

Metodbeskrivning för Rättsmedicinalverkets sannolikhetsmodell för medicinska åldersbedömningar

Introduktion

Rättsmedicinalverket (RMV) utför medicinska åldersbedömningar inom asylprocessen på begäran av Migrationsverket samt i brottmål på begäran av polisen, säkerhetspolisen, åklagare och domstol. RMV använder en sannolikhetsmodell som utifrån statistiska beräkningar baserade på vetenskapliga studier anger hur sannolikt det är att en person är över eller under 14, 15, 18 eller 21 år. För brottmål så har åldern betydelse för bland annat häktning och brottspåföljd och inom asyl är det av vikt för att tillgodose ett barns lagliga rättigheter och att resurser avsedda för barn används till barn. Röntgenundersökning av hand/handled, nyckelben eller magnetkameraundersökning av lårbenets nedre del (knä) är de skelettdelar som kan bli aktuella för undersökning. Undersökningen av en skelettdel kompletteras med en röntgenundersökning av visdomständer i underkäken.

Valet av undersökningar görs av rättsläkare utifrån beställande myndighets frågeställning.

Metoden för de medicinska åldersbedömningarna innebär att MR-bilder respektive röntgenbilder granskas och bedöms av specialister i radiologi (röntgenläkare) respektive tandläkare (rättsodontologer). Alla bedömningar är förknippade med ett visst mått av osäkerhet och för att minimera denna utförs kalibrering mellan bedömare.

Rättsmedicinalverket använder kvalificerade bedömare med vana att göra stadiindelning av visdomständer respektive hand/handled, nyckelben och knä. Efter att röntgenbilder/magnetkamerabilder analyserats görs en samlad bedömning av rättsläkare på Rättsmedicinalverket som upprättar ett rättsmedicinskt utlåtande. Den sammantagna bedömningen baseras på en sannolikhetsmodell som baseras på resultat från studier. De vetenskapliga studierna som använts anger hur skelettet respektive visdomständernas mognadsgrad (stadium) är fördelade hos individer med känd ålder, medan den statistiska modellen anger hur sannolikt det är att en person med okänd ålder som uppnått vissa stadier i skelett och visdomstand är över eller under 14, 15, 18 eller 21 år.

Huvudpunkter för sannolikhetsmodellen

- Ingen metod som idag används för medicinsk åldersbedömning kan avgöra en exakt kronologisk ålder vilket beror på de individuella variationer som finns i den biologiska utvecklingen.
- Rättsmedicinalverkets metod är utvecklad för att utgöra ett underlag för Migrationsverket, Polismyndigheten, Åklagarmyndigheten, Säkerhetspolisen eller domstolars samlade bedömning.
- Den beskrivna sannolikhetsmodellen utgör en bedömning av sannolikhet relativt 14, 15, 18 eller 21-årsgränsen och är baserad på röntgen eller magnetkameraundersökning av skelettmognad och röntgenundersökning för mognad av visdomstand.
- All data som används i modellen utgörs av observerade data från individer från olika studier. Studierna har grupperat data på olika sätt där data för enskilda individer inte alltid finns att tillgå. Statistiska modeller har använts för att simulera data från dessa studier.
- Denna finala version av sannolikhetsmodellen är baserad på 46 vetenskapliga studier eller datasamlingar fördelade på undersökningar av hand/handled (18st), nyckelben (9st), knä (5st) samt tand (14st). Totalt har information från cirka 33 000 individer återskapats.
- Sannolikhetsmodellen har validerats med oberoende populationer med känd ålder med syfte att få ett objektiva mått på den teoretiska modellens prestanda. Dessa dataset har efter valideringen inkluderats i modellens finala version.
- Alla statistiska modeller kräver att antaganden tillämpas och dessa påverkar modellens skattningar.
- Osäkerheten som baseras på biologisk variation samt antaganden i modellen redovisas i denna metodbeskrivning samt i utlåtandet. En stor referenspopulation som baseras på så stor variation som möjligt kan antas mer lämplig att användas till individer med olika bakgrund än en mer begränsad liten population. Studiepopulationerna som modellen är baserad på är undersökta i 26 länder fördelade på sex olika kontinenter.

Undersökningar

Bedömning tandmognad

Utveckling av visdomstandan används för bedömning av 14, 15, 18 och 21 år. En panoramaröntgenundersökning utförs antingen hos upphandlad leverantör eller hos annan aktör som kan utföra denna undersökning. Visdomständer i underkäken stadiindelade därefter enligt Demirjians skala som innefattar åtta stadier (A-H), där A är första stadiet och H är slutstadiet (1) av två rättsodontologer som utför en oberoende bedömning. Med oberoende bedömning menas att tandläkarna gör bedömningen utan att ha tillgång till/kunskap om den andra tandläkarens bedömning. Då stadiindelningen resulterar i två olika bedömningar används det tidigaste stadiet.

Om bedömning ej är möjlig beroende på otillräcklig bildkvalitet (trots upprepad bildtagning) eller då visdomständer saknas, anger tandläkarna svarsalternativet ”ej bedömbär”, samt orsaken därtill. Om det vid tandröntgenundersökningen framgår att båda visdomständerna i underkäken saknas kommer åldersbedömningen att grundas på mognadsgraden av en enskild skelettdel. Om däremot enbart en av bedömarna angivit svaret ”ej bedömbär” skickas bilden till en tredje rättsodontolog vid Rättsmedicinalverket som gör en bedömning av röntgenbilden. Om röntgenbilden ej är bedömbär kommer åldersbedömningen att grundas på mognadsgraden av en enskild skelettdel, i annat fall ingår tredje bedömarens (rättsodontologens) svar. Då vänster och höger tand bedöms vara i två olika stadier, används vänster sida.

För att minimera mängden joniserande strålning, får avbildning med panoramaröntgen endast upprepas upp till tre gånger i syfte att erhålla tillräcklig bildkvalitet. Därefter ska den beställande myndigheten informeras och fatta beslut om fortsatt handläggning utifrån deras bedömning avseende proportionalitetsprincipen.

Bedömning knämognad

Utveckling av lårbenets nedre del används vid bedömning av 18 år. Lårbenets nedre del i det i första hand vänster knä, undersöks med magnetkamera och mognadsgraden av tillväxtzonen bedöms enligt en skala som bygger på benmognadsskalan definierad i Krämer et al. 2014 (3). Rättsmedicinalverket använder i sin slutliga bedömning av knämognad endast de två skalstegen uppnått slutstadium eller ej uppnått slutstadium. Detta eftersom lårbenets nedre del används endast för bedömning relativt 18-årsgränsen, där ett moget knä är relevant, och inte för en trolig ålder. Det kan argumenteras att en bättre precision i de yngre åldrarna skulle uppnås om hela mognadsskalan för knä användes. Bedömningen av de omogna stegen anses dock enligt radiologerna vara svåra att med säkerhet särskilja, vilket skulle tillföra mer osäkerhet.

Knäled som uppnått slutstadium innebär enligt Rättsmedicinalverkets definition, att tillväxtzonen i knäleden uppnått minst stadie 4 enligt Krämer 2014, vilket innebär att tillväxtzonen är helt förbenad - med eller utan synligt ärr. Knäled som ej uppnått slutstadium innebär följaktligen att knäleden inte uppnått stadie 4-5 enligt Krämers definition (3).

Stadieindelningen utförs av två oberoende bedömare (röntgenläkare) och deras svar exporteras till Rättsmedicinalverkets ärendehanteringssystem. Med oberoende bedömare menas att två läkare bedömer respektive bild oberoende av varandra, dvs. utan att ha tillgång till/kunskap om den andra läkarens bedömning. Med blindad bedömning menas att de endast har tillgång till bilderna från undersökningen och uppgift om kön på den person som bilden avser men inga andra uppgifter om den undersökta personen. Om stadieindelning inte är möjlig på grund av otillräcklig bildkvalitet kan bedömarna ange svarsalternativet "Ej bedömbär".

För att bedömningen avseende skelettmognad ska bli att den undersökta individen uppnått slutstadium av lårbenets nedre del, krävs att båda bedömarna oberoende av varandra kommit till denna slutsats. Om svaren inte är samstämmiga mellan bedömarna blir bedömningen således att slutstadium inte har uppnåtts. Skulle individen som är föremål för åldersbedömningen av någon anledning inte kunna genomgå undersökningen, såsom vid förekomst av metallfragment eller om båda bedömarna av MR-bilderna anger svaret "Ej bedömbär" kan mognadsgraden av en annan skelettdel tillsammans med tandmognadsbedömningen alternativt tandmognadsbedömning ensamt utgöra underlag i den medicinska åldersbedömningen. Om endast en av bedömarna angivit svaret "Ej bedömbär" skickas bilden till en tredje röntgenläkare, knuten till Rättsmedicinalverket. Denna röntgenläkare gör en tredje bedömning av MR-bilden.

Om leverantören vid utförandet av uppdraget inom asylprocessen noterar medicinska fynd av en karaktär som bedöms kräva uppföljning eller utredning inom sjukvård för att undvika allvarliga följder för individens hälsa, ska leverantören informera den undersökta och i förekommande fall dess ställföreträdare om fynden. Information ska lämnas under förutsättning att den person som genomgått undersökningen lämnat sitt uttryckliga samtycke till att ta del av denna information. Om detta sker vid utförandet av uppdraget efter beslut om kroppsbesiktning enligt 28 kap §12 i rättegångsbalken (brottmål) ska leverantören i det enskilda fallet kontakta Rättsmedicinalverket.

Teknisk specifikation avseende MR

Den MR-sekvens och snittplan som används är i enlighet med Krämer et. al. (3), dvs. en T1 viktad sekvens med sagittalplan snitt av knäleden som är 3 mm tjocka och täcker hela tillväxtplattan. Tillväxtplattan bedöms i alla snitt och om den är helt eller partiellt öppen på något snitt betyder det att tillväxtzonen ej är sluten. Om tillväxtzonen är sluten, med eller utan ärr (lågsignalerande horisontellt löpande korta linjer parallella med metafysen), på samtliga snitt benämns knäleden som att den uppnått slutstadium.

MR inställningar som ska användas är fastställda till:

Sag T1 TSE/FSE.

TR/TE ca 600-700/17 eller liknande.

3 mm snittjocklek, gap 0,3.

Pixelstorlek 0,5 x 0,5 mm eller bättre.

Avseende MR-maskinens fältstyrka kan det generellt sägas att ju högre desto bättre upplösning, men att kvaliteten med en fältstyrka på minst 1.5 Tesla är tillräckligt bra för bedömning av tillväxtzonen. Nackdelen med högre fältstyrka (3.0 Tesla) är att den är mer känslig för rörelser.

Bedömning nyckelbensmognad

Utveckling av nyckelben används vid bedömning av 21-årsåldern då denna skelettdel sluter sig sist. Nyckelbenen undersöks med datortomografi undersökning (DT) och utförs av offentlig vårdgivare som bokas enligt instruktioner från Rättsmedicinalverket efter åklagarens beslut om kroppsbesiktning. Rättsmedicinalverket utfärdar inte remisser till den offentliga vården. Bildmaterialet skickas därefter till Rättsmedicinalverket via en bärbar lagringsenhet (ex. CD, USB-minne) med rekommenderad post alternativt personlig överlämning.

Rättsmedicinalverket begär stadielindegning från två oberoende bedömare (röntgenläkare) och deras svar exporterar till Rättsmedicinalverkets ärendehanteringssystem. Mognadsgraden i tillväxtzonen bedöms enligt Schmelings skala som innefattar fem stadier, 1-5 (4, 5). Med oberoende bedömare menas att två läkare bedömer respektive bild, oberoende av varandra, dvs. utan att ha tillgång till/kunskap om den andra läkarens bedömning. Med blindad bedömning menas att de endast har tillgång till bilderna från undersökningen men inga andra uppgifter om den person som undersöks. Då stadielindegningen resulterar i två olika bedömningar används det tidigaste stadiet.

