bibiana Espinosa forskningsassistent på CIMMYT.
10. **Ett krämigt, såsigt, fast ändå stabilt avsnitt om stärkelse.** Gäster: Mathias Samuelsson, forsknings & utvecklingschef på Sveriges stärkelseproducenter, och Mariette Andersson, forskare i växtförädling och Roger Andersson, professor i livsmedelsvetenskap vid SLU.
11. **En hel massa om arvsmassan – genomikvägen till egenskaperna.** Gäster: Cecilia Gustafsson, forskare i genomassocierad växtförädling, och Dirk-Jan de Koning, professor i husdjursavel vid SLU.
12. **Tusentals sorters sorter – men bara en GMO.** Gäster: Jens Weibull, handläggare på Jordbruksverket, Marie Nyman, kanslichef på Gentekniknämnden, och Dennis Eriksson, forskare i växtförädling vid SLU.



13. **Femtio procent lik mamma, sextio procent lik en banan?** Gäster: Fredrik Sundström, docent i biologi vid Uppsala universitet, och Niclas Gyllenstrand, intendent på Naturhistoriska riksmuseet.
14. **Konsumenterna maten och gen-tekniken.** Gäster: Minna Hellman, Minna Hellman, hållbarhetsstrateg på Konsumentföreningen Stockholm och Carl Johan Lagerkvist, professor företagsekonomi vid SLU.
15. **GMO hjärta EKO lika med sant?** Gäster: Lars Hållbom tidigare regelchef på KRAV, Minna Hellman, hållbarhetsstrateg på Konsumentföreningen Stockholm, Sara Sundquist, Näringspolitisk expert på Livsmedelsföretagen, och Carl Johan Lagerkvist, professor företagsekonomi, Klara Fischer, docent i landsbygdsutveckling, och Per Sandin, lektor i bioetik och miljöetik, alla vid SLU.
16. **Artificiell intelligens i förädlarens tjänst.** Gäster: Aakash Chawade, universitetslektor vid SLU, och Tina Henriksson, senior breeder på Lantmännen.
17. **”Ja! Eller nej förresten” – hur en hel bransch bytte fot om GMO.** Gäst: Bo Ekstrand, tidigare forskare vid Institutet för livsmedel och bioteknik.
18. **Etik, djuravel och teknik.** Gäst: Helena Röcklinsberg, lektor i djuretik vid SLU.
19. **Metoder och tekniker i växtförädlingen.** Gäster: Gäster: Cecilia Gustafsson, forskare i genom-associerad växtförädling, Jonas Skytte af Sättra, doktorand, Emelie Ivarson, forskningsingenjör, och Mariette Andersson, docent i växtförädling, alla på SLU.
20. **Hur försiktiga bör vi vara?** Gäst: Sven Ove Hansson, professor emeritus i filosofi på KTH, och programchef för Mistra Biotech.



Lästips

Comstock G. 2012. Ethics and genetically modified food. In Kaplan, D.M. (red.) *The Philosophy of Food*. Berkeley: University of California Press

Curtin SJ, Voytas DF, & Stupar RM. 2012. Genome engineering of crops with designer nucleases. *The Plant Genome* 5:42-50

D'Eath RB, Conington J, Lawrence AB, Olsson IAS, & Sandøe P. 2010. Breeding for behavioural change in farm animals: practical, economic and ethical considerations. *Animal Welfare* 19: 17-27

Einsiedel EF. 2005. Public perceptions of transgenic animals. *Scientific and Technical Review of the Office International des Epizooties* 24: 149-57

Forabosco F, Löhmus M, Rydhmer L, & Sundström LF. 2013. Genetically modified farm animals and fish in agriculture: A review. *Livestock Science* 153: 1-9

Gaj T, Gersbach CA, & Barbas CF. 2013. ZFN, TALEN, and CRISPR/Cas-based methods for genome engineering. *Trends in Biotechnology* 31:397-405

George EF, Hall MA, & De Klerk G-J. 2008. *Plant propagation by tissue culture*, 3rd edition, Exegetics, Basingstoke, UK

Gjerris M. 2012. Animal Biotechnology: The Ethical Landscape, i Brunk CG & Hartley S *Designer Animals: Mapping the Issues in Animal Biotechnology*. Toronto: University of Toronto Press, pp. 47-70

Gregorowius D, Lindemann-Matthies P, & Huppenbauer M. 2012. Ethical discourse on the use of genetically modified crops: A review of academic publications in the fields of ecology and environmental ethics. *Journal of Agricultural Environmental Ethics* 25: 265-293

Hansson SO. 2019. A science-informed ethics for agricultural biotechnology. *Crop Breeding, Genetics and Genomics* doi:10.20900/cbagg20190006

Jannink J-L, Lorenz AJ, & Iwata, H. 2010. Genomic selection in plant breeding: From theory to practice. *Briefings in Functional Genomics* 9: 166-177

Jorin-Novo JV, Komatsu S, Weckwerth W, & Wienkoop S (red.). 2014. *Plant Proteomics: Methods and Protocols* 2nd ed. Series: Methods in Molecular Biology 1072, Humana Press

Kingsbury N. 2009. *Hybrid, the history & science of plant breeding*. The University of Chicago Press.

