

KUML 2021



KUML 2021

Årbog for Jysk Arkæologisk Selskab

With summaries in English

I kommission hos Aarhus Universitetsforlag

Bayesiansk kronologisk modellering som redskab i den lovpligtige arkæologi

AF SUNE VILLUMSEN, KIRSTINE HAASE, TOBIAS TORFING,
MATHIAS SØNDERGAARD & HELENE AGERSKOV ROSE

Ved indførelsen af den nuværende museumslov i 2002 blev mulighederne for naturvidenskabelige analyser og dateringer, herunder C14-dateringer, i forbindelse med de lovpligtige bygherrefinansierede udgravninger forbedrede. Det har betydet, at antallet af dateringer fra arkæologiske udgravninger i disse år er stærkt stigende, omend landets museer har forskellige tilgange til C14-dateringer. Der sættes indimellem spørgsmålstejn ved metodens egnethed i specifikke situationer, såsom ved datering af forhistoriske hustomter¹ eller byernes middelalderlige kulturlag, idet de kalibrerede C14-dateringer ofte er så brede, at dateringer baseret på dendrokronologi og genstandstypologi foretrækkes.² Alligevel må C14-dateringer i dag betragtes som en integreret del af den arkæologiske værktøjskasse, og metoden inddrages på linje med stratigrafi, hustypologi, genstandstypologi osv. i det kronologiske arbejde. Skepsissen betyder dog, at C14-dateringer ofte ender som et løsrevet supplement til at vurdere kronologien for en lokalitet, der blot bekræfter eller afviser de arkæologisk baserede dateringer. Dette er ikke hensigtsmæssigt med tanke på de betragtelige økonomiske ressourcer, der anvendes på netop C14-dateringer.

Bayesianske kronologiske modeller gør det muligt at integrere C14-dateringerne i de øvrige arkæologiske observationer af f.eks. stratigrafi og kontekstuelle sammenhænge. Andre relevante informationer kan komme fra dendrokronologiske eller numismatiske dateringer, ligesom oplysninger om de daterede prøvers egenalder også kan inddrages. På dette grundlag beregner modellen statistiske sandsynlighedsfordelinger af de enkelte C14-dateringer. De modellede dateringer tager hensyn til alle de tilgængelige oplysninger vedrørende prøverne og deres kontekst, og de er derfor mere præcise end de simple kalibrerede dateringer. En anden væsentlig fordel ved en kronologisk model er, at den kan estimere dateringer af begivenheder, der ikke er C14-dateret direkte,

f.eks. hvornår en bebyggelsesfase begynder, og hvornår den ophører. Ofte er det disse estimater, der kan bidrage til at besvare de arkæologiske problemstillinger, mens dateringen af den enkelte kornkerne eller trækulsprøve måske er mindre interessant i sig selv.

Vi vurderer, at den lovpligtige bygherrefinansierede arkæologi kan drage stor nytte af at inddrage kronologisk modellering som et aktiv, gerne allerede i udgravningernes planlægningsfase, men vi anerkender også, at metoden kan forekomme svært tilgængelig. Vi vil derfor præsentere og diskutere eksempler på anvendelsen af modellerede C14-dateringer i forskellige scenarier, som er almindeligt forekommende inden for dansk arkæologi.

Kronologisk modellering af C14-dateringer

Den skepsis og kritik, som C14-dateringer kan give anledning til, er ofte en konsekvens af de tilfælde, hvor der ikke er en overensstemmelse med den arkæologiske datering, eller hvor flere C14-dateringer fra samme kontekst ikke er i indbyrdes overensstemmelse. Ligeledes kan der opstå usikkerhed omkring, hvorledes de ofte brede kalibrerede dateringsrammer skal håndteres. Det er her vigtigt at understrege, at den kritik, der typisk har været rejst i dansk sammenhæng, angår simple kalibrerede dateringer, og at det er nødvendigt at skelne mellem disse umodellerede dateringer og de statistiske sandsynlighedsfordelinger, der er resultatet af en bayesiansk kronologisk model.

Som udgangspunkt må understreges, at C14-dateringer er probabilistiske af natur, og at der er knyttet en usikkerhed til den enkelte C14-måling. En C14-alder bestemmes ved at måle isotop-ratioerne af C14/C12 og C13/C12 med et accelerator massespektrometer (AMS). Målingen korrigeres for fraktionering³ og baggrundssignal med en måling på materiale, som er så gammelt, at alt C14 kan antages at være henfaldet. Laboratoriet rapporterer det korrigerede resultat som en C14-alder med en middelværdi og en usikkerhed (standardafvigelsen), der angiver det bedst mulige estimat for den 'sande' C14-alder for prøven. Den 'sande' alder er i sagens natur en ukendt størrelse, men statistisk kan det forventes, at der er 68,3% sandsynlighed for, at den vil ligge indenfor én standardafvigelse, og at der er 95,4% sandsynlighed for, at den vil ligge indenfor to gange standardafvigelsen. Det er på denne baggrund væsentligt at holde sig for øje, at der således stadig er ca. 5% sandsynlighed for, at prøvens 'sande' alder ikke er inkluderet inden for dette interval.

Mængden af C14 i atmosfæren er ikke stabil, og C14-dateringer kalibreres derfor ved at bruge en C14-kalibreringskurve. Kalibreringskurven er opbygget af C14-dateringer lavet på uafhængige kronologiske arkiver – f.eks. dendro-

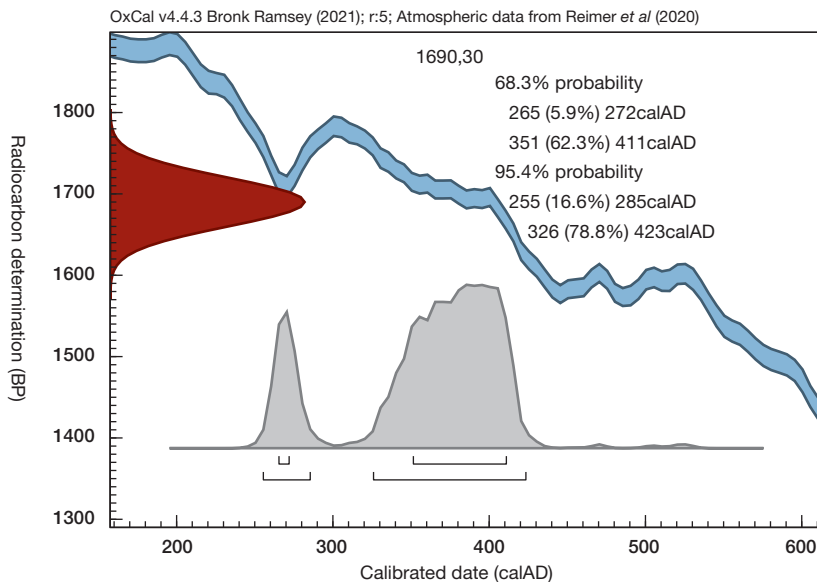


Fig. 1. Den målte C14-alder med standardafvigelsen ses som en klokkeformet normalfordeling (rød). Den ikke-lineære kalibreringskurve (blå) resulterer i flere mulige kalibrerede årstal (grå). Alle figurer er af forfatterne, hvis ikke andet er nævnt.

The non-linear calibration curve (blue) results in several calibrated dates (grey) for each normally distributed radiocarbon measurement (red). All figures are by the authors unless otherwise specified.

kronologisk daterede årringe. Dette har tidligere været med et tiårigt interval (IntCal13 og ældre), men er over de senere år blevet udbygget, så der mange steder er toårige intervaller (IntCal20).⁴ Generelt set giver en højere opløsning en mere detaljeret struktur til kalibreringskurven, og i heldige tilfælde betyder det mere præcise dateringer, i andre blot flere afgrænsede sandsynligheder.⁵ De kalibrerede C14-dateringer kan have vidt forskellige dateringsrammer alt efter om den pågældende del af kalibreringskurven er stejl eller er præget af wiggles eller plateauer, helt anderledes end C14-målingens normalfordeling (fig. 1). De kalibrerede C14-dateringer bliver typisk rapporteret som årstalsintervaller angivet med 68,3% eller 95,4% sandsynlighed (jf. C14-målingens standardafvigelse). I de fleste arkæologiske sammenhænge vil det ikke give mening at arbejde med højere sandsynlighedsintervaller, da de kalibrerede dateringer så oftest vil blive for brede til besvarelse af de kronologiske problemstillinger.