Om stadielindegning inte är möjlig på grund av otillräcklig bildkvalitet kan bedömare anga svarsalternativet ”Ej bedömbar”. Om båda bedömare av skiktröntgen anger svaret ”Ej bedömbar” kan mognadsgraden av en annan skelettdel tillsammans med tandmognadsbedömningen alternativt tandmognadsbedömning ensamt utgöra underlag i den medicinska åldersbedömningen. Om endast en av bedömare angivit svaret ”Ej bedömbar” skickas bilden till en tredje röntgenläkare, också knuten till Rättsmedicinalverket. Denna röntgenläkare gör en tredje bedömning. Mognadsstadie 1 och 5 har för nyckelben rapporterats som att de kan uppfattas som snarlika (6, 7) och därmed felbedömas vilket innebär att i praktiken riskerar dessa fall att ingen bedömning kan lämnas. Dock överlappar inte åldersspannen mellan stadie 1 och 5 i referenspopulationen beräknat för denna modell, för varken kvinnor (95% prediktionsintervall (PI) stadie 1; 10.1-16.5 och stadie 5; 22.7-31.9 år) eller män (95% PI stadie 1; 10.1- 17.6 år och stadie 5; 22.3-32.8 år), vilket möjliggör en sannolikhetsbedömning av mognadsstadiet. Då vänster och höger nyckelben bedöms vara i två olika stadier, används den mest utvecklade sidan för både män och kvinnor (2).DT ska utföras med 1mm tunna snitt i axial plan och rekonstrueras i coronal och sagittal plan och undersökningen ska utföras i skelettfönster.

Bedömning mognad hand/handled

Utveckling av hand/handled används vid bedömning av 14 respektive 15 år. Hand/handled undersöks med slätröntgen av offentlig vårdgivare som bokas enligt instruktioner från Rättsmedicinalverket efter åklagarens beslut om kroppsbesiktning. Rättsmedicinalverket utfärdar inte remisser till den offentliga vården. Bildmaterialet skickas därefter till Rättsmedicinalverket via en bärbar lagringsenhet (ex. CD, USB-minne) med rekommenderad post alternativt personlig överlämning.

Rättsmedicinalverket begär stadielindegning från undersökningen av röntgenläkare som sedan rapporteras till Rättsmedicinalverkets ärendehanteringssystem. Mognadsgraden i tillväxtzonen av hand/handled bedöms enligt Greulich & Pyles (G&P) skala (8) med hjälp av sjukhusets

automatiska verktyg för bedömning av skelettålder. Rättsmedicinalverkets modell börjar med skelettåldern 10 för bägge könen och går upp till skelettålder 19 år för män och 18 år för kvinnor, vilket är slutstadiet för respektive kön. Då skelettålder för hand/handled bedöms vara i två olika stadier, används den minst utvecklade sidan för både män och kvinnor.

Om stadiindelning inte är möjlig på grund av otillräcklig bildkvalitet anges svarsalternativet ”Ej bedömbär”. Om båda bedömbarna av röntgenbilden anges svaret ”Ej bedömbär” kan mognadsgraden av en annan skelettdel tillsammans med tandmognadsbedömbningen alternativt tandmognadsbedömbning ensamt utgöra underlag i den medicinska åldersbedömbningen.

Faktorer som kan påverka skelettmognad och tandmognad

Faktorer som socioekonomi, stress och etnicitet har föreslagits kunna påverka skelettmognad och tandmognad. Det är möjligt att socioekonomiska faktorer kan ha en påverkan på skelettmognaden, där sämre levnadsvillkor medför att skelettet mognar långsammare med följden att den kronologiska åldern underskattas (9).

En studie gör gällande att ökad stress kan innebära en tidigare pubertet för flickor och möjligen även för pojkar (10). Vilken påverkan detta har för skelettmognad respektive tandmognad i samband med åldersbedömbning är dock inte studerat i den studien (11).

Avseende tandmognad har t.ex. Thevissen et al. 2010 (12) undersökt hur populationsspecifik data från nio olika länder kan användas för att minska andelen felklassificerade vid åldersbedömbning kring 18-årsåldern när visdomstand är undersökt. I denna studie dras slutsatsen att tillgång till populationsspecifika data endast kommer innebära en försumbar minskning av andelen felklassificerade, vilket innebär att ett gemensamt tabellverk vid åldersbedömbning bör kunna användas för olika populationer. När populationer av olika etnicitet har studerats avseende mognaden av visdomständerna finns dock studier som noterat skillnader i de tidigare mognadsstadierna. Däremot har inga signifikanta skillnader noterats avseende visdomständernas fullmogna slutstadium mellan de studerade populationerna (13, 14). Vidare finns en studie som undersökt populationer av olika etnicitet, som är uppväxta med likvärdiga näringsmässiga och/eller miljömässiga förhållanden, som visar att liknande tidsmässig utveckling av alla permanenta tänder i nedre vänstra käken sker oavsett etnicitet (15).

Enligt en genomgång av litteraturen i Schmeling et al. 2000 (16), avseende hur etnicitet påverkar skelettmognad och åldersbedömbning, kan tabellverken användas oavsett den undersökte individens etniska tillhörighet. Detta eftersom etnisk tillhörighet inte på ett för bedömbningen avgörande sätt påverkar vid vilken ålder skelettet mognar. En översiktsartikel publicerad 2019 med beräkningar på metapopulationer för åldersbedömbningar från handledsröntgen samt en annan på användande av tandröntgen från 2021 varnar å andra sidan för skillnader i skelett eller tandmognad i populationer med olika etnicitet (17, 18). Det kan dock noteras att skillnader mellan populationer som tillskrivs etnicitet kan vara en konsekvens

av åldersdistributionen i den ingående studiepopulationen, vilket visas i två systematiska översiktsartiklar av Dahlberg et al och Rolseth et al (19, 20).

Det är viktigt att understryka att en betydande variation finns mellan olika studier och mer forskning tillsammans med noggrann analys behövs för att bättre undersöka det komplexa förhållandet mellan skelettmognad, tandmognad och faktorer som etnicitet, socioekonomi och stress. Kunskapsläget avseende hur dessa faktorer påverkar mognadsprocessen bedöms ändå vara tillräckligt för att åldersbedömning utifrån skelett- och tandmognad kan användas som en del av en samlad bedömning. Det ska även nämnas att den normalt förekommande spridningen i tand och skelettmognad inom de studerade populationerna sannolikt inkluderar de ovan nämnda påverkansfaktorerna i viss utsträckning.

En stor referenspopulation som baseras på så stor variation som möjligt för att representera den biologiska variationen kan antas mer lämplig att användas till individer med olika bakgrund än en mer begränsad liten population (21). Studiepopulationerna som modellen är baserad på är undersökta i 26 länder fördelade på sex olika kontinenter (Tabell 1).

Sannolikhetsmodell för medicinsk åldersbedömning

Sannolikhetsmodellen för att uppskatta sannolik ålder baserat på utvecklingsstadier har utvecklats utifrån resultat från vetenskapliga studier (22). Analysen bygger på det som kallas för övergångsanalys där man anpassar en modell till studiedata.

All data som används i modellen utgörs av observerade data från individer i studierna men studierna har grupperat data på olika sätt vilket betyder att data för enskilda individer inte alltid är presenterade. I de fall då studierna inte rapporterar data på individnivå så används information från studien för att simulera möjliga åldrar på individerna. Simuleringen upprepas ett stort antal gånger (10 000) och genererar på så sätt ett stort antal möjliga ålderssammansättningar. Utifrån alla ålderssammansättningar skapas en statistisk modell som beskriver förhållandet mellan mognadsstadier och ålder. Modellen inkluderar ålderspercentiler och andel under respektive över åldersgränserna 14, 15, 18 och 21 år för olika kombinationer av en skelettmognad med tandmognad eller separat och för respektive kön. Även andelar uppdelat på ettårs-kohorter beräknas för respektive population.

Studieurval

De vetenskapliga studier som undersöker mognad av hand, tand, knä eller nyckelben relaterat till ålder identifierades, kategoriserades och bedömdes utifrån kriterier som var uppsatta i förväg (22, 23). Studier som undersökte en avliden population, hade en ojämn åldersfördelning (Chi-square test av typ 3 data), ofullständiga data eller där datat publicerats tidigare exkluderades. Studierna som slutligen ingår i den statistiska modellen överensstämmer med vald metod för respektive skelett- eller tandundersökning och presenterar resultaten på ett sätt som gör det möjligt att utvinna data till modellen, Tabell 1. Övriga dataset (typ 1 data) som använts till validering av modellen ingår också i den slutliga modellen.

Typ av data

Det finns fem typer av studiedata som presenteras i studierna och som kan användas i modellen. Typ 1a är tabulerad individ-baserade data där kronologisk ålder och motsvarande stadie redovisas för varje individ kan användas direkt i modellen utan simulering. Typ 1 b är också Individbaserade data men som extraheras från plottar där kronologisk ålder och stadie är redovisade för alla i studiepopulationen med verktyget WebPlotDigitizer v 4.6. (27).

För typ 2 data så är resultatet redovisat som antalet personer som har uppnått ett visst mognadstadie, inom varje ettårs-intervall av kronologisk ålder. Individbaserade data för typ 2 simulerades genom att med jämn fördelning slumpa fram lika många åldrar inom varje åldersintervall som antalet individer som tilldelats motsvarande stadie. Finns minimum-och maximumvärdet i studien för varje stadie tas detta i hänsyn till i den jämna åldersfördelningen. För typ 3 data grupperas studiepopulationen efter observerat stadie på mognadsindikatorn. Åldersfördelningen för varje stadie är redovisat som medelvärde/standardavvikelse och/eller percentiler för kronologisk ålder. Denna typ av redovisade värden är extra känsliga för så kallad åldersmimikering. Individbaserade data för typ 3 simulerades genom att anpassa en trunkerad normalfördelning till motsvarande medelvärde och standardavvikelser eller kvantiler för varje stadie. Fanns bägge parametrarna redovisade, användes kvantilerna framför medelvärdet och standardavvikelsen. En trunkerad normalfördelning tillämpades då alla stadier var angivna inom vissa åldersintervall för varje stadie, den trunkerade normalfördelningen såg till att åldrarna slumpades inom detta givna intervall. För att minimera åldersmimikering uteslöts studiedata om åldersfördelningen av hela studiepopulationen inte var jämnt fördelad, detta kontrollerades med ett endimensionellt Chi-square test som jämför om individer i varje helårsintervall inte överensstämmer med en jämn fördelning. Studier där resultatet var signifikant (signifikansgrad $\alpha = 0.05$) exkluderades. Ett undantag är en knästudie från Ekizoglu et al 2021 (28) som uppvisar en signifikans och därmed en åldersfördelning som riskerar åldersmimikering. Men då dikotom skala används för utveckling av knä så bedöms fördelningen i studien inte tillföra någon nämnvärd inverkan på åldersmimikering. Efter en varians-bias analys som bekräftade att inklusion eller exklusion av studien inte påverkade sannolikheten ansågs det rimligt att inkludera studien.

För typ 4 data grupperas studiepopulationen i helårsintervall och redovisas med medelvärde och standardavvikelse på både kronologisk ålder och skelettålder samt korrelationen mellan dessa två variabler. Individbaserade data för typ 4 simulerades genom att slumpa fram åldrar från en korrelerad bivariat normalfördelning som anpassats utifrån de givna parametrarna för bägge grupperna.