Meuwissen T, Hayes B, & Goddard M. 2013. Accelerating improvement of livestock with genomic selection. *Annual Review of Animal Biosciences* 1: 221-237

Podevin N, Davies HV, Hartung F, Nogué F, & Casacuberta JM. 2013. Site-directed nucleases: a paradigm shift in predictable, knowledge-based plant breeding. *Trends in Biotechnology* 31: 375-83

Primrose SB, & Twyman RM. 2006. *Principles of gene manipulation and genomics*. Blackwell Publishing

Riddihough G, & Zahn LM. 2013. What is epigenetics? *Science* 330: 611

Rollin BE. 1995. *The Frankenstein Syndrome. Ethical and social issues in the genetic engineering of animals*. Cambridge: Cambridge University Press

Slater A, Scott N, & Fowler M. 2003. *Plant biotechnology – the genetic manipulation of plants*. Oxford university press

www.gmo.nu

www.sjv.se

www.genteknik.se

www.slu.se/mistrabiotech

Ordlista

Allel	Alternativ variant av en gen.
Allopolyploid	Polyploid med kromosomer från olika arter.
Arvbarhet	Proportion av fenotypisk variation i en population som beror på genetisk variation.
Autopolyploid	Polyploid med flera upplagor av kromosomer från en och samma art.
Diploid	Organism med två uppsättningar kromosomer.
DNA	Deoxyribonukleinsyra. Den stora molekyl som lagrar den genetiska informationen i alla celler.
Endonukleas	Nukleas som klyver inuti poly-nukleotidkejor.
Exonukleas	Nukleas som klyver poly-nukleotidkejor en efter en från ändarna.
Fenotyp	Resultatet av uttrycket av en organisms gener + miljöfaktorer och interaktionerna dem emellan.
Gamet	Haploid reproduktiv cell som bildas vid meios.
Genom	Den kompletta uppsättningen gener som en organism bär på.
Genotyp	Den genetiska sammansättningen i en organism.
GMO	Genetiskt modifierad organism. En organism i vilken det genetiska materialet har förändrats på ett sätt som inte sker naturligt genom parning och/eller genom naturlig rekombination.
Haploid	Cell som bara innehåller en uppsättning kromosomer (jfr diploid).
Heterosis	Hybrideffekt, avkommans överlägsenhet över föräldrarna i en eller flera egenskaper.
Heterozygot	Diploid organism med olika alleler i alla loci.
Hexaploid	Organism med sex uppsättningar kromosomer.
Homozygot	Organism med identiska par av gener (eller alleler) för en specifik egenskap.
Kloning	Utveckling av en organism från en somatisk cell eller cellkärna.
Kromosom	En struktur av DNA och associerade proteiner.
Könscell	Reproduktiv cell som ger upphov till en gamet.
Locus	En gens plats i DNA (plural loci).
Meios	Celldelning som resulterar i gameter (ägg eller spermaceller) med halva antalet kromosomer.



Meristem	Tillväxtzon i växter.
Metaboliter	Små molekyler i cellen med varierande funktioner.
Mikrospor	Växtspor som utvecklas till en hangametofyt, som i sin tur utvecklas till en spermacell.
miRNA/ mikro-RNA	Små icke-kodande RNA-molekyler som reglerar genuttrycket.
mRNA	RNA-molekyler som transporterar genetisk information från DNA till ribosomen där de bestämmer aminosyrasekvensen hos det producerade proteinet.
Mitos	Celldelning som resulterar i två celler med identisk uppsättning kromosomer.
Mutation	En förändring i nukleotidsekvensen hos en organism.
Nukleas	Enzym som klyver bindningar mellan nukleotider.
Nukleotider	Byggstenarna (baserna) i DNA; adenin, tymin, cytosin och guanin (i RNA är tymin utbytt mot uracil).
Oligonukleotid	Kort enkelsträngad DNA eller RNA molekyl.
Plasmid	Kort DNA, vanligen i cirkulär dubbelsträngad form i bakterier.
Polyplloid	Organism som bär på mer än två kromosomuppsättningar.
QTL	Quantitative trait loci, DNA-sekvenser som innehåller eller är kopplade till gener som kodar för kvantitativa egenskaper.
Ribosom	Den stora molekyl där mRNA översätts till protein.
RNA	Ribonukleinsyra (ribonucleic acid), en grupp molekyler som kodar, reglerar och uttrycker gener.
Somatisk cell	Alla celler som inte är gameter, könsceller eller odifferentierade stamceller.
Totipotent cell	En cell med förmågan att dela sig och bilda alla specifika celler i en organism.
Transformation	Introduktion av DNA in i genomet.
Transgen	Organism där gener från en annan art introducerats genom genetisk modifiering.
Transkription	När DNA kopieras till mRNA (det första steget i uttrycket av genen).
Translation	Avläsning av mRNA till en kedja av aminosyror som senare viks till ett protein.

FRAMTIDENS MAT – OM HUSDJURSAVEL OCH VÄXTFÖRÄDLING

Du har kanske inte funderat över varför tomater ser ut som de gör, varför våra husdjur är så lugna och vänliga, eller hur det kan vara möjligt att köpa en vattenmelon utan kärnor. Trots att växtförädling och djuravel har format mer eller mindre allt vi äter, är det få människor som är medvetna om vilka vetenskapliga upptäckter och vilket omfattande arbete som ligger bakom maten vi lägger på våra tallrikar.

Med den här boken vill vi ge en översikt över domesticeringen och förädlingen, från jordbrukets början för mer än 10 000 år sedan till dagens molekylära arbete. Vi beskriver grunderna för genernas strukturer och funktioner, berättar hur olika avels- och förädlingsmetoder går till och ger en inblick i lagstiftningen kring användning av genteknik i Sverige och EU. Vi diskuterar också etiska frågor som rör djuravel och växtförädling i allmänhet och genetisk modifiering i synnerhet.

Denna bok är publicerad inom forskningsprogrammet Mistra Biotech vilket finansieras av Stiftelsen för miljöstrategisk forskning (Mistra) och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU).



Innehållet i denna publikation är skyddat enligt lagen om upphovsrätt. Texten och bilderna får inte användas utan tillstånd från SLU. Inte heller kan det återges för kommersiellt bruk.