I alle datasæt kan der forventes statistiske *outliers*,⁶ men et potentielt større problem er de kontekstuelle *outliers*, hvor der er en tidsmæssig forskydning mellem materialet, der dateres, og den begivenhed vi ønsker at datere.⁷ Det kan opstå ved, at materialet har en egenalder, såsom kerneved fra træer, men

kan også skyldes redeponeringer, der kan være svære at erkende. Denne problematik er essentiel at forholde sig til, før man overhovedet giver sig i kast med C14-dateringer, men da den er beskrevet uddybende andre steder,⁸ og vores ærinde med denne artikel er et andet, vil vi ikke gå nærmere ind i dette forhold her, men blot understrege vigtigheden af nøje prøveudvælgelse set i forhold til det objekt eller begivenhed, der ønskes dateret.

Selvom der er styr på relationen mellem prøvemateriale, og den begivenhed vi ønsker at datere, knytter der sig nogle videre udfordringer til tolkningen af de kalibrerede C14-dateringer. Eftersom de kalibrerede C14-dateringers sandsynlighedsfordelinger spreder sig omkring prøvernes sande alder, vil en simpel visuel vurdering af et kalibreringsplot typisk lede til markant fejlagtige tolkninger af, hvornår en given aktivitet eller fase begynder og slutter, ligesom varigheden oftest vil blive markant overvurderet.⁹ En løsning er at benytte bayesiansk statistik. Baseret på Bayes' Theorem¹⁰ benyttes det i dag inden for en lang række fagfelter til at udregne sandsynligheden for, at bestemte begivenheder forekommer under nogle givne forhold. I arkæologisk sammenhæng betyder det, at C14-dateringerne integreres i en kronologisk model sammen med vores øvrige viden om de daterede prøver og deres kontekst. Det kan være arkæobotaniske eller osteologiske oplysninger om prøvematerialet og dets egenalder, arkæologiske iagttagelser af stratigrafi samt tolkninger af dateringernes indbyrdes sammenhæng og relationer. I de fleste tilfælde vil modelleringen forbedre præcisionen af de enkelte dateringer betydeligt. Endnu væsentligere giver modellen mulighed for at adressere en lang række arkæologiske problemstillinger, som måske ikke kan dateres direkte som f.eks. en kronologisk fases begyndelse, dens ophør eller dens varighed.

Metoden og de underliggende algoritmer er udførligt beskrevet,¹¹ og softwarepakker som OxCal, Bcal og ChronoModel gør kronologisk modellering af C14-dateringer forholdsvis let tilgængelig.¹² Det har resulteret i, at antallet af artikler i internationale tidsskrifter, der anvender kronologisk modellering, er steget kraftigt over de sidste 10-15 år.¹³ Metoden har dog hidtil kun vundet begrænset udbredelse i dansk og skandinavisk arkæologi, men inden for de seneste år er der dog kommet flere eksempler på formaliseret bayesiansk kronologisk modellering fra danske og skandinaviske lokaliteter. Blandt de første eksempler er Bettina Schulz Paulssons fasemodeller med C14-dateringer fra svenske og danske megalitgrave.¹⁴ Paulsson kombinerer de daterede prøver med sparsomme stratigrafiske oplysninger, hvilket både giver mulighed for at afgrænse de enkelte megalitters brugsperioder og belyse de kronologiske rammer for megalitbyggeriets introduktion og geografiske spredning i Skandinavien. Paulsson har ligeledes modelleret neolitiseringen baseret på dateringer

fra nødudgravningen Östra Odarslöv i Skåne.¹⁵ I Danmark er den neolitiske samlingsplads Liselunds kronologi analyseret med en kronologisk model, der bl.a. indsnævrer dateringen af pladsen samt giver et præcist estimat af brugstiden¹⁶, og for bronzealderens vedkommende er kronologisk modellering anvendt til at kombinere C14-dateringer af menneskeknogler i grave med den etablerede relative genstandskronologi.¹⁷ Frands Herschend har arbejdet med bayesianske analyser af jernalderhuse,¹⁸ og senest har Helene Agerskov Rose modelleret individuelle genstandstyper fra sydjyske tuegravsfelter og brugt dem til at revurdere tuegravskikkens kronologi og den kronologiske ramme for førromersk jernalder.¹⁹

Når det kommer til middelalder og særligt udgravninger i byerne, er eksemplerne mere talrige, hvilket formentlig hænger sammen med, at der her oftere er gode stratigrafiske informationer tilgængelige, end det er tilfældet på de fleste fladeudgravninger af jernalderlokaliteter. En veldokumenteret stratigrafi giver sammen med ofte snævert daterbare genstandsfund og dendrokronologi mulighed for en meget detaljeret og højopløst kronologi.²⁰

Ovenstående eksempler illustrerer potentialet og de mange forskelligartede anvendelsesmuligheder, der ligger i brugen af kronologiske modeller. Det til trods er der dog stadig lang vej til at få metoden gjort til et standardværktøj i forbindelse med de lovpligtige arkæologiske nødudgravninger. Vi vil derfor præsentere to eksempler fra bygherrefinansierede udgravninger, hvor metoden har været med til at øge præcisionen af dateringerne betragteligt og dermed har bidraget til en væsentlig mere robust kronologi for de pågældende lokaliteter. Først vil vi dog gennemgå en række fiktive eksempler, der anvender simulerede data. Det gør vi dels for at kunne bedømme mulighederne for en øget præcision med eksempler, hvor vi kender de underliggende 'rigtige' årstal, og dels for at kunne præsentere de forskellige begreber, der knytter sig til opbygningen af kronologiske modeller.

Kronologisk modellering i praksis – fiktive scenarier med simulerede dateringer

Simulering 1 – en stratigrafisk relation

Det første eksempel omfatter prøver fra en stratigrafisk sekvens. Vi anvender ti simulerede C14-dateringer²¹ svarende til kendte årstal i 10-års-intervaller mellem år 970 og år 1060 e.Kr. (fig. 2). Umiddelbart fremstår sandsynlighedsfordelingerne af de kalibrerede C14-aldre som nogenlunde samtidige, og med brede sandsynlighedsintervaller på op mod 200 år. Det faktum, at der er tale om enkelthændelser med 10 års intervaller bliver altså fuldstændigt sløret.

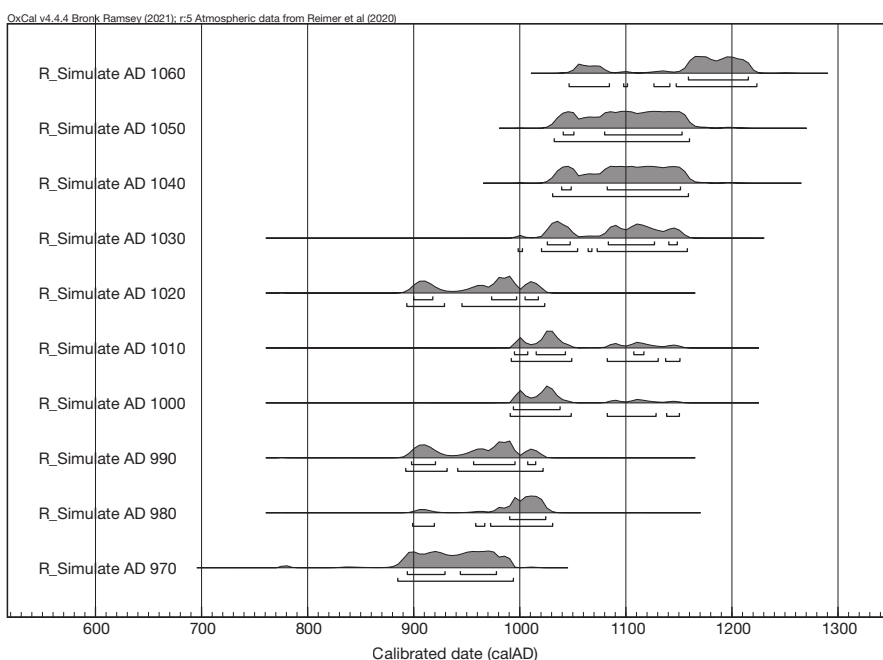


Fig. 2. Ti simulerede og kalibrerede C14-dateringer. De simulerede dateringer har udgangspunkt i årstal med 10 års intervaller.

Ten simulated and calibrated radiocarbon dates. The simulated dates were produced at 10-year intervals.