Tabell 1: Inkluderade studier i sannolikhetsmodellen för medicinska åldersbedömningar. MR =Magnetkamera, RR = Radiologisk röntgen, DT= Datortomografi. ^ dataset som använts till validering av modellerna och därefter inkluderats endast data för kvinnor användes då åldersfördelning inte var jämnt fördelat för män. ~Vissa stadier exkluderades då dessa inte uppfyllde normalfördelningsantagandet enligt forskningsartikeln. ** Observationer med MR T1 TSE-sekvens (bryggningssstudie) inkluderades.*

Indikator	Studie	Män, antal	Kvinnor, antal	Land	Åldersspann (män)	Åldersspann (kvinnor)	Metod	Datotyp
Hand	Alcina 2018 (29)	590	560	Spanien	0-19	0-18	RG	Typ 1b
Hand	Bala 2010 (30)	80	80	Indien	8-14	8-14	RG	Typ 4
Hand	Büken 2007 (31)	251	241	Turkiet	11-20	11-19	RG	Typ 4
Hand	Cantekin 2012 (32)	342	425	Turkiet	7-18	7-18	RG	Typ 1b
Hand*~	Chaumoitre 2017 (33)	1423	1191	Frankrike	1-21	1-20	RG	Typ 3
Hand	Dembetembe 2012 (34)	131	-	Sydafrika	13-22	13-22	RG	Typ 1b
Hand	Elamin 2017 (35)	487	627	Sudan	1-28	2-37	RG	Typ 4
Hand	Hackman 2013 (36)	249	157	Skottland	1-20	1-20	RG	Typ 1b
Hand	Koc 2001 (37)	225	-	Turkiet	7-17	-	RG	Typ 4
Hand^	Maggio 2018 (38)	205	205	Australien	0-25	0-25	RG	Typ 1a
Hand	Mora 2001 (39)	265	269	USA	0-19	0-19	RG	Typ 4
Hand	Paxton 2013 (40)	276	130	Australien	1-18	1-18	RG	Typ 1b
Hand^	Saade 2017 (41)	125	136	Libanon	8-16	8-15	RG	Typ 1a
Hand	Soudack 2012 (42)	375	304	Israel	1-18	1-18	RG	Typ 1b
Hand*	Tisé 2011 (43)	359	125	Italien	11-19	11-19	RG	Typ 3
Hand	van Rijn 2001 (44)	278	294	Nederländerna	5-20	5-20	RG	Typ 1b
Hand	Zabet 2015 (45)	100	90	Frankrike	10-18	10-19	RG	Typ 1b
Hand^	Zafar 2010 (46)	535	354	Pakistan	0-18	0-18	RG	Typ 1a
Knä	Ekizoglu 2021 (28)	335	314	Turkiet	12-30	12-30	MR	Typ 3
Knä	Krämer 2014 (3)	166	124	Tyskland	10-31	10-31	MR	Typ 3
Knä	Ottow 2017 (47)	326	335	Tyskland	12-25	12-26	MR	Typ 3
Knä	Saint-Martin 2014 (48)	214	-	Frankrike	14-20	-	MR	Typ 2
Knä^***	Socialstyrelsen 2018 (49)	215	180	Sverige	14-22	14-22	MR	Typ 1a
Nyckelben*	Ekizoglu 2015 (50)	362	141	Turkiet	10-35	10-35	DT	Typ 3
Nyckelben	Franklin 2015 (51)	185	148	Australien	10-35	10-35	DT	Typ 2
Nyckelben^	Heldring 2025 (2)	199	201	Sverige	17-25	17-25	DT	Typ 1a
Nyckelben	Madentzoglou 2025 (52)	109	87	Grekland	10-40	10-40	DT	Typ 2
Nyckelben*	Pattamapaspong 2015 (53)	249	160	Thailand	11-29	11-29	DT	Typ 3
Nyckelben	Uysal 2017 (54)	399	202	Turkiet	10-35	10-35	DT	Typ 2
Nyckelben	Vamberszky 2024 (55)	203	-	Tyskland	18-25	-	DT	Typ 2
Nyckelben^	Wesp 2024 (56)	28	22	Tyskland	15-29	15-29	DT	Typ 1a
Nyckelben	Zhang 2015 (57)	370	382	Kina	15-25	15-25	DT	Typ 3
Tand	Duangto 2017 (58)	877	990	Thailand	8-23	8-23	RG	Typ 2
Tand	Hassan 2021 (59)	170	180	Egypten	14-24	14-24	RG	Typ 3
Tand	Hegde 2016 (60)	664	475	Indien	5-16	5-16	RG	Typ 2
Tand	Johan 2012 (61)	540	540	Malaysia	14-25	14-25	RG	Typ 2
Tand	Kasper 2009 (62)	804	1019	USA (Latinamerika)	12-22	12-22	RG	Typ 2
Tand^	Jayaraman 2022 (63)	189	186	USA (Latinamerika)	8-17	7-17	RG	Typ 1a
Tand^	Knell 2009 (64)	591	669	Switzerland	15-22	15-22	RG	Typ 1a
Tand	Lee 2009 (65)	786	964	Sydkorea	7-22	7-24	RG	Typ 2
Tand	Li 2012 (66)	989	1089	Kina	5-23	5-23	RG	Typ 2
Tand	Liu 2018 (67)	1012	1196	Kina	8-23	8-23	RG	Typ 2
Tand	Lopez 2013 (68)	236	315	Brasilien	15-23	15-23	RG	Typ 3
Tand^	Malta	556	651	Malta	8-26	7-25	RG	Typ 1a
Tand^	Saade 2017 (41)	113	119	Libanon	8-16	8-15	RG	Typ 1a
Tand	Quispe 2017 (69)	102	106	Peru	14-22	14-22	RG	Typ 3

Modellval

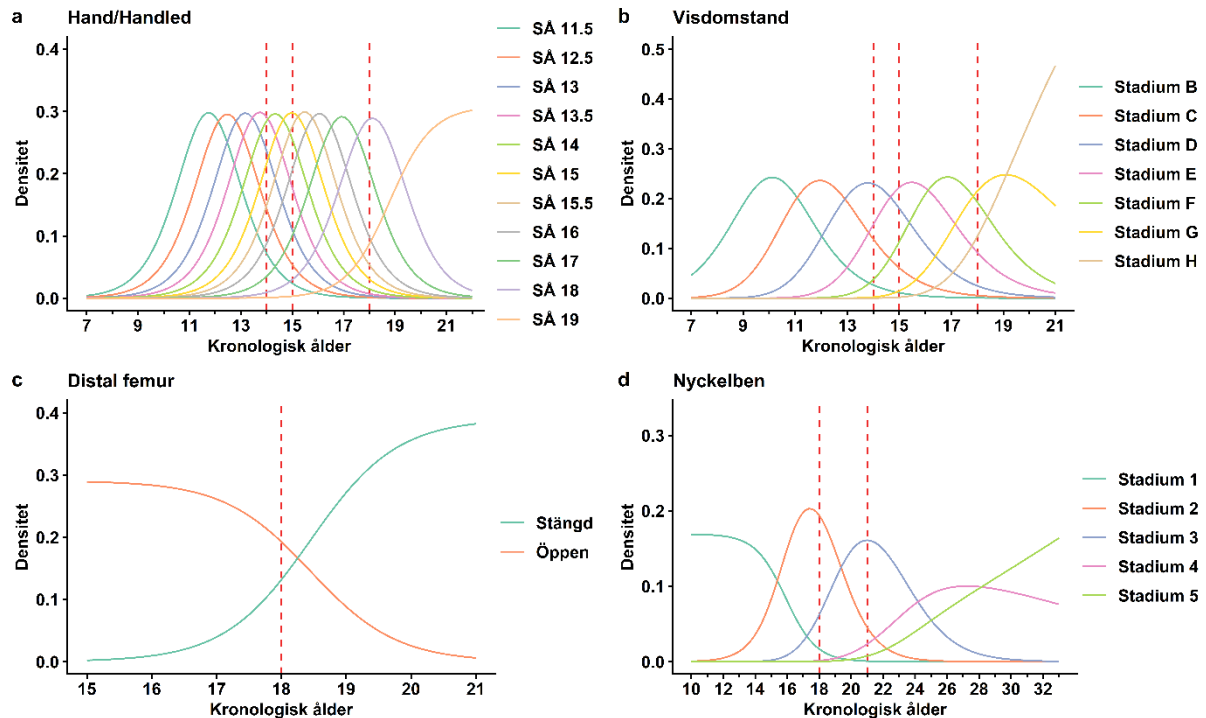
Vid en åldersbedömning efterfrågas åldern på en person baserat på utvecklingsstadium av undersökta kroppsdelar, dvs. ålder givet stadie. När man skapar en statistisk modell utifrån ålder givet stadie är dock inverkan från eventuell åldersmimikering i studierna stor. Däremot kan man skapa modellen genom att först skapa en regressionsmodell utifrån logisktisk/ordinal regression som beskriver stadie givet ålder och sedan med hjälp av Bayes teorem vända betingningen för att erhålla ålder givet stadie.

Första steget är alltså att göra en modell av stadie givet ålder, genom att anpassa en regressionsmodell med kronologisk ålder som oberoende variabel och observerat stadie som beroende variabel. Detta utförs för varje utvecklingsstadium av varje mognadsindikator och kön. För denna modell anpassades ordinala regressionsmodeller för att se vilken som hade bäst anpassning till populationerna för varje kön/indikator.

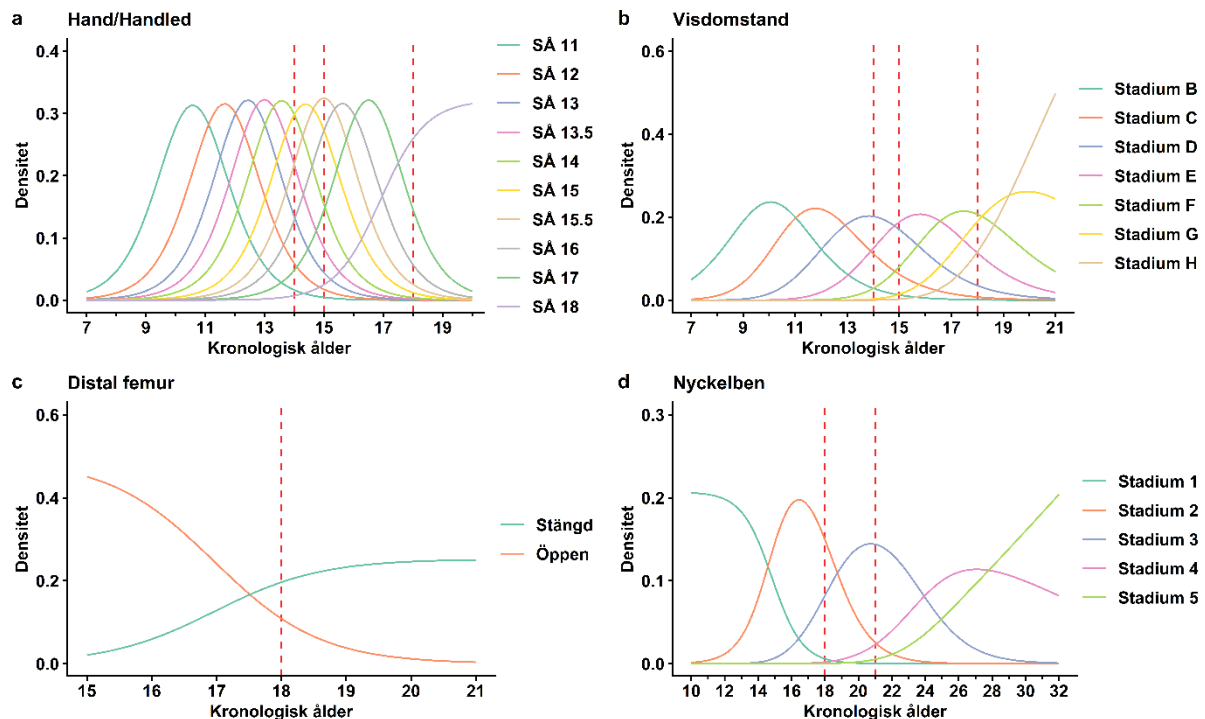
Totalt prövades åtta olika modeller för varje kön/indikator, med olika kombinationer av modelltyp, länkfunktion och parallell eller icke parallell lutningskoefficient i regressionsmodellen (22).

För andra steget i modellen där betingningen vänds för att erhålla ålder givet stadie används Bayes teorem. Man väljer då en åldersfördelning (prior) och ett åldersspann som motsvarar fördelningen i populationen. Då en misstänkt eller målsägande inte ingår i en konstant population så finns ingen åldersfördelning att använda sig av. Valet är då att använda en jämn fördelning vilket innebär att ingen matematisk viktning sker när den bayesianska transformationen av betingningen utförs. Resultatet bestäms därmed av regressionsmodellen för studiepopulationen. Ålder givet stadie beräknas för de olika kombinationerna av mognadsindikatorer och kön. Åldersdistributionen för respektive indikator och utvecklingsstadie visas för män (Figur 1.) samt för kvinnor (Figur 2.).

Figur 1: Åldersfördelning för hand/handled-, tand-, knä- respektive nyckelben-stadier för manliga individer i form av densitet för utvecklingsstadium (a) hand/handled skelettålder 11.5-19 (Greulich & Pyle), (b) tand stadium B-H (Demirjian), (c) knä uppnått slutstadium eller ej (Krämer), (d) Nyckelben stadium 1-5 (Schmeling). Röd streckad linje representerar åldersgränser av intresse.

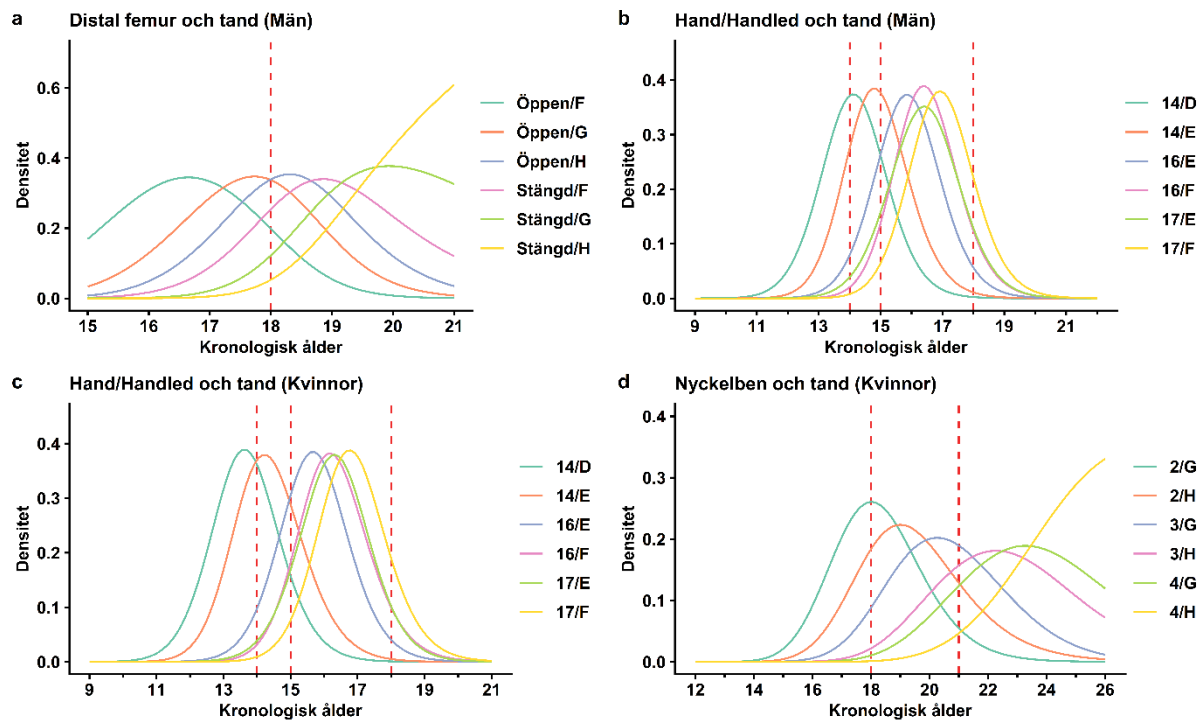


Figur 2: Åldersfördelning för hand/handled-, tand-, knä- respektive nyckelben-stadier för kvinnliga individer i form av densitet för utvecklingsstadium (a) hand/handled skelettålder 11-18 (Greulich & Pyle), (b) tand stadium B-H (Demirjian), (c) knä uppnått slutstadium eller ej (Krämer), (d) Nyckelben stadium 1-5 (Schmeling). Röd streckad linje representerar åldersgränser av intresse.



När utveckling av mognadsindikatorer sker oberoende av varandra, kan sannolik ålder för en kombination av indikatorers stadier beräknas genom att multiplicera sannolikheterna för att ha uppnått de individuella stadierna. Tidigare studier som undersökt korrelationen mellan en skelettindikator och tand har inte kunnat påvisa någon signifikant korrelation (70-73). I sannolikhetsmodellen för brottsmål kombineras resultatet från upp till två mognadsindikatorer där den ena är tand och den andra en skelettundersökning (Figur 3), men inte två skelettindikatorer då dessa förväntas korrelera.

Figur 3: Åldersfördelning för utvalda kombinationer med avseende på densitet av utvecklingsstadier för distal femur i kombination med visdomstand (män) (a), hand/handled i kombination med visdomstand (män) (b), hand/handled i kombination med visdomstand (kvinnor) (c) och nyckelben i kombination med visdomstand (kvinnor) (d). Röd streckad linje representerar åldersgränser av intresse.



Då sannolikheter av ålder givet stadie beräknas väljs även ett åldersspann. Valen av spann är baserade på de förutsättningar som finns utifrån studiepopulationen och som är olika för varje indikator samt kombination. En sensitivitetsanalys utfördes för att visa effekten av att välja andra åldersspann, visas i Appendix (Tabell A.1-A.3) för enskilda indikatorer (hand/handled, tand, nyckelben) eller i kombination.

För knä används åldersintervallet 15.0 - 21.0 i beräkningarna för både män och kvinnor. Valet av detta intervall är baserat på att lika många år på varje sida av 18 år ger lika mycket matematisk viktning i beräkningarna då skalan är dikotom. Att undersökning av knä utläses dikotomt medför begränsningar vid valet av åldersspann för den jämna åldersfördelningen för beräkningar i kombination med tand. Då knä kombineras med tand så väljs samma intervall som för enbart knä (15.0–21.0) men då är endast stadie D eller högre inkluderat för tand. Dessa beräkningar är baserade på att kombinationen används för bedömning av 18-årsgränsen och därmed är vissa tidiga tandstadier inte relevanta.

För hand/handled är intervallet olika för kvinnor och män baserat på när näst sista stadiets fördelning slutar (74). Intervallet är 7.0 - 22.0 för män som har skelettålder 19 som slutstadium i G&P. För kvinnor är intervallet för beräkningar 7.0 - 20.0 år där skelettålder 18 år är slutstadium i G&P. I kombination med tand används intervallet 7.0 - 22.0 för män och 7.0-21.0 för kvinnor. Vid 21.0 ålder har cirka 50% av den observerade populationen uppnått slutstadiet i tandmognad för båda könen vilket har föreslagits i tidigare studier att användas som övre gräns för att undgå problemet med att sista stadiet inte har ett slut (75).

För nyckelben används åldersspannet 10.0 - 33.0 år i beräkningarna för män och 10.0-32.0 år för kvinnor. Orsaken till det breda åldersintervallet är att utvecklingen av nyckelben är baserat på att sista stadiet inte uppnås förrän vid ca 25-års ålder. Den undre gränsen är baserad på att studiepopulationerna börjar från 10-års ålder för nyckelbensstudierna. I kombination med tand används intervallet 10.0 - 26.0 år, då tillgängliga tanddata slutar vid 26-års ålder.

Osäkerheter med den valda modellen och riskminimering

Utgångspunkten för medicinsk åldersbedömning är en individ med okänd kronologisk ålder. På grund av individuella variationer i biologiska mognadsprocesser är det inte möjligt att översätta biologisk mognad till en exakt kronologisk ålder. Rättsmedicinalverkets sannolikhetsmodell för medicinska åldersbedömningar utgår från vetenskapliga studier där biologisk mognad utifrån definierade utvecklingsstadier har studerats i relation till kronologisk ålder. Bedömningen av vilket utvecklingsstadium som uppnåtts har en avgörande roll i den medicinska åldersbedömningen och utgör därför en risk för fel som är angelägen att minimera. Detta görs genom att utföra kalibrering av bedömningarna samt använda sig av kvalificerade bedömare med vana att göra stadielinndelning av visdomständer respektive hand/handled, nyckelben och knä.

Statistiska modeller kräver att vissa antaganden tillämpas och dessa antaganden introducerar också osäkerheter som behöver beaktas.

Osäkerheter i sannolikhetsmodellen

För den statistiska sannolikhetsmodellen används framförallt tre viktiga antaganden, där den ena är att mognaden på skelettdelen som undersöks och tandens mognad sker oberoende av varandra. Detta antagande anses rimligt när det gäller utveckling av tand och en skelettdel baserat på tidigare studier (70-73) men kan däremot inte antas när det gäller två skelettdelar.

Det andra antagandet som tillämpas för att skapa sannolikhetsmodellen är att använda en jämn åldersfördelning och det tredje är att välja ett relevant förbestämt åldersintervall för den jämna åldersfördelningen vid beräkningarna för respektive åldersgräns. Generellt så gäller att välja ett intervall så att modellen täcker första till näst sista stadiets fördelning vid beräkningarna utan att bygga in att underåriga felaktigt bedöms som vuxna genom att välja en för hög övre gräns.

En osäkerhet som introduceras i modellen är att populationen varierar beroende på de simuleringar som utförs vid återskapandet. För att täcka en tillräckligt stor del av den möjliga fördelningen, simuleras varje enskild population 10 000 gånger. Det uppkommer då en fördelning av dessa 10 000 värden som sannolikheten sedan bestäms utifrån. Tre statistiska resultat beräknas: ett 95% prediktivt åldersspann, sannolikheten för att vara under 14/15/18/21 år samt 1-års kohorter (dvs sannolikheten att t.ex. vara mellan 17.0-18.0 år baserat på referenspopulationen). Beräkningen av ett konfidensintervall inkluderar 2.5:e och 97.5:e percentilen av 10 000 populationer för att ge en uppfattning för bedömarens hur stor variationen i resultatet kan vara. Det är dock medianvärdet i beräkningen som används som det slutgiltiga måttet på sannolikheten.

En begränsning för tandstudier i den statistiska sannolikhetsmodellen är att observationerna är begränsade till yngre åldrar och saknar därmed observationer för slutstadiet för äldre deltagare. Detta medför ett statistiskt problem eftersom studiedatat då är trunkerat vid en viss åldersgräns och därmed medför att modellen ”gissar på bästa sätt” med hjälp av tidigare observationer när populationen övergår från stadie G till H för tand i senare åldrar. Detta i sig medför en bias till regressionsmodellen där stadie G får ett kortare åldersintervall (slutpunkten av intervallet blir kortare) än vad det i en observerad verklighet troligen är och därmed överestimeras sannolikheten för att vara under en viss ålder för gruppen G. En ytterligare konsekvens är att den verkliga fördelningen för slutstadiet inte är känd och det möjligen gör att sannolikheterna att vara under en viss åldersgräns riskerar att vara lägre. Dessa osäkerheter kan endast åtgärdas med tillgång till verkliga observationer i studier som inkluderar äldre undersökningspersoner och inte trunkerar vid 23-26 år.

Validering av modellen

Validering av modellen utfördes med syfte att få ett objektiva mått på den teoretiska modellens prestanda.

Validering av modellen vid känd ålder

För att bedöma hur väl modellen presterar på oberoende data så har ett antal dataset för populationer med känd ålder samlats in och använts till validering. Dessa värdefulla dataset har tacksamt tillhandahållits av författare och forskare som vi har kontaktat och dataseten representerar oftast populationer från publicerade studier (Tabell 1). Varje kroppsdel validerades var för sig förutom i en kombination av tand och hand/handled där undersökning och utvecklingsstadium bedömts i samma individ i ett av dataseten. Precisionen ökar när tand kombineras med en skelettdel vilket motsvarar hur modellen används i praktiken. Detta innebär att valideringen till stor del underskattar precisionen när den används i praktiken.