Vores forhåndsviden om dateringernes kontekstuelle sammenhæng og relative dateringer kaldes *a priori* information (eng. *prior*), og ved at kombinere det med de kalibrerede dateringer opnås en *a posteriori* (eng. *posterior*) sandsynlighedsfordeling.²² Vi vil herefter benytte de engelske betegnelser *prior* og *posterior*. Kort sagt kan vi tilføje informationer, der hjælper til at udelukke nogle af de mange mulige årstal i den kalibrerede sandsynlighedsfordeling. I det simulerede scenarie kan vi lægge vores viden om prøvernes stratigrafiske relation, vores *priors*, ind i modellen. OxCal,²³ som er det mest udbredte kalibreringsprogram herhjemme, og som vi benytter i det følgende, opererer med to grundlæggende byggesten: *Sequence* (da. sekvens) og *phase* (da. fase). En sekvens angiver, at vi kender rækkefølgen af begivenheder, f.eks. hvis vi som i eksemplet (fig. 2) har en stratigrafi, hvor prøve A er ældre end prøve B, som igen er ældre end prøve C osv. Faser bruges derimod, hvis vi ved, at prøverne hører til i samme periode, f.eks. fra et akkumuleret kulturlag eller stolpehullerne i en hustomt, men ikke har information om deres indbyrdes rækkefølge. For at afgrænse faser og sekvenser bruges funktionen *boundary* (da. grænse). *Start* og *end boundaries* er centrale modelparametre, da de repræsenterer den første og sidste statistisk

beregnete begivenhed i en given fase.²⁴ Det er usandsynligt, at vi har udtaget prøver, der repræsenterer den allerførste og sidste aktivitet på en lokalitet, men den kronologiske model beregner på baggrund af de øvrige dateringer og deres spredning i tid en sandsynlig datering af fasens begyndelse og ophør. Forudsat at de nødvendige arkæologiske *priors* er til stede, kan der opbygges komplekse modeller ved at indlejre faser i sekvenser og vice versa.

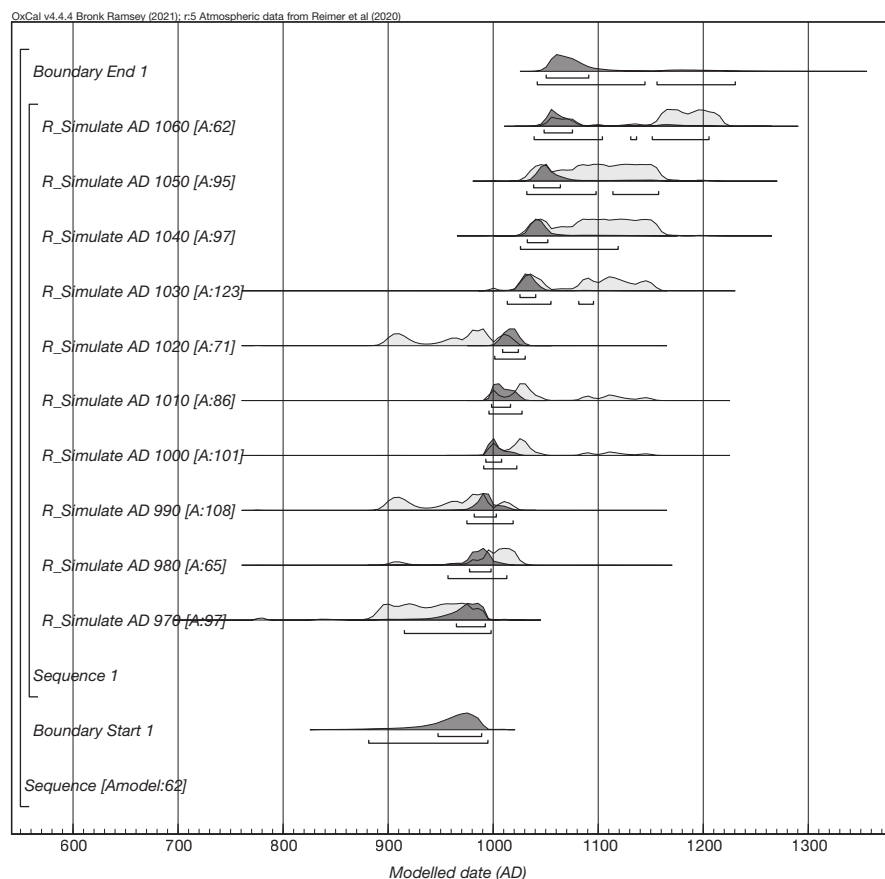


Fig. 3. De samme dateringer som i fig. 2, men denne gang er oplysninger om prøvernes stratigrafiske sekvens inddraget i modellen. Det giver langt mere præcise estimater, der i højere grad reflekterer prøvernes faktiske alder. Der er ligeledes estimater for første og seneste begivenhed. *Posterior* sandsynlighedsfordelingen er markeret med mørkegrå, mens de umodelerede kalibrerede dateringer ses som en lys grå aftegning.

The same dates as in fig. 2, but with the stratigraphic information incorporated into the model. This gives more precise estimates which, to a greater degree, reflect the actual age of the samples. The earliest and latest events are also estimated. The posterior probability distribution is marked in dark grey and the unmodelled calibrated dates are shown in light grey.

Fig. 4. Eksempel på datering af en treskibet jernalderhustomt med simulerede dateringer. →
Huset er opført i år 50 e.Kr. og nedlagt igen i år 80. De simulerede dateringer er fra fem vilkårlige årstal inden for husets brugsperiode. Dateringer er knyttet sammen i en fase afgrænset af en *start* og *end boundary*, der repræsenterer hhv. tidspunktet for opførelsen og nedlæggelsen af huset. Ved at inkorporere information om dateringernes kontekstuelle sammenhæng i en fase opnås mere præcise estimater af de enkelte prøvers datering, der i højere grad repræsenterer husets faktiske brugsperiode. *Posterior* sandsynlighedsfordelingen er markeret med mørkegrå, mens de umodellerede kalibrerede dateringer ses som en lys, grå aftegning. Dateringernes overensstemmelse med modellens parametre er udtrykt gennem et *agreement index*, der optræder som A-værdi i parentes efter den enkelte datering og ligeledes for den samlede model (A_{model}).

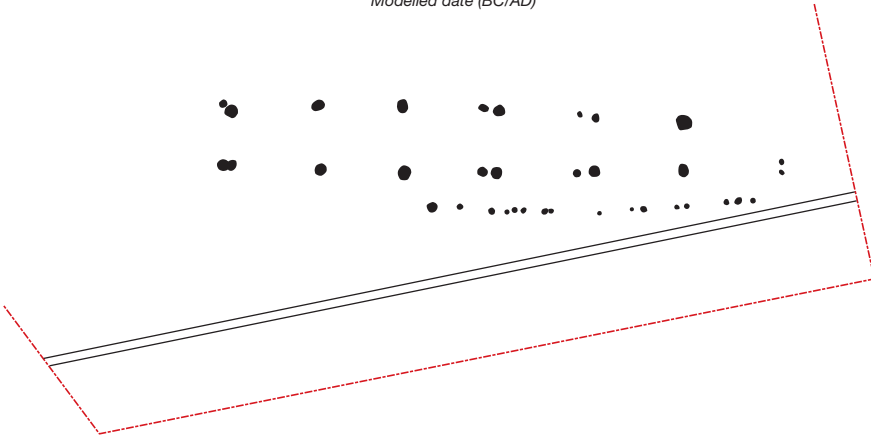
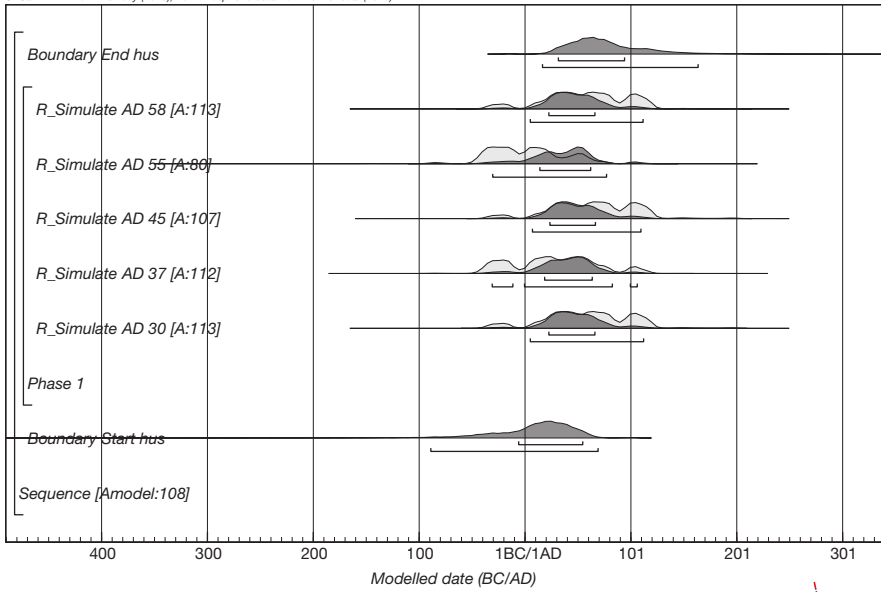
An example of dating an Iron Age house using simulated dates. The house was constructed in AD 50 and demolished in AD 80. The simulated dates are from five random years within the use-phase of the house. The dates are part of the same phase, with a start and end boundary representing the construction and demolition of the house, respectively. By including the stratigraphical information relating to the samples in the same phase, a more precise estimate is produced for each individual date, and this is a better representation of the actual use-phase of the house. The posterior probability distribution is marked in dark grey and the unmodelled calibrated dates are shown in light grey. The Agreement Index, A, is an indicator of the match between the data and the model. It is expressed as an A-value in brackets after each date and an overall agreement index (A_{model}) for the model.