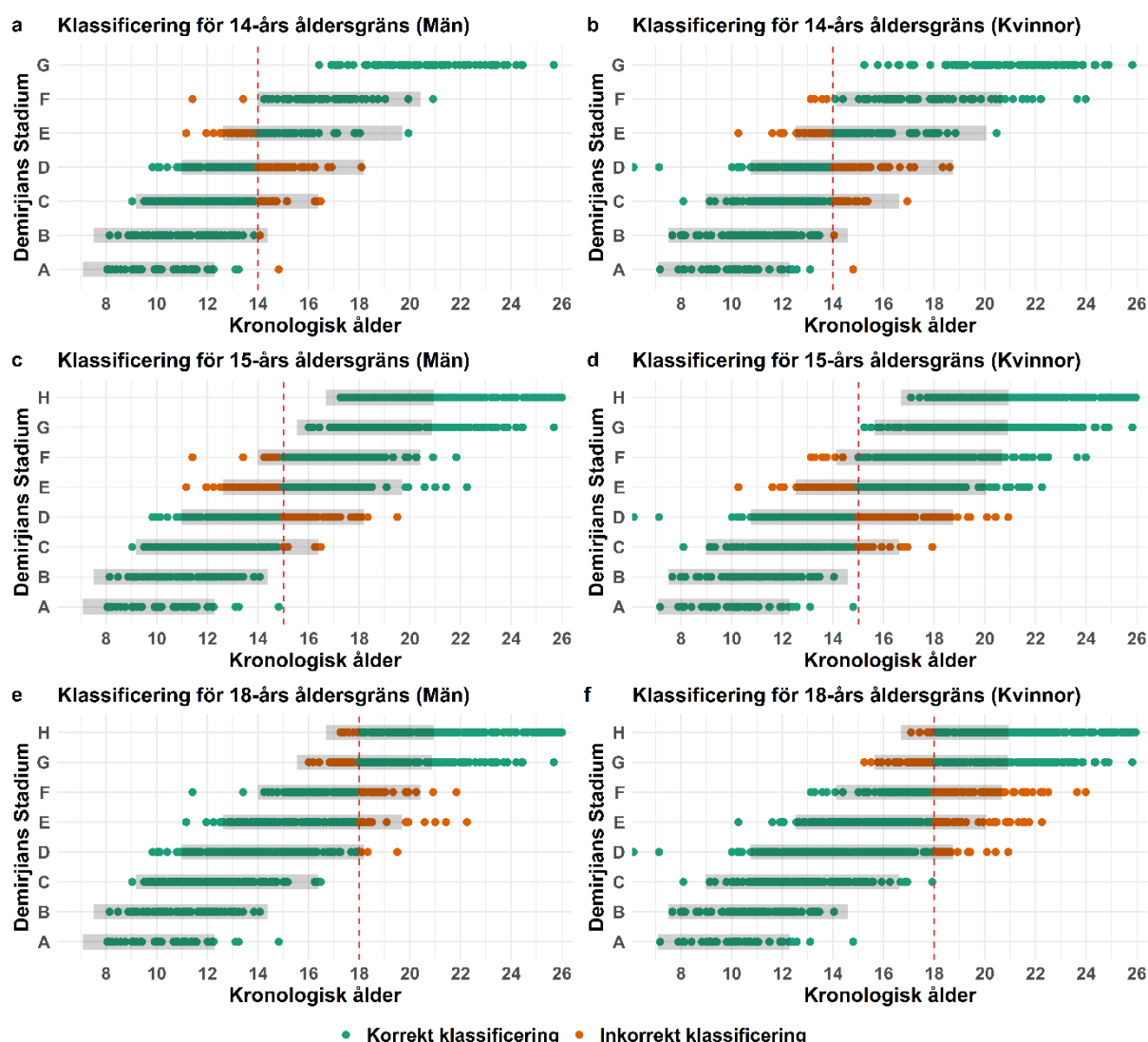
För att beräkna den minimala storleken på populationen som behövs för att uppnå en tillförlitlig uppskattning av prediktiv prestanda ($n=195$) så användes en föreslagen formel för validering av prediktionsmodeller med binärt utfall (76, 77), R-kod: [pmsampsize: Sample Size for Development of a Prediction Model \(r-project.org\)](#).

Vid valideringen så sattes ett gränsvärde för sannolikheten vid 35% (22). Detta innebär att om sannolikheten att vara under en åldersgräns är mellan 35- 65% så bedöms individen vara över den undersökta åldersgränsen. Detta gränsvärde medför att de uppmätta felklassificeringarna av individer i valideringen ökar jämfört med i verkligheten. I praktiken behöver skalsteget i utlåtandet spegla osäkerheten i bedömningen samt redovisa felmarginalen.

Totalt 2984 individer, i princip jämt fördelade mellan män ($n=1406$) och kvinnor ($n=1578$), med en känd ålder mellan 7.0-27.0 år testades att åldersbedömas utifrån visdomstandens utvecklingsstadium med den statistiska modellen. Då åldern är känd klassificerades varje individ utifrån om de blir korrekt eller inkorrekt bedömda som över eller under 14, 15 eller 18 år (Figur 4). Populationen för validering av 14 år anpassades genom att exkludera stadie H, och totalt användes 1632 individer varav 863 kvinnor och 769 män. Av de individer som är under 14 år blir ca 94% av männen och 93% av kvinnor korrekt klassificerade, och andelen korrekt klassificerade som är över 14 år är något lägre, ca 74% av männen och 72% av kvinnorna. För både män och kvinnor som är under 15 år blir ca 89 % korrekt bedömda som

under 15 år och liknande andel korrekt bedömda som över 15 år, män (90 %) och kvinnor (86 %) (A.Tabell 4 a). För klassificering av under 18 år blir ca 95 % av både män och kvinnor korrekt klassificerade. Däremot så blir en lägre andel kvinnor korrekt klassificerade som över 18 (75 %) där motsvarande siffra för män är 90 %. Detta indikerar att enbart tandutveckling har lägre precision för att identifiera kvinnor som är över 18 år jämfört med män eller för 15 årsgränsen (både män och kvinnor).

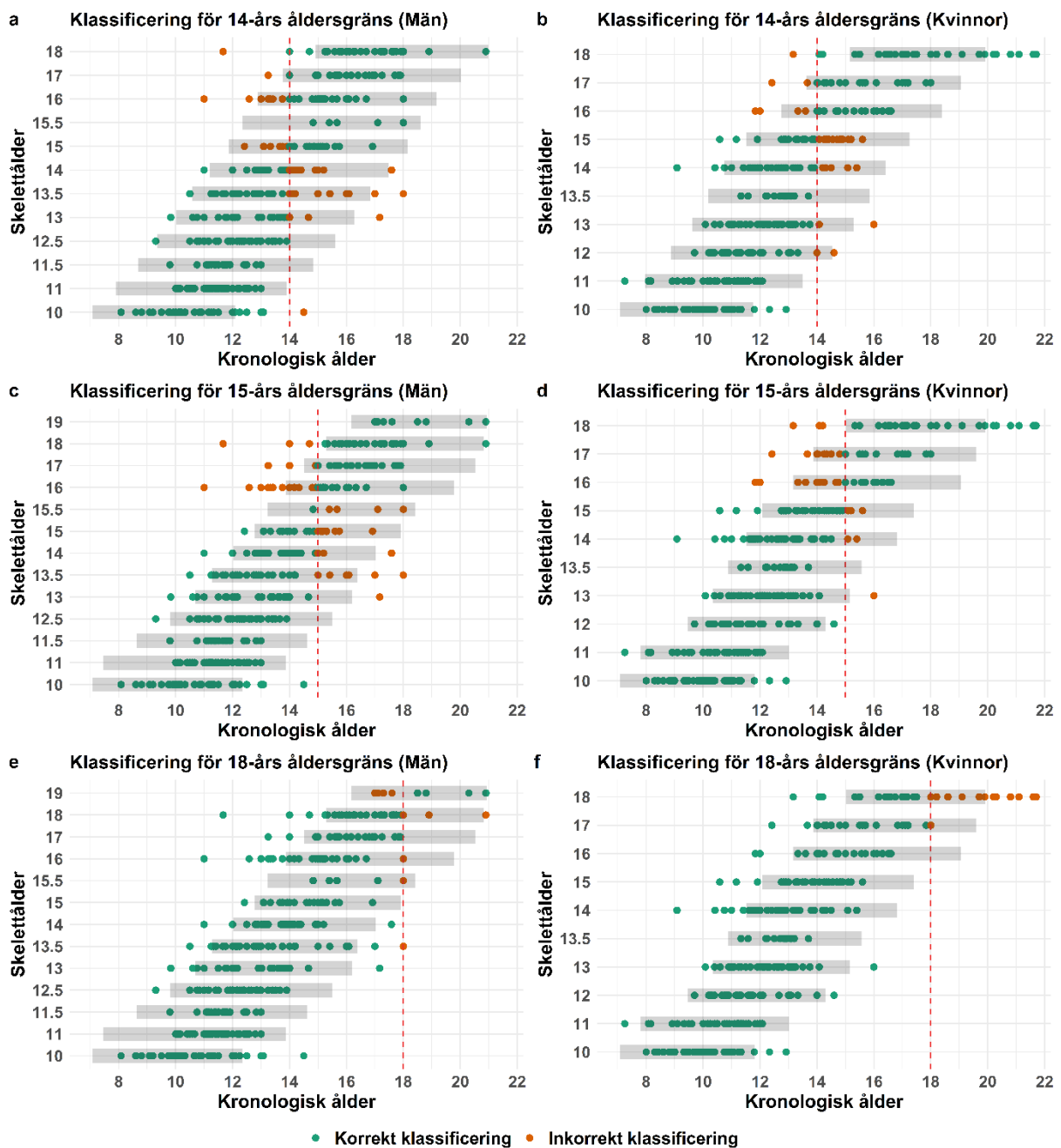
Figur 4: Validering av modellen för visdomstand. Punktdiagram som visar den kronologiska åldern och motsvarande Demirjian-utvecklingsstadium för visdomstand tillsammans med klassificering i förhållande till 14-, 15- eller 18-årsgränsen för män (a, c, e och kvinnor (b, d, f. De grå staplarna i (a-f) representerar 95 % PI för varje utvecklingsstadium.



På liknande sätt validerades hand/handled i modellen utifrån bedömd skelettålder, totalt 687 individer (män, n=386) och kvinnor, n=301) med känd ålder fördelat mellan 7.0-25.0 år. Korrekt eller inkorrekt bedömda som över eller under 14, 15 eller 18 år visas i Figur 5. Populationen för validering av 14 år anpassades genom att exkludera skelettålder 19 för män, och totalt användes 675 individer varav 301 kvinnor och 374 män. För de individer som är

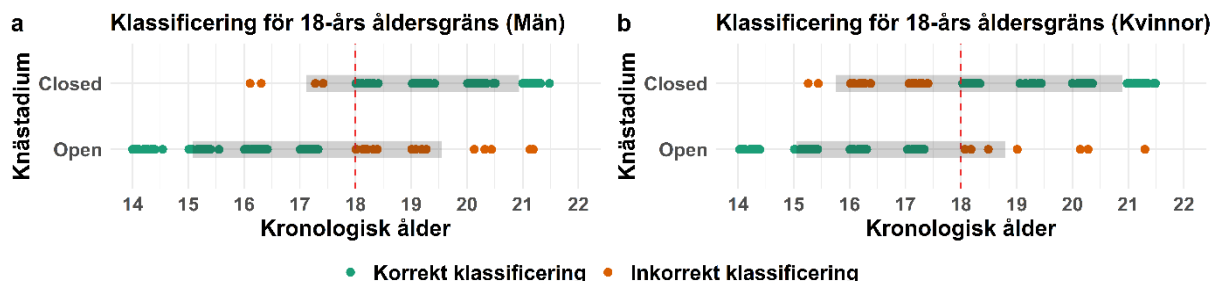
under 14 år blir ca 92% av män och 97% av kvinnor korrekt klassificerade, och andelen korrekt klassificerade som är över 14 år är ca 80% och 74% för män respektive kvinnor. Av de individer som är under 15 år klassificerades 92 % av männen och 91 % av kvinnorna rätt (A. Tabell 4 b). Av den andel män som är över 15 år blev ca 81 % korrekt klassificerade och för motsvarande andel kvinnor blev 89 % korrekt klassificerade. För 18-årsgränsen blev 99 % av männen som är under 18 år rätt klassificerade och 100 % av kvinnorna. Däremot blev endast 33 % av männen som är över 18 år korrekt klassificerade men ingen av kvinnorna, dvs 100% av de kvinnor som är över 18 år klassificerades som under 18. Valideringen visar att enbart hand/handled har en hög precision för 14 och 15-årsgränsen och för under 18 år men har lägre precision för individer, både män och kvinnor, som är över 18 år.