I det simulerede scenarie bruger vi funktionen *sequence* til at indlejre information om prøvernes indbyrdes relative datering. Resultatet er, at den modellerede *posterior* sandsynlighedsfordeling har en langt mindre spredning omkring prøvernes faktiske alder (fig. 3). Eksemplet er en simplificeret situation af noget, man f.eks. ville kunne træffe i en udgravning i en middelalderlig bykerne. I sådan en situation kunne man også forestille sig at have anden kronologisk information til rådighed såsom mønter, dendrodateringer eller brandlag, der kan knyttes til historisk dokumenterede begivenheder. Alle sådanne informationer kan ligeledes indlejres i modellen, hvilket vil blive illustreret i et af de følgende eksempler fra det middelalderlige Odense.

Når vi ikke har stratigrafisk information til rådighed, men f.eks. knytter prøverne fra stolpehuller i et jernalderhus sammen i en kontekstuel fase, så har vores *prior* information en mere generel karakter og kaldes *uninformative priors* og har ikke en lige så stærk indflydelse som de *informative priors*.²⁵

Simulering 2 – en husfase

Vi kan benytte et fiktivt jernalderhus som eksempel på brugen af *uninformative priors* (fig. 4). Vi har en hustomt fra starten af ældre romersk jernalder, der har haft en brugstid på 30 år, og vi simulerer igen en række C14-dateringer med udgangspunkt i fem vilkårlige årstal inden for husets brugsperiode. Sandsynlighedsfordelingen af de umodellerede kalibrerede dateringer vil som i det



foregående eksempel sprede sig omkring prøvernes reelle alder med så store intervaller, at husets faktiske datering og brugstid bliver sløret.

Når dateringerne ikke inkluderes i en bayesiansk kronologisk model, medfører det implicit, at vi anser dem som enkeltstående hændelser uden nogen indbyrdes relation og dermed uden nogen *prior* antagelse om, at det er mere sandsynligt, at de ligger tæt end langt fra hinanden i tid. Ikke at modellere dateringer er således også en form for *prior* antagelse.

I eksemplet med jernalderhuset er en sådan *prior* i direkte modstrid med vores arkæologiske tolkning af prøvernes kontekst. Vores tolkning af hustomten siger, at de fem C14-dateringer hører kontekstuel sammen inden for en husfase med et udefineret start- og sluttidspunkt, og den information kan inkluderes i

den kronologiske model. Vi bruger i modsætning til sidste simulerede scenarie her funktionen *phase*, idet vi ikke har nogen viden om prøvernes indbyrdes rækkefølge. Resultatet bliver en ændret vægtning af de enkelte dateringers sandsynlighedsfordeling, der nu ligger tættere centreret omkring de faktiske årstal. Vi får også estimerede dateringer af fasens start- og sluttidspunkt. To begivenheder, som vi ikke har direkte dateret, eftersom vi ikke kan gå ud fra, at den ældste prøve afspejler husets opførelsestidspunkt, ligesom den yngste prøve ikke nødvendigvis afspejler tidspunktet for husets nedlæggelse.

Mens eksemplet her tager udgangspunkt i et treskibet hus, så kan de samme principper for modeller baseret på *uninformative priors* benyttes, hvis man ønsker at datere eksempelvis en bopladsfase, et bestemt arkitektonisk eller stilistisk træk med mere.

Overensstemmelse mellem model og kalibrerede C14-dateringer

Kronologiske modeller har også en række andre fordele, og i OxCal er der en række muligheder for at vurdere, om de arkæologiske antagelser, der indlejres i en model, stemmer overens med C14-dateringerne. Dette udtrykkes gennem et *agreement index A*,²⁶ hvor de enkelte dateringer tildeles en værdi på baggrund af deres overensstemmelse mellem den kalibrerede sandsynlighedsfordeling og modellens *posterior* sandsynlighedsfordeling. En acceptabel *A* værdi er normalt på ca. 60% eller over (man skal være opmærksom på, at *A* værdien også kan overstige 100%). Er værdien under, indikerer det altså, at en datering eller de opstillede *priors* er problematiske. Ligeledes udregnes en *agreement* for den samlede model (A_{model}). Også her skal værdien for en robust model generelt ligge over ca. 60%. På denne måde kan fejlagtige modelparametre som f.eks. en fejlfortolket stratigrafisk sekvens identificeres.

Mens man kan bruge lave *agreement* værdier for de enkelte dateringer til at identificere eventuelle outliers, så vil der dog stadig kunne forekomme 'korrekte' dateringer, der ligger lidt under det generelt anvendte minimum på 60%. Derfor kan det være en fordel med en mere formaliseret tilgang, hvilket i OxCal kan gøres i form af en *outlier*-analyse.²⁷ I stedet for den individuelle vurdering og fjernelse af outliers vil det ofte være at foretrække, da processen er gennemskuelig og resultaterne kan efterprøves.

Baseret på vores *prior* information om en given datering informerer vi en *outlier*-model om sandsynligheden for, at en datering er en *outlier*. F.eks. ved vi på forhånd, at dateringer af trækul og kremerede knogler har en indbygget egenalder og derfor vil være ældre end den kontekst, vi ønsker at datere. Dette kan afhjælpes ved at bruge en specifik *outlier*-model til trækul, som tager hensyn til prøvematerialets egenalder.²⁸ For prøver med lav egenalder kan man

typisk anvende en generel 5% sandsynlighed for, at den enkelte prøve er en statistisk *outlier*.²⁹ *Outlier*-modellen beregner en *posterior* sandsynlighed for, at en given datering faktisk er en *outlier*, og vil i så fald vægte den lavere end de øvrige dateringer i den samlede model.

Simulering 3 – husfaser med stratigrafisk relation

Næste trin i simuleringsundersøgelsen af vores fiktive jernalderhus er, at vi forestiller os en mere kompleks situation, hvor der også er *informative priors* til rådighed i form af stratigrafi. I eksemplet i fig. 5 ses to hustomter med en klar stratigrafi, hvor flere stolpehuller fra Hus 2 skærer stolpehuller fra Hus 1. De to husfaser er meget lig hinanden, hvad angår deres arkitektoniske udtryk og deres orientering. Den arkæologiske tolkning er derfor, at der er tale om to faser af det samme hus, og at Hus 1 derfor bliver efterfulgt umiddelbart af Hus 2. Derudover er der en grube, som er stratigrafisk yngre end Hus 2. I denne er der fundet en større mængde rensket korn, der tolkes som en samlet nedlægning.

Igen simulerer vi en række C14-dateringer ud fra vilkårligt valgte årstal inden for de to huses brugsperiode samt tre dateringer fra det samme årstal fra gruben. Den kronologiske model opbygges på grundlag af de stratigrafiske iagttagelser og arkæologiske tolkninger, og derudover inkluderes en *outlier*-model til identifikation og håndtering af evt. *outliers*. Grundlaget for modellen er de to husfaser, hvor dateringerne knyttes kontekstuel sammen, og faserne indlejres i en sekvens, hvor Hus 1 er ældre end Hus 2, og gruben er yngre end begge. Den arkæologiske tolkning siger, at Hus 2 opføres umiddelbart efter, at Hus 1 nedlægges, og dette udtrykkes i modellen ved en *transition boundary* mellem de to husfaser, mens den *boundary*, der ligger mellem Hus 2 og gruben, giver mulighed for et ukendt tidsinterval mellem de to. De tre dateringer på korn tolkes som stammende fra samme hændelse, og deres samtidighed udtrykkes med kommandoen *combine*. På denne måde har vi inkluderet al vores arkæologiske *prior* viden i opbygningen af modellen. De indlagte *boundaries* gør desuden, at modellen kan estimere dateringen af hændelser, som vi ikke har direkte dateret. Derudover kan der også lægges forespørgsler ind om f.eks. varigheden af faser.

I de to forskellige simuleringer af jernalderhuse ovenfor er der taget udgangspunkt i en simpel *uniform* fasemodel, hvor det antages, at dateringerne har en ensartet fordeling mellem fasens start- og sluttidspunkt. I mangel på anden information, der er i modstrid med denne antagelse, kan enhver gruppe af dateringer modelleres i en sådan simpel fasemodel.³⁰ Der kan dog være eksempler, hvor vi har en anden viden eller formodning omkring prøvernes underliggende

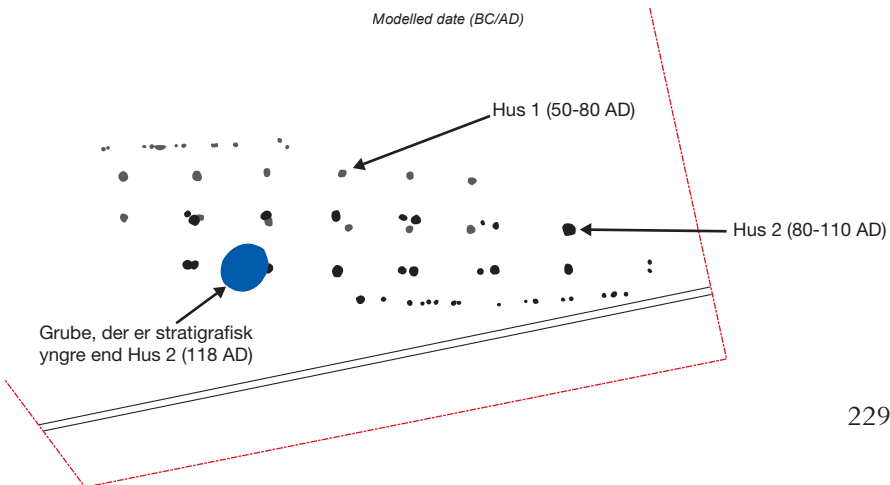
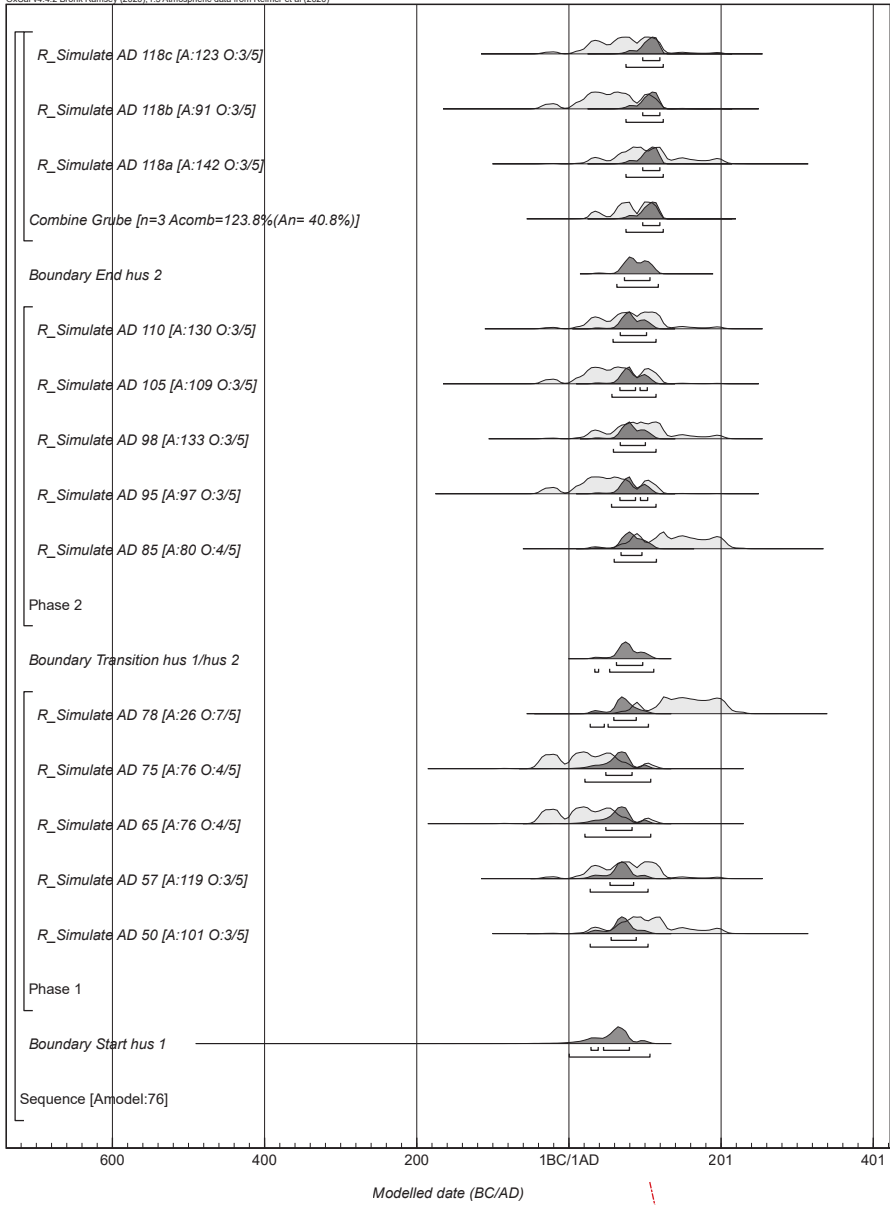
Fig. 5. Simulerede dateringer af to jernalderhustomter. *Posterior*-sandsynlighedsfordelingen er markeret med mørk grå, mens de umodellerede kalibrerede dateringer ses som en lys grå aftegning. De stratigrafiske iagttagelser mellem de to hustomter samt gruben danner grundlag for modellens sekvens. Den arkæologiske tolkning er, at Hus 2 er opført umiddelbart efter, Hus 1 er nedlagt, hvilket i OxCal udtrykkes gennem brugen af funktionen *boundary transition Hus 1/ Hus 2*, der angiver, at de to faser følger hinanden umiddelbart uden mellemrum eller overlap. At vi ikke har nogen information, om hvornår gruben er gravet og opfyldt, bortset fra at det er efter nedlæggelsen af Hus 2, udtrykkes ligeledes gennem den valgte *boundary*, der tillader et udefineret tidsrum mellem de to hændelser. Resultatet af den tilføjede outliermodel ses som O'et i parentes efter hver enkelt af de simulerede dateringer. Tallet før skråstregen angiver *posterior outlier* sandsynligheden, mens femtallet efter skråstregen angiver den valgte *prior outlier* sandsynlighed på 5%. →

Simulated dates for two Iron Age houses. The posterior probability distribution is marked in dark grey and the unmodelled calibrated dates are shown in light grey. The modelled sequence is based on the stratigraphical relationship between the two houses. The archaeological interpretation is that house 2 was constructed immediately after house 1 was demolished. In OxCal, this is expressed through the 'Boundary Transition hus 1/ hus 2' command which indicates that there is no overlap or gap between the two houses. The absence of information on when the pit was dug and back-filled, except that it happened sometime after the demolition of house 2, is also expressed through a Boundary that allows an undefined gap between the two events. The result of the added outlier model is seen as an O in brackets after each individual simulated date. The number before the slash is the posterior probability, while the number five after the slash indicates the chosen outlier probability of 5%.

fordeling inden for fasen, f.eks. at de vil være vægtet mod tidspunktet for nedlæggelsen af huset. OxCal har en række indbyggede grupperingsværktøjer såsom en eksponentialfordeling, der kan benyttes til bedre at afspejle forskellige scenarier.³¹

Et andet spørgsmål vedrørende fasemodeller er knyttet til antallet af dateringer. I dansk arkæologi har der længe været en erkendelse af, at en enkelt C14-datering ikke daterer et hus, en bopladsfase eller andre arkæologiske kontekster. Hertil er usikkerheden forbundet med den enkelte datering og risikoen for kontekstuelle *outliers* for høj. I de fiktive scenarier med jernalderhuse er der brugt fem dateringer pr. hus, hvilket gennem gentagne simuleringer har vist sig at være tilstrækkeligt til at øge præcisionen betragteligt i forhold til simple kalibrerede C14-dateringer. Hvor mange dateringer det kræver at datere et givent objekt afhænger også af, hvor på kalibreringskurven dateringerne falder, da nogle perioder er langt mere fordelagtige end andre. Derudover kan tilstedeværelsen af stærke *priors* også mindske antallet af nødvendige prøver pr. fase for at opnå en tilfredsstillende præcision og robust kronologi.