Figur 5: Validering av modellen för hand/handled. Punktdiagram som visar den kronologiska åldern och motsvarande G&P-utvecklingsstadium för hand/handled tillsammans med klassificering i förhållande till 14-, 15- eller 18-årsgränsen för män (a, c, e, och kvinnor (b, d, f). De grå staplarna i (a-f) representerar 95 % PI för varje utvecklingsstadium.



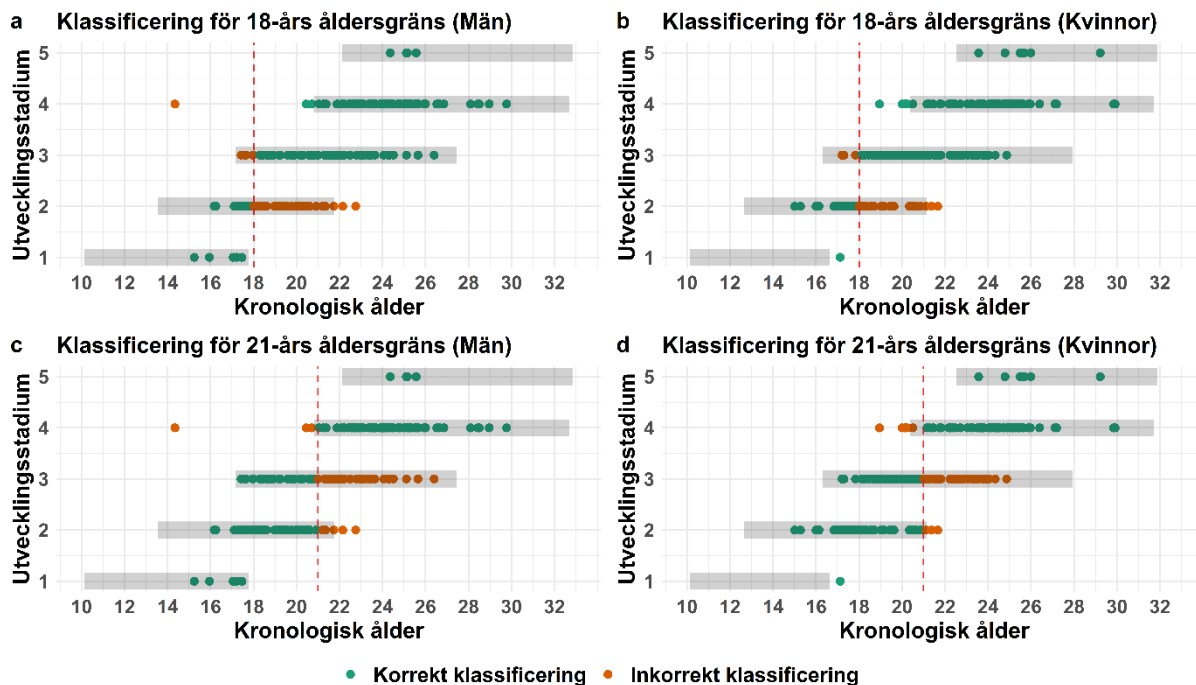
Validering av modellen för distal femur utfördes med totalt 434 individer, (män, n=217) och kvinnor, n=217) med känd ålder fördelat mellan 12-23 år. Korrekt eller inkorrekt bedömda som över eller under 15 eller 18 år visas i Figur 6. Av de individer som är under 18 år klassificerades 96 % av männen och 78 % av kvinnorna rätt (A. Tabell 4 c). Av den andel män som är över 18 år blev ca 82 % korrekt klassificerade och för motsvarande andel kvinnor blev 91 % korrekt klassificerade.

Figur 6: Validering av modellen för distal femur. Punktdiagram som visar den kronologiska åldern och motsvarande utvecklingsstadium (sluten/icke sluten) för distal femur tillsammans med klassificering i förhållande till 18-årsgränsen för män (a) och kvinnor (b). De grå staplarna i (a-b) representerar 95 % PI för varje utvecklingsstadium.



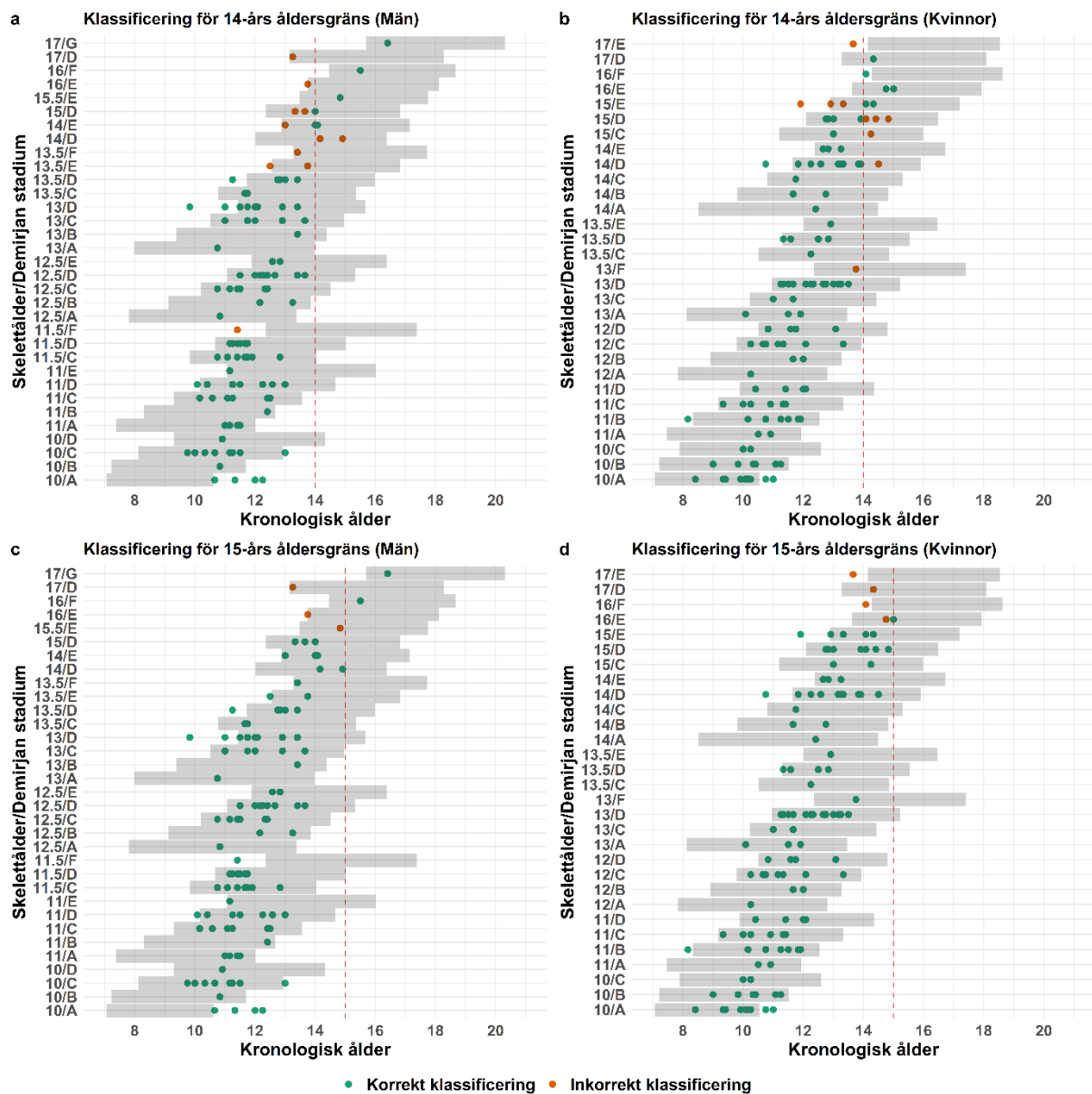
Validering av modellen för nyckelben utfördes med totalt 450 individer, (män, n=227) och kvinnor, n=223) med känd ålder fördelat mellan 14-30 år. Korrekt eller inkorrekt bedömda som över eller under 18 eller 21 år visas i Figur 7. Av de individer som är under 18 år klassificerades 82 % av både männen och kvinnorna rätt (A. Tabell 4 d). Av den andel män som är över 18 år blev ca 76 % korrekt klassificerade och för motsvarande andel kvinnor blev 86 % korrekt klassificerade. För 21-årsgränsen blev 96 % av männen som är under 21 år rätt klassificerade och 95 % av kvinnorna. Däremot blev endast 59 % av männen som är över 21 år korrekt klassificerade och 64% av de kvinnor som är över 21 år klassificerades som över 21. Valideringen visar att nyckelben har en hög precision för under 21-årsgränsen men har lägre precision för individer, både män och kvinnor, som är över 21 år (2, 22).

Figur 7: Validering av modellen för nyckelben. Punktdiagram som visar den kronologiska åldern och motsvarande Schmelting-utvecklingsstadium för nyckelben tillsammans med klassificering i förhållande till 18- och 21-årsgränsen för män (a) och (c) samt för kvinnor (b) och (d). De grå staplarna i (a-d) representerar 95 % PI för varje utvecklingsstadium.



För validering av kombinationen utvecklingsstadium tand och hand/handled användes en population med känd ålder bestående av 106 män respektive 116 kvinnor fördelat mellan 9-16 år där den större andelen är under 15 år (Figur 8). För individer som är under 14 år klassificerades ca 91 % av männen samt 95 % av kvinnorna korrekt. För de individer som är över 14 år klassificerades 75 % av männen och 58 % av kvinnorna korrekt. För individer som är under 15 år klassificerades 96 % av både kvinnor och män korrekt och av de få individer som var över 15 år så klassificerades 100 % korrekt (A. Tabell 4 e, Figur 8).

Figur 8: Validering av modellen för hand/handled i kombination med visdomstand. Punktdiagram som visar den kronologiska åldern och motsvarande G&P/Demirjian-utvecklingsstadium för hand/handled och visdomstand tillsammans med klassificering i förhållande till 14 respektive 15-årsgränsen för män (a, c) och kvinnor (b, d). De grå staplarna i (a-d) representerar 95 % PI för varje utvecklingsstadium.



Sannolikhetskalan vid medicinska åldersbedömningar

Sannolikhetsstegen motsvarar de skalsteg i rättsintyg och andra yttranden som Rättsmedicinalverket regelmässigt tillämpar. Bedömningen utgår från undersökningsresultatet och är baserat på sannolikhetsmodellen utvecklad från referenspopulationer. Vid medicinska ålderbedömningar uttrycks skalsteget, som väljs baserat på andelen i en referenspopulation som befinner sig över eller under den efterfrågade åldern. Detta uttrycks tillsammans med andelen för alternativet i referenspopulationen, som ett mått på felmarginal. För medicinska åldersbedömningar används ett så kallat två-läkare förfarande där en rättsläkare gör bedömningen och en annan rättsläkare utför en granskning av bedömningen.

Sannolikhetsskalan

Visar att

Det finns inte några tveksamheter i den bedömningen av sannolikhet att befinna sig över respektive under en efterfrågad ålder som Rättsmedicinalverket avgivit i utlåtandet. Sannolikheten för alternativet bedöms vara uteslutet. Detta skalsteg uppnås inte vid medicinska åldersbedömningar.

Talar starkt för

Bedömningen om sannolikheten att vara under eller över en efterfrågad ålder avges med mycket hög grad av säkerhet. Sannolikheten för alternativet bedöms som mycket liten.

Talar för

Bedömningen om sannolikheten att vara under eller över en efterfrågad ålder avges med hög grad av säkerhet. Sannolikheten för alternativet bedöms som liten.

Talar möjligen för

Bedömningen om sannolikheten att vara under eller över en efterfrågad ålder avges med en lägre grad av säkerhet. Sannolikheten för alternativet är möjligt, men mindre sannolikt.

Tillåter ingen bedömning

Resultatet av utförd undersökning tillåter ingen bedömning avseende sannolikheten att vara under eller över en efterfrågad ålder.

Referenser

1. Demirjian A, Goldstein H, Tanner JM. A new system of dental age assessment. *Hum Biol.* 1973;45(2):211–27.
2. Heldring N, Rezaie AR, Kvist O. Developmental asymmetry of the clavicles and third molars and its implications for forensic age estimation. *Sci Rep.* 2025;15(1):41182.
3. Krämer JA, Schmidt S, Jürgens KU, Lentschig M, Schmeling A, Vieth V. Forensic age estimation in living individuals using 3.0 T MRI of the distal femur. *Int J Legal Med.* 2014;128(3):509–14.
4. Ekizoglu O, Hocaoglu E, Inci E, Can IO, Aksoy S, Sayin I. Estimation of forensic age using substages of ossification of the medial clavicle in living individuals. *Int J Legal Med.* 2015;129(6):1259–64.
5. Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Mühler M, Wernecke KD, Geserick G. Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med.* 2004;118(1):5–8.
6. De Tobel J, Hillewig E, van Wijk M, Fieuws S, de Haas MB, van Rijn RR, et al. Staging Clavicular Development on MRI: Pitfalls and Suggestions for Age Estimation. *J Magn Reson Imaging.* 2020;51(2):377–88.
7. De Tobel J, Ottow C, Widek T, Klasinc I, Mörnstad H, Thevissen PW, et al. Dental and Skeletal Imaging in Forensic Age Estimation: Disparities in Current Approaches and the Continuing Search for Optimization. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2020;24(5):510–22.
8. Anderson M. Use of the Greulich-Pyle "Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist" in a clinical context. *Am J Phys Anthropol.* 1971;35(3):347–52.
9. Schmeling A, Schulz R, Danner B, Rösing FW. The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist. *Int J Legal Med.* 2006;120(2):121–6.
10. Axelsson I. Bone maturation cannot be used to estimate chronological age in asylum-seeking adolescents. *Acta Paediatr.* 2019;108(4):590–2.
11. Haglund M, Garamendi González PM. A problematic dismissal of forensic age estimation. *Acta Paediatr.* 2020;109(1):207.
12. Thevissen PW, Fieuws S, Willems G. Human dental age estimation using third molar developmental stages: does a Bayesian approach outperform regression models to discriminate between juveniles and adults? *Int J Legal Med.* 2010;124(1):35–42.
13. Olze A, Schmeling A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke KD, et al. Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med.* 2004;118(3):170–3.
14. Cameriere R, De Luca S, Ferrante L. Study of the ethnicity's influence on the third molar maturity index (I(3M)) for estimating age of majority in living juveniles and young adults. *Int J Legal Med.* 2021;135(5):1945–52.
15. Thevissen P, Waltimo-Sirén J, Saarimaa HM, Lähdesmäki R, Evälahti M, Metsäniitty M. Comparing tooth development timing between ethnic groups, excluding nutritional and environmental influences. *Int J Legal Med.* 2024;138(6):2441–57.
16. Schmeling A, Reisinger W, Loreck D, Vendura K, Markus W, Geserick G. Effects of ethnicity on skeletal maturation: consequences for forensic age estimations. *Int J Legal Med.* 2000;113(5):253–8.
17. Alshamrani K, Messina F, Offiah AC. Is the Greulich and Pyle atlas applicable to all ethnicities? A systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol.* 2019;29(6):2910–23.
18. De Donno A, Angrisani C, Mele F, Introna F, Santoro V. Dental age estimation: Demirjian's versus the other methods in different populations. A literature review. *Med Sci Law.* 2021;61(1_suppl):125–9.

19. Dahlberg PS, Mosdøl A, Ding Y, Bleka Ø, Rolseth V, Straumann GH, et al. A systematic review of the agreement between chronological age and skeletal age based on the Greulich and Pyle atlas. *Eur Radiol.* 2019;29(6):2936–48.
20. Rolseth V, Mosdøl A, Dahlberg PS, Ding Y, Bleka Ø, Skjerven-Martinsen M, et al. Age assessment by Demirjian's development stages of the third molar: a systematic review. *Eur Radiol.* 2019;29(5):2311–21.
21. Sgheiza V, Liversidge HM. The effect of reference sample composition and size on dental age interval estimates. *Am J Biol Anthropol.* 2023;182(1):82–92.
22. Heldring N, Rezaie AR, Larsson A, Gahn R, Zilg B, Camilleri S, et al. A probability model for estimating age in young individuals relative to key legal thresholds: 15, 18 or 21-year. *Int J Legal Med.* 2024.
23. Heldring N, Larsson A, Rezaie AR, Rasten-Almqvist P, Zilg B. A probability model for assessing age relative to the 18-year old threshold based on magnetic resonance imaging of the knee combined with radiography of third molars in the lower jaw. *Forensic Sci Int.* 2022;330:111108.
24. <BioAlderManual_v1.3English.pdf>.
25. <FHI systematisk oversikt demirjian rapport-2017.pdf>.
26. Heldring N, Larsson A, Rezaie AR, Råsten-Almqvist P, Zilg B. A probability model for assessing age relative to the 18-year old threshold based on magnetic resonance imaging of the knee combined with radiography of third molars in the lower jaw. *Forensic Sci Int.* 2022;330:111108.
27. Ankit R. WebPlotDigitizer [4.6:[Available from: <https://utomeris.io>].
28. Ekizoglu O, Er A, Bozdog M, Basa CD, Kacmaz IE, Moghaddam N, et al. Forensic age estimation via magnetic resonance imaging of knee in the Turkish population: use of T1-TSE sequence. *Int J Legal Med.* 2021;135(2):631–7.
29. Alcina M, Lucea A, Salicru M, Turbon D. Reliability of the Greulich and Pyle method for chronological age estimation and age majority prediction in a Spanish sample. *Int J Legal Med.* 2018;132(4):1139–49.
30. Bala M, Pathak A, Jain RL. Assessment of skeletal age using MP3 and hand-wrist radiographs and its correlation with dental and chronological ages in children. *J Indian Soc Pedod Prev Dent.* 2010;28(2):95–9.
31. Büken B, Safak AA, Yazici B, Büken E, Mayda AS. Is the assessment of bone age by the Greulich-Pyle method reliable at forensic age estimation for Turkish children? *Forensic Sci Int.* 2007;173(2-3):146–53.
32. Cantekin K, Celikoglu M, Miloglu O, Dane A, Erdem A. Bone age assessment: the applicability of the Greulich-Pyle method in eastern Turkish children. *J Forensic Sci.* 2012;57(3):679–82.
33. Chaumoitre K, Saliba-Serre B, Adalian P, Signoli M, Leonetti G, Panuel M. Forensic use of the Greulich and Pyle atlas: prediction intervals and relevance. *Eur Radiol.* 2017;27(3):1032–43.
34. Dembetembe KA, Morris AG. Is Greulich–Pyle age estimation applicable for determining maturation in male Africans? *South African Journal of Science.* 2012;108(9/10).
35. Elamin F, Abdelazeem N, Elamin A, Saif D, Liversidge HM. Skeletal maturity of the hand in an East African group from Sudan. *Am J Phys Anthropol.* 2017;163(4):816–23.
36. Hackman L, Black S. The reliability of the Greulich and Pyle atlas when applied to a modern Scottish population. *J Forensic Sci.* 2013;58(1):114–9.
37. Koc A, Karaoglanoglu M, Erdogan M, Kosecik M, Cesur Y. Assessment of bone ages: is the Greulich-Pyle method sufficient for Turkish boys? *Pediatr Int.* 2001;43(6):662–5.
38. Maggio A, Flavel A, Hart R, Franklin D. Assessment of the accuracy of the Greulich and Pyle hand-wrist atlas for age estimation in a contemporary Australian population. *Australian Journal of Forensic Sciences.* 2018;50(4):385–95.
39. Mora S, Boechat MI, Pietka E, Huang HK, Gilsanz V. Skeletal age determinations in children of European and African descent: applicability of the Greulich and Pyle standards. *Pediatr Res.* 2001;50(5):624–8.

40. Paxton ML, Lamont AC, Stillwell AP. The reliability of the Greulich-Pyle method in bone age determination among Australian children. *J Med Imaging Radiat Oncol.* 2013;57(1):21–4.
41. Saade A, Baron P, Noujeim Z, Azar D. Dental and Skeletal Age Estimations in Lebanese Children: A Retrospective Cross-sectional Study. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2017;7(3):90–7.
42. Soudack M, Ben-Shlush A, Jacobson J, Raviv-Zilka L, Eshed I, Hamiel O. Bone age in the 21st century: is Greulich and Pyle's atlas accurate for Israeli children? *Pediatr Radiol.* 2012;42(3):343–8.
43. Tise M, Mazzarini L, Fabrizzi G, Ferrante L, Giorgetti R, Tagliabracci A. Applicability of Greulich and Pyle method for age assessment in forensic practice on an Italian sample. *Int J Legal Med.* 2011;125(3):411–6.
44. van Rijn RR, Lequin MH, Robben SG, Hop WC, van Kuijk C. Is the Greulich and Pyle atlas still valid for Dutch Caucasian children today? *Pediatr Radiol.* 2001;31(10):748–52.
45. Zabet D, Rerolle C, Pucheux J, Telmon N, Saint-Martin P. Can the Greulich and Pyle method be used on French contemporary individuals? *Int J Legal Med.* 2015;129(1):171–7.
46. Zafar AM, Nadeem N, Husen Y, Ahmad MN. An appraisal of Greulich-Pyle Atlas for skeletal age assessment in Pakistan. *J Pak Med Assoc.* 2010;60(7):552–5.
47. Ottow C, Schulz R, Pfeiffer H, Heindel W, Schmeling A, Vieth V. Forensic age estimation by magnetic resonance imaging of the knee: the definite relevance in bony fusion of the distal femoral- and the proximal tibial epiphyses using closest-to-bone T1 TSE sequence. *Eur Radiol.* 2017;27(12):5041–8.
48. Saint-Martin P, Rérolle C, Pucheux J, Dedouit F, Telmon N. Contribution of distal femur MRI to the determination of the 18-year limit in forensic age estimation. *Int J Legal Med.* 2015;129(3):619–20.
49. Socialstyrelsen. Om magnetkamera vid bedömning av ålder: en studie av validiteten i radiologisk undersökning. 2018.
50. Ekizoglu O, Hocaoglu E, Inci E, Sayin I, Solmaz D, Bilgili MG, et al. Forensic age estimation by the Schmeling method: computed tomography analysis of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med.* 2015;129(1):203–10.
51. Franklin D, Flavel A. CT evaluation of timing for ossification of the medial clavicular epiphysis in a contemporary Western Australian population. *Int J Legal Med.* 2015;129(3):583–94.
52. Madentzoglou MS, Nathana D, Sinatkas V, Karantanas A, Kontakis G, Papadomanolakis A, et al. CT-assisted age estimation from the medial clavicular epiphysis in the Greek population according to Schmeling and Kellinghaus classification. *Leg Med (Tokyo).* 2025;73:102589.
53. Pattamapaspong N, Madla C, Mekjaidee K, Namwongprom S. Age estimation of a Thai population based on maturation of the medial clavicular epiphysis using computed tomography. *Forensic Sci Int.* 2015;246:123 e1–5.
54. Uysal Ramadan S, Gurses MS, Inanir NT, Hacifazlioglu C, Fedakar R, Hizli S. Evaluation of the medial clavicular epiphysis according to the Schmeling and Kellinghaus method in living individuals: A retrospective CT study. *Leg Med (Tokyo).* 2017;25:16–22.
55. Vamberszky L, Uhl M. Forensic age estimation of adolescents using computed tomography of the clavicles. *Int J Legal Med.* 2024;138(6):2381–6.
56. Wesp P, Schachtner BM, Jeblick K, Topalis J, Weber M, Fischer F, et al. Radiological age assessment based on clavicle ossification in CT: enhanced accuracy through deep learning. *Int J Legal Med.* 2024;138(4):1497–507.
57. Zhang K, Chen XG, Zhao H, Dong XA, Deng ZH. Forensic Age Estimation Using Thin-Slice Multidetector CT of the Clavicular Epiphyses Among Adolescent Western Chinese. *J Forensic Sci.* 2015;60(3):675–8.
58. Duangto P, Iamaroon A, Prasitwattanaseree S, Mahakkanukrauh P, Janhom A. New models for age estimation and assessment of their accuracy using developing mandibular third molar teeth in a Thai population. *Int J Legal Med.* 2017;131(2):559–68.
59. Hassan FM, Moawad AM, Samir W, Helaly YR, Abu-Taleb NS. Mandibular third molar maturation stage as indicator for the legal adult age in an Egyptian sample. *Homo.* 2021;72(2):87–97.