De ovenstående fiktive scenarier viser nogle af de forskellige muligheder, som bayesiansk kronologisk modellering rummer. På baggrund af denne generelle indføring vil vi præsentere to eksempler fra bygherrefinansierede udgravninger, der viser metodens brug i praksis.



Krogsgårdmark II – dateringen af en hustomt ved kombination af C14 med stratigrafiske iagttagelser og arkæologiske tolkninger

Krogsgårdmark II³² ligger vest for Esbjerg og blev udgravet i 2016. Pladsen rummede flere huse fra ældre jernalder samt gruber og ovne fra samme periode, men vi vil her fokusere på et hus, der ud fra hustypologi og keramik dateres til yngre førromersk jernalder eller ældre romersk jernalder. Huset blev kun delvist frilagt, men var meget velbevaret, og specielt husets stenbrolagte staldende påkaldte sig opmærksomhed (fig. 6).

Helt usædvanligt var der i to tilfælde bevaret rester af selve tagstolperne fra huset, den ene dog meget fragmentarisk. Selv den bedst bevarede stolpe var i dårlig stand, og kernen var rådnet bort. Der var heller ikke bevaret bark eller splintved, og der var generelt for få årringe til, at der kunne foretages en dendrodatering. Vi kan dog logisk fastslå, at stolpen må være fældet, før huset blev bygget, og dermed vil C14-dateringer angive et tidspunkt før husets opførelse. For at give så præcis en datering som muligt er der foretaget tre dateringer på stolpen, som er taget fra tre årringe med kendt indbyrdes afstand (hhv. 10 og 12 års interval).



Fig. 6. Den stenlagte grebning i hustomtens staldende efter afrensning. – Foto: Sydvestjyske Museer.

The cobbled floor of the stable.

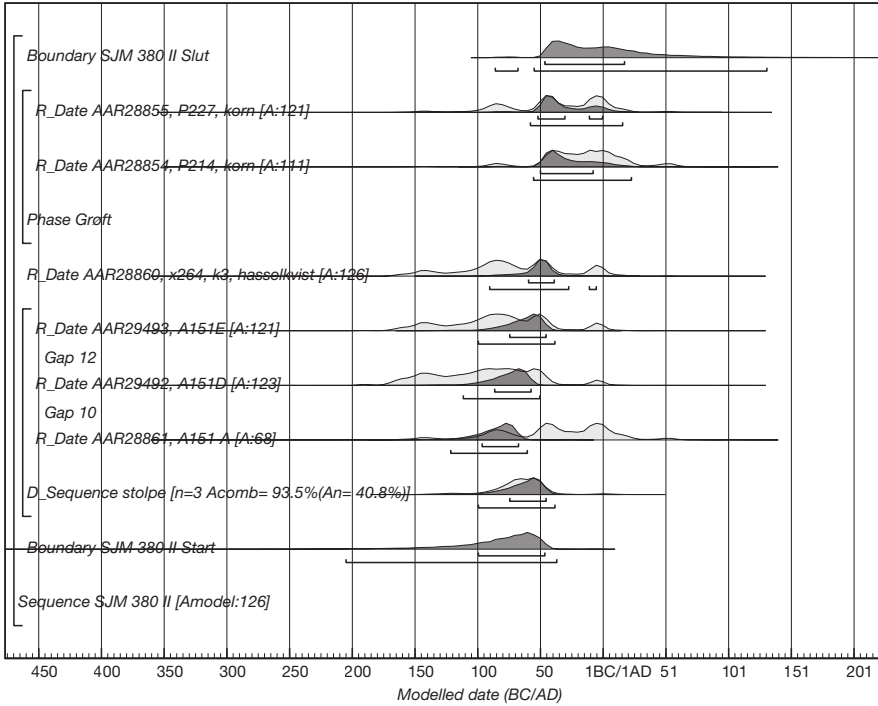
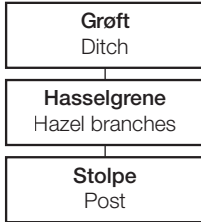


Fig. 7a. Model over dateringerne, faserne og sekvenserne i Oxcal. Umødelerede dateringer er vist med lysegrå, de mørkegrå skygger viser dateringerne efter datering.

The model shows the dates, phases and sequences in OxCal. The posterior probability distribution is marked in dark grey and the unmodelled calibrated dates are shown in light grey.

Fig. 7b. Det stratigrafiske forhold mellem husets stolpe, hasselgrenen fra belægningen og kornet fra grøften illustreret i en simpel Harris matrix. Ældst er nederst.



The stratigraphical relationship between the post in the house, a hazel twig from the cobbled floor and a cereal grain from the ditch, illustrated via a Harris matrix. The oldest elements are at the base.

Mellem stenene i brolægningen fandtes en del forkullede hasselgrene af ensartet størrelse og tykkelse. Da der var tale om en brandtomt, er hasselgrenene tolket som en del af en fletværksvæg. En datering af en sådan gren vil svare til en datering af husets opførelse minus nogle få år.

Til huset hørte et hegnsforløb med en dobbelt hegnsgrøft. Hegnsforløbet var stratigrafisk ældre end en anden lang grønft, der kunne følges over et længere stykke. Den anden grønft må derfor være yngre end hegnsforløbene tilhørende huset og dermed være yngre end tidspunktet for husets opførelse. Der blev taget jordprøver to steder i den yngre grønft. Disse blev udtaget langt fra anlæg, der

overlejrrede eller blev skåret af grøften for at minimere risikoen for indblanding af fremmed materiale. Fra hver af de to prøver blev der dateret en kornkerne.³³ Disse antages at stamme fra en gradvis opfyldning af grøften, og dateringerne er derfor ikke udtryk for en enkelt begivenhed, men en del af en fase.

Dermed har vi en del information om prøverne og deres indbyrdes kronologiske forhold. Vækstringene i stolpen er ældre end huset, og da der mangler splintved på stolpen, er de også ældre end hasselgrenene. Hasselgrenene er fra husets vægkonstruktion, og derfor formodes de at være samtidige med husets opførelse, da der ikke er tegn på reparationer af huset. Til sidst ved vi, at dateringerne fra grøften er yngre end huset. Disse informationer er vores *priors* og er indbygget i den kronologiske model (fig. 7).

Modellen viser dels de dateringer, vi ville have fået uden at bruge en kronologisk model (lysegrå), samt de modellerede dateringer (mørkegrå). Det er tydeligt, at hasselgrenens alder, der knytter sig til husets opførelsesår, er væsentligt indsnævret. Ved 95,4% sandsynlighed ville dateringen være fra 158 f.Kr. til 8 e.Kr. uden en modellering, svarende til det meste af yngre førromersk jernalder. Den modellerede alder svarer til 91 f.Kr. til 6 f.Kr., hvilket er væsentlig bedre end den umodellerede datering for opførelsesåret. Af plottet over dateringerne og af sandsynligheden på 68,3% fremgår det yderligere, at dateringen lige omkring 50 f.Kr. er særdeles plausibel. At kunne placere huset og keramikken så sikkert inden for så kort en periode betyder, at vi bedre kan arbejde med kronologien for både keramik og huse. Derudover betyder en sikker datering af én konstruktion, bedre dateringer af andre konstruktioner, der evt. har en relation til denne. I dette tilfælde f.eks. andre huse der er ældre eller yngre end den lange grøft. Opførelsestidspunktet og ophøret for disse huse kan nu også angives mere præcist.

En middelalderkælder i Odense – et eksempel på kombination af C14 og dendrokronologi til datering af en middelalderlig bebyggelse

Eksemplet tager udgangspunkt i udgravningerne, der fandt sted i det centrale Odense i perioden 2013 til 2016.³⁴ Mere end 80 prøver blev analyseret med henblik på C14-dateringer,³⁵ og mere end 50 prøver af egetræ blev analyseret med henblik på dendrokronologisk datering.³⁶ En vurdering af tømmeret på baggrund af spor efter tømmerensamlinger m.m. viste dog, at langt det meste tømmer var genbrug, hvilket i sagens natur også gælder for de tøndestave, der blev dendrokronologisk dateret. Det vil sige, at træets alder ikke var sammenfaldende med kontekstens datering, men i alle tilfælde må betragtes som en *terminus post quem* datering af en tilhørende kontekst.