60. Hegde S, Patodia A, Dixit U. Staging of third molar development in relation to chronological age of 5-16 year old Indian children. *Forensic Sci Int.* 2016;269:63–9.
61. Johan NA, Khamis MF, Abdul Jamal NS, Ahmad B, Mahanani ES. The variability of lower third molar development in Northeast Malaysian population with application to age estimation. *J Forensic Odontostomatol.* 2012;30(1):45–54.
62. Kasper KA, Austin D, Kvanli AH, Rios TR, Senn DR. Reliability of third molar development for age estimation in a Texas Hispanic population: a comparison study. *J Forensic Sci.* 2009;54(3):651–7.
63. Jayaraman J, Mendez MJC, Gakunga PT, Roberts G. Age estimation of Hispanic children in the United States: Development and validation of dental reference dataset based on two staging systems. *Leg Med (Tokyo).* 2022;56:102033.
64. Knell B, Ruhstaller P, Prieels F, Schmeling A. Dental age diagnostics by means of radiographical evaluation of the growth stages of lower wisdom teeth. *Int J Legal Med.* 2009;123(6):465–9.
65. Lee SH, Lee JY, Park HK, Kim YK. Development of third molars in Korean juveniles and adolescents. *Forensic Sci Int.* 2009;188(1-3):107–11.
66. Li G, Ren J, Zhao S, Liu Y, Li N, Wu W, et al. Dental age estimation from the developmental stage of the third molars in western Chinese population. *Forensic Sci Int.* 2012;219(1-3):158–64.
67. Liu Y, Geng K, Chu Y, Xu M, Zha L. Third molar mineralization in relation to chronologic age estimation of the Han in central southern China. *Int J Legal Med.* 2018;132(5):1427–35.
68. Lopez TT, Arruda CP, Rocha M, Rosin AS, Michel-Crosato E, Biazzevic MG. Estimating ages by third molars: stages of development in Brazilian young adults. *J Forensic Leg Med.* 2013;20(5):412–8.
69. Quispe Lizarbe RJ, Solis Adrianzen C, Quezada-Marquez MM, Galic I, Cameriere R. Demirjian's stages and Cameriere's third molar maturity index to estimate legal adult age in Peruvian population. *Leg Med (Tokyo).* 2017;25:59–65.
70. Gelbrich B, Frerking C, Weiss S, Schwerdt S, Stellzig-Eisenhauer A, Tausche E, et al. Combining wrist age and third molars in forensic age estimation: how to calculate the joint age estimate and its error rate in age diagnostics. *Ann Hum Biol.* 2015;42(4):389–96.
71. Varkkola O, Ranta H, Metsaniitty M, Sajantila A. Age assessment by the Greulich and Pyle method compared to other skeletal X-ray and dental methods in data from Finnish child victims of the Southeast Asian Tsunami. *Forensic Sci Med Pathol.* 2011;7(4):311–6.
72. Kumari S, Sahu AK, Rajguru J, Bishnoi P, Garg AJ, Thakur R. Age Estimation by Dental Calcification Stages and Hand-Wrist Radiograph. *Cureus.* 2022;14(9):e29045.
73. Kanbur NO, Kanli A, Derman O, Eifan A, Ataç A. The relationships between dental age, chronological age and bone age in Turkish adolescents with constitutional delay of growth. *J Pediatr Endocrinol Metab.* 2006;19(8):979–85.
74. Roberts GJ, McDonald F, Andiappan M, Lucas VS. Dental Age Estimation (DAE): Data management for tooth development stages including the third molar. Appropriate censoring of Stage H, the final stage of tooth development. *J Forensic Leg Med.* 2015;36:177–84.
75. Olze A, Pynn BR, Kraul V, Schulz R, Heinecke A, Pfeiffer H, et al. Studies on the chronology of third molar mineralization in First Nations people of Canada. *Int J Legal Med.* 2010;124(5):433–7.
76. Riley RD, Debray TPA, Collins GS, Archer L, Ensor J, van Smeden M, et al. Minimum sample size for external validation of a clinical prediction model with a binary outcome. *Stat Med.* 2021;40(19):4230–51.
77. Snell KIE, Archer L, Ensor J, Bonnett LJ, Debray TPA, Phillips B, et al. External validation of clinical prediction models: simulation-based sample size calculations were more reliable than rules-of-thumb. *J Clin Epidemiol.* 2021;135:79–89.

Appendix

Tabell A.1: Sannolikheter för att vara under 18-år när den övre åldersgränsen varieras på den jämna fördelningen, för hand-och tandstadier samt för kombinationen av dessa indikatorer.

Den gröna färgen indikerar den i modellen applicerade övre gränsen.

Kön	Handstadie	Tandstadie	19 år (%)	20 år (%)	21 år (%)	22 år (%)	23 år (%)	24 år (%)	25 år (%)
Man	18	-	64	52	48	47	47	47	47
Man	19	-	40	20	13	9	7	6	5
Kvinna	17	-	91	88	88	87	87	87	87
Kvinna	18	-	59	41	31	25	21	18	16
Man	-	F	82	75	72	70	69	69	69
Man	-	G	57	40	32	27	25	23	23
Man	-	H	40	20	12	8	6	4	3
Kvinna	-	F	76	64	58	55	54	53	52
Kvinna	-	G	55	36	27	22	19	17	16
Kvinna	-	H	41	20	11	7	5	4	3
Man	18	F	71	64	62	62	62	62	62
Man	19	F	49	33	28	25	24	24	24
Man	18	G	50	37	34	34	33	33	33
Man	19	G	30	14	9	7	6	5	5
Man	18	H	36	22	17	16	16	16	15
Man	19	H	20	6	3	2	1	1	1
Kvinna	17	F	89	87	86	86	86	86	86
Kvinna	18	F	59	44	38	35	33	32	32
Kvinna	17	G	77	71	70	69	69	69	69
Kvinna	18	G	42	24	17	13	11	10	10
Kvinna	17	H	65	55	52	50	50	50	50
Kvinna	18	H	31	14	7	5	3	2	2

Tabell A.2: Sannolikheter för att vara under 21-år när den övre åldersgränsen varierar på den jämna fördelningen, för olika stadier av nyckelben. Den gröna färgen indikerar den i modellen applicerade övre gränsen.

Kön	Nyckelbensstadie	29 år (%)	30 år (%)	31 år (%)	32 år (%)	33 år (%)	34 år (%)	35 år (%)
Man	I	100	100	100	100	100	100	100
Man	II	95	95	95	95	95	95	95
Man	III	44	43	43	43	43	43	43
Man	IV	5	4	4	3	3	3	3
Man	V	2	2	1	1	1	1	1
Kvinna	I	100	100	100	100	100	100	100
Kvinna	II	97	97	97	97	97	97	97
Kvinna	III	48	47	47	47	47	47	47
Kvinna	IV	5	5	4	4	4	3	3
Kvinna	V	2	1	1	1	1	1	0

Tabell A.3: Sannolikheter för att vara under 21-år när den övre åldersgränsen varieras på den jämna fördelningen, för olika stadier av nyckelben i kombination med tand. Den gröna färgen indikerar den i modellen applicerade övre gränsen.

Kön	Tandstadie	Nyckelbensstadie	25 år (%)	26 år (%)	27 år (%)	28 år (%)	29 år (%)	30 år (%)	31 år (%)
Man	F	I	100	100	100	100	100	100	100
Man	G	I	99	99	99	99	99	99	99
Man	H	I	94	94	94	94	94	94	94
Man	F	II	99	99	99	99	99	99	99
Man	G	II	96	96	96	96	96	96	96
Man	H	II	81	81	81	80	80	80	80
Man	F	III	88	88	88	88	88	88	88
Man	G	III	64	63	63	63	63	63	63
Man	H	III	30	28	27	26	26	26	26
Man	F	IV	53	52	51	50	50	50	50
Man	G	IV	24	22	20	19	19	19	18
Man	H	IV	7	5	3	3	2	2	2
Man	F	V	43	41	40	39	39	39	38
Man	G	V	17	15	13	12	12	11	11
Man	H	V	4	3	2	1	1	1	1
Kvinna	F	I	100	100	100	100	100	100	100
Kvinna	G	I	99	99	99	99	99	99	99
Kvinna	H	I	96	96	96	96	96	96	96
Kvinna	F	II	99	99	99	99	99	99	99
Kvinna	G	II	95	95	95	95	95	95	95
Kvinna	H	II	81	81	81	80	80	80	80
Kvinna	F	III	84	83	83	83	83	83	83
Kvinna	G	III	58	57	56	56	56	56	56
Kvinna	H	III	29	26	25	24	23	23	23
Kvinna	F	IV	46	43	42	41	41	41	41
Kvinna	G	IV	20	17	15	14	14	13	13
Kvinna	H	IV	7	4	3	3	2	2	2
Kvinna	F	V	30	27	25	24	23	22	22
Kvinna	G	V	12	9	7	6	6	5	5
Kvinna	H	V	3	2	1	1	1	0	0

Tabell A.4: Kvantitativa mått på modellens tillförlitlighet för visdomstand-modellen (a), hand/handled-modellen (b), distal femur-modellen (c), nyckelben modellen (d) n och kombinationen av hand/handled med visdomstand (e). Kvantifiering baserad på valideringar med oberoende dataset. Sensitivitet (Kronologisk ålder över åldersgränsen och identifierad som över åldersgränsen), specificitet (kronologisk ålder under åldersgränsen och identifierad som under åldersgränsen), positivt prediktivt värde (PPV, individer identifierade som över åldersgränsen med kronologisk ålder över åldersgränsen), negativt prediktivt värde (NPV, individer identifierade som under åldersgränsen med kronologisk ålder under åldersgränsen) samt total precision presenterat för 15-års, 18-års och/eller 21-års gränsen för de manliga respektive kvinnliga modellerna

(a)

Mått	Visdomstand					
	Män			Kvinnor		
	14- års gräns	15-års gräns	18-års gräns	14-års gräns	15-års gräns	18-års gräns
Sensitivity	0.74	0.90	0.90	0.72	0.86	0.75
Specificity	0.94	0.89	0.95	0.93	0.89	0.94
PPV	0.90	0.93	0.91	0.90	0.93	0.89
NPV	0.85	0.85	0.94	0.80	0.78	0.86
Accuracy	0.86	0.90	0.93	0.84	0.87	0.87

(b)

Mått	Hand/handled					
	Män			Kvinnor		
	14-års gräns	15-års gräns	18-års gräns	14-års gräns	15-års gräns	18-års gräns
Sensitivity	0.80	0.81	0.33	0.74	0.89	0.00
Specificity	0.92	0.92	0.99	0.97	0.91	1.00
PPV	0.86	0.81	0.67	0.91	0.73	-
NPV	0.88	0.91	0.96	0.89	0.97	0.94
Accuracy	0.87	0.88	0.95	0.90	0.91	0.94

(c)

Mått	Distal femur			
	Män		Kvinnor	
	15-års gräns	18-års gräns	15-års gräns	18-års gräns
Sensitivity	-	0.82	-	0.91
Specificity	-	0.96	-	0.78
PPV	-	0.96	-	0.77
NPV	-	0.82	-	0.92
Accuracy	-	0.88	-	0.84

(d)

Mått	Nyckelben			
	Män		Kvinnor	
	18-års gräns	21-års gräns	18-års gräns	21-års gräns
Sensitivity	0.76	0.59	0.86	0.64
Specificity	0.82	0.96	0.82	0.95
PPV	0.97	0.95	0.97	0.94
NPV	0.32	0.65	0.45	0.69
Accuracy	0.77	0.75	0.85	0.78

(e)

Mått	Kombination hand/handled och visdomstand			
	Män		Kvinnor	
	14-års gräns	15-års gräns	14-års gräns	15-års gräns
Sensitivity	0.75	1.00	0.58	1.00
Specificity	0.91	0.97	0.95	0.96
PPV	0.40	0.40	0.58	0.33
NPV	0.98	1.00	0.95	1.00
Accuracy	0.90	0.97	0.91	0.97