Derfor blev kombinationen af de stratigrafiske oplysninger, C14-dateringerne og de dendrokronologiske dateringer afgørende for etableringen af en absolut kronologi for udgravningen.³⁷ Det er dog ikke den overordnede kronologiske model, der er i centrum i dette eksempel. I stedet vil vi dykke ned i en konkret sekvens relateret til en af udgravningens kældre og vise, hvordan en kombination af C14-dateringerne relateret til kælderen, de stratigrafiske informationer og de dendrokronologiske dateringer af en stratigrafisk ældre latrin i en kronologisk model kan gøre C14-dateringerne til et værdifuldt redskab i arbejdet med urban middelalderarkæologi.

Ud mod Overgade, der ser ud til at have været et væsentligt gadeforløb helt tilbage til 1000-tallet, blev kælderen til et hus udgravet. Kælderen var ikke bevaret i sin fulde højde, hvilket gav nogen usikkerhed om dens alder. I forhold til de omkringliggende bygninger, belægnings og kulturlag samt den keramik, der blev fundet i relation til kælderen, blev den dog tolket til at være opført og være i brug i perioden 1250-1450. Der blev udtaget en serie jordprøver til C14-datering af de gulvlag og aktivitetsslag, der kunne iagttages inde i kælderen (fig. 8). I tidens løb havde fornyelser af gulvbelægningen – sandlag, lergulve og pikstensbelægning – betydet en akkumulering på op til 50 cm. Antagelsen var, at materialet i disse lag måtte repræsentere aktiviteten i kælderen og dermed kunne datere brugen af kælderen.



Fig. 8. Lagfølgen i kælderen ved Overgade. – Foto: Odense Bys Museer.

The stratigraphy of floor layers in the basement at Overgade.

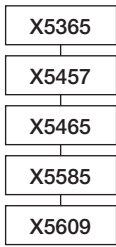


Fig. 9. C14-prøverne fra gulvlagene i kælderen og deres indbyrdes stratigrafiske relation illustreret i en simpel Harris Matrix. Den yngste prøve er øverst, den ældste er nederst.

The radiocarbon samples from the floor layers in the basement and their stratigraphy, illustrated via a Harris matrix. The oldest elements are at the base.

Fig. 10. Figuren viser de stratigrafiske relationer mellem prøverne. Rektanglerne er C14-prøverne, mens ovalerne er de dendrokronologiske prøver fra latrintønderne. De punkterede linjer angiver, at de tilhører hver deres fase. Lighedstegnene viser, at det antages, at prøverne er samtidige.

The stratigraphical relationship between all the samples included in the model: The rectangles are radiocarbon samples, and the ovals are dendrochronological samples from the latrine barrels. The dotted lines indicate phases. The equals signs indicate that the samples are interpreted as being contemporaneous.

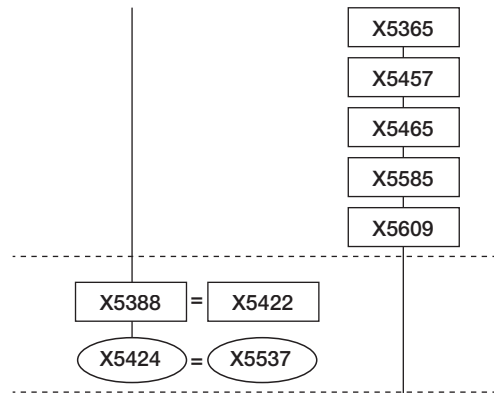


Fig. 9 viser de stratigrafiske forhold mellem gulv- og aktivitetslag repræsenteret ved de udtagne prøver. Der blev udtaget korn og årringe fra hhv. bøg og el. Den stratigrafiske relation mellem prøverne blev anset for ganske sikker, og det var derfor oplagt at anvende funktionen *sequence* i OxCal.

På grund af den omfattende og komplekse stratigrafi samt det velbevarede egetræ bød udgravningen på muligheden for at udbygge den kronologiske model yderligere. En latrin bestående af to egetræstønder, der blev tolket som stratigrafisk ældre end kælderen, blev dendrodateret til hhv. 1325-36 og 1362-1377³⁸ (fig. 10). Der blev desuden udtaget to prøver, en hasselnøddeskal (X5388) og en æblekerne (X5422) til C14-datering af tøndernes indhold. Prøverne har en lav egenalder, og da det formodes, at de kan relateres til latrinens brugstid, er en datering af nøddeskallen og æblekernen derfor en datering af latrinens indhold og brug. Dog kan det ikke siges, om indholdet stammer fra latrinens første eller sidste brug. C14-dateringen af indholdet i tønderne lå hhv. i perioden 1289-1460 og 1317-1441, begge med 95,4% sandsynlighed. Det er ikke muligt at sige præcis, hvor længe tønderne var i omløb, før de

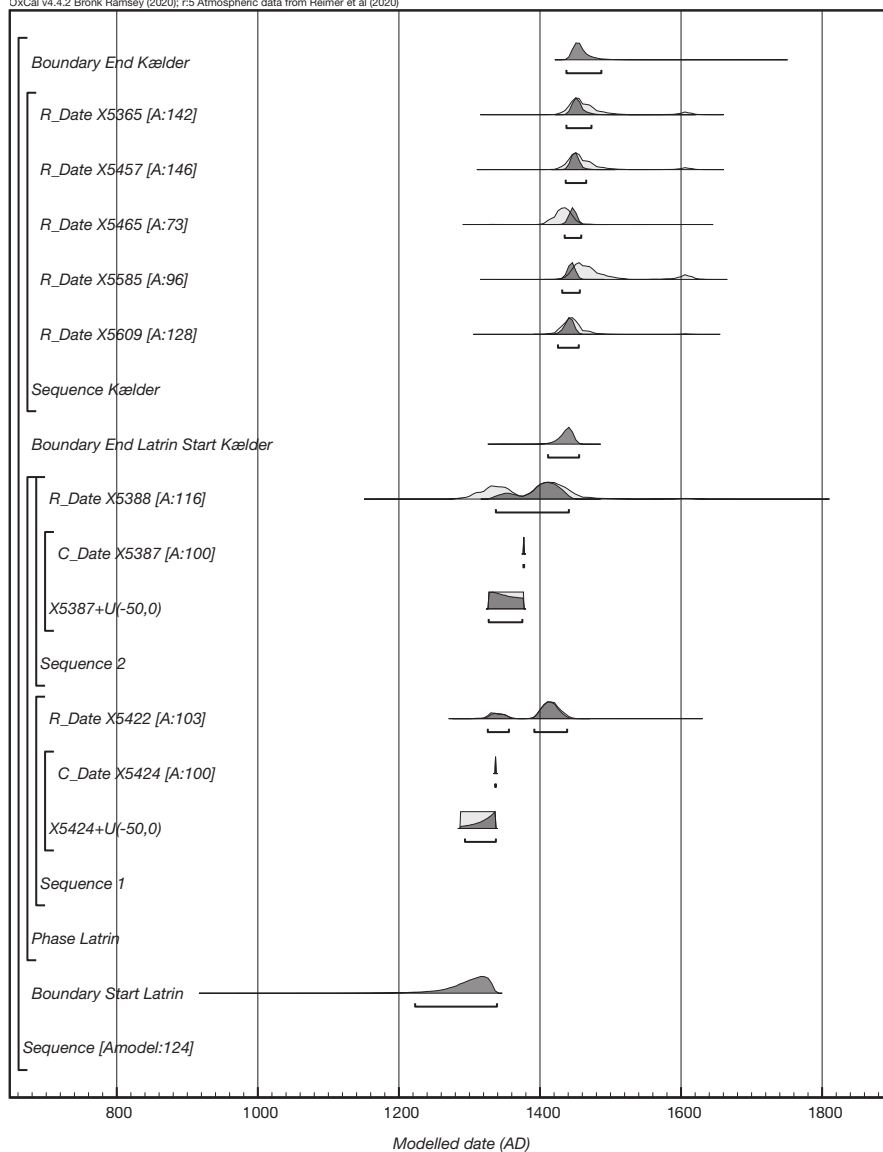


Fig. 11. Den mørkegrå skygge viser den modellerede datering, og den lyse viser den umodellede. Deraf ses, at den enkelte dateringsramme for hver kontekst i kælderen er blevet smallere i kraft af modelleringen.

The posterior probability distribution is marked in dark grey and the unmodelled calibrated dates are shown in light grey. It is evident that the dating interval of each context or floor layer in the basement is narrowed by application of the Bayesian model.

blev genbrugt som latrintønder, og det var heller ikke muligt at afgøre, om tønderne var nedsat samtidig, eller om den ene afløste den anden. På baggrund af disse usikkerheder blev C14-dateringerne og de dendrokronologiske dateringer derfor lagt ind i den kronologiske model som tilhørende samme fase. Usikkerheden i forhold til tøndernes omløbstid blev indarbejdet ved at indføre en usikkerhed på 0-50 år svarende til tøndens cirkulationstid.

Den kronologiske model (fig. 11) viser, at brugen af kælderen formentlig ikke skal dateres til 1250-1450 som først antaget, men snarere til perioden 1413-1487. Det understreger, at keramik fundet i relation til kælderen formentlig hører hjemme i den sene del af keramikens brugs- og produktionstid eller er omlejet. Det betyder også, at den indledende placering af kælderen i udgravningens fase 6c (perioden 1400-1450) måtte genovervejes i lyset af, at kælderen kunne høre til en af de efterfølgende faser, hvilket i øvrigt ikke stred imod de stratigrafiske iagttagelser. Samtidig er også det enkelte gulvlag i kælderen blevet mere snævert dateret, og modellen kan dermed være med til at datere de øvrige genstande, der blev fundet i lagene uafhængigt af de respektive genstandskronologier.

Sammenfatning

Formålet med denne artikel er at give et indblik i potentialet i bayesiansk kronologisk modellering. Vi håber, at gennemgangen af både fiktive og praktiske eksempler på metodens anvendelse i en dansk kontekst viser, at det er muligt og givtigt i højere grad at anvende de værktøjer, der er til rådighed for opbygningen af præcise og robuste kronologier.

Kronologiske modeller er dog aldrig bedre end den information, de baseres på. Ønsket om en større præcision i dateringerne er igennem hele artiklen blevet fremhævet som et af hovedformålene med bayesianske modeller. Lige så vigtig som en høj præcision er dog nøjagtigheden. Mens præcisionen angiver, hvor snævert et tidsinterval der opnås for dateringens kalibrerede eller modellerede sandsynlighedsfordeling, så angiver nøjagtigheden, at det faktiske årstal ligger inden for dette interval. Det er nemt at højne præcisionen gennem modelleringen, men hvis modelparametrene ikke afspejler de faktiske forhistoriske forhold, mister vi nøjagtigheden. Derfor kræver det også omhyggelighed i opbygningen af modellerne, og at grundlaget for de arkæologiske *priors* beskrives grundigt. Derudover må man også tage højde for, at de arkæologiske data kan være tvetydige og åbne for flere fortolkninger. Derfor kan det også være nødvendigt at konstruere flere modeller for at teste forskellige arkæologiske tolkninger indvirkning på modellens resultater. Her bliver det vigtigt at skelne,

ikke blot mellem om modellerne varierer, men om de varierer betydeligt.³⁹ En klar styrke ved bayesianske modeller er dog, at der er tale om en formaliseret tilgang, hvor resultaterne kan efterprøves. Den potentielle forbedring af vores kronologier gør, at det bestemt er en metode, der bør vinde større indpas i den arkæologiske hverdag.

Britisk arkæologi har siden starten af 1990'erne været førende inden for anvendelsen af bayesiansk kronologisk modellering. Her har Historic England (tidl. English Heritage) spillet en ikke ubetydelig rolle i at få udbredt metoden også til den brede kontraktarkæologi. Slots- og Kulturstyrelsen i Danmark har desværre ikke på samme måde været med til at fremme de nye metoder og teknologier. De økonomiske rammer for at foretage C14-dateringer, der knytter sig til museumslovens kap. 8, er generelt gode, men som vi har vist ovenfor, kan pengene bruges på en endnu mere fornuftig måde. En måde hvorpå C14-dateringerne i højere grad kan svare på de spørgsmål, vi stiller til materialet. Bayesiansk kronologisk modellering giver en mulighed for at øge C14-dateringers udsagnsværdi betragteligt ved at inkludere alle tilgængelige arkæologiske informationer. På denne måde får man et bedre udbytte med modellerede C14-dateringer,⁴⁰ samtidig med at vi får mulighed for at adressere mere komplekse problemstillinger. Endvidere kunne man ønske, at der i forbindelse med godkendelse af midler til C14-dateringer på bygherrefinansierede udgravninger, ikke blev ensidigt fokuseret på et arbitrært normtal, som f.eks. tre dateringer pr. konstruktion. Det er problematisk, da tre dateringer ikke i alle tilfælde vil kunne datere den efterspurgte begivenhed med en tilstrækkelig præcision til at svare på de opstillede problemstillinger. Hvis det i stedet kræver fire eller fem dateringer i kombination med de arkæologiske *priors* at opnå en tilstrækkelig præcis og robust kronologi til på afgørende vis at belyse de valgte problemstillinger, bør det ses som en god investering og langt mere fornuftig brug af bygherres penge. Som vi så i eksemplet med den førromerske brandtomt fra Krogsgård Mark ved Esbjerg, kan et enkelt veldateret hus være med til at højne præcisionen af den relative kronologi for andre anlæg og strukturer på lokaliteten. Det er i samme ombæring værd at huske på, at det ikke altid er dateringen af et enkelt objekt som f.eks. en hustomt, der er i fokus. Det kan derimod være den bredere datering af en bebyggelsesfase, der er interessant.⁴¹ I sådanne tilfælde vil færre C14-prøver og dermed ringere præcision i dateringen af det enkelte objekt godt kunne belyse problemstillinger omkring den overordnede kronologi på en lokalitet. Opfordringen er derfor, at antallet af C14-dateringer i højere grad afgøres af de spørgsmål, der stilles til materialet samt hvilke arkæologiske *priors*, der er mulighed for at indbygge i en kronologisk model.

Det kan forekomme vanskeligt rent praktisk at komme i gang med bayesiansk kronologisk modellering, men i første omgang er det vigtigste at kende til metoden og dens potentiale. Dernæst kan man henvende sig til sit C14-laboratorium, hvor man kan få råd og vejledning. Desuden arbejder forfatterne til denne artikel på at etablere et formelt netværk i samarbejde med Aarhus AMS Center på Aarhus Universitet, som kan danne udgangspunkt for side-mandsoplæring, sparring og erfaringsudveksling. På den måde er håbet, at kronologisk modellering kan blive et lige så naturligt redskab i arkæologien som genstandskronologier og derigennem aktivere og formalisere vores kronologiske data og få bedre udbytte af C14-dateringerne.

APPENDIKS

Museumssag	Prøvenr.	Lab. ID	Prøvemateriale	¹⁴ C alder (BP)	Kalibreret alder	Modelleret alder (posterior density estimate)	Model Agreement
Sydvestjyske Museer, SJM 380	P214	AAR- 28854	Forkullet bygkerne (nøgen byg)	2028 ± 22	46 BC (68,3%) 10 AD 95 BC (95,4%) 60 AD	51 (68,3%) 9 BC 56 BC (95,4%) 23 AD	110,8%
Sydvestjyske Museer, SJM 380	P227	AAR- 28855	Forkullet bygkerne (nøgen byg)	2045 ± 21	91 BC (68,3%) 8 AD 147 BC (95,4%) 24 AD	53 BC (68,3) 1 BC 59 BC (95,4) 16 AD	121,2%
Sydvestjyske Museer, SJM 380	X264	AAR- 28860	Forkullet yngre gren/kvist af hassel, 5 årringe.	2064 ± 23	104 BC (68,3%) 2 AD 158BC (95,4%) 8 AD	60 BC (68,43) 40 BC 91 BC (95,4) 6 BC	126,4%
Sydvestjyske Museer, SJM 380	A151-A	AAR- 28861	Uforkullet stammestykke af Eg. Ingen splint.	2045 ± 26	93 BC (68,3%) 9 AD 151 BC (95,4%) 56 AD	97 BC (68,3) 68 BC 122 BC (95,4) 61 BC	67,6%
Sydvestjyske Museer, SJM 380	A151-D	AAR- 29492	Uforkullet stammestykke af Eg. Ingen splint.	2082 ± 25	149 BC (68,3%) 48 BC 170 BC (95,4%) 2 AD	87 BC (68,3) 58 BC 112 BC (95,4) 51 BC	122,5%
Sydvestjyske Museer, SJM 380	A151-E	AAR- 29493	Uforkullet stammestykke af Eg. Ingen splint,	2071 ± 23	147 BC (68,3%) 43 BC 158 BC (95,4%) 5 AD	75 BC (68,3) 46 BC 100 BC (95,4) 39 BC	129,9%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5365	Poz-76019	Trækul, el. To årringe fra gren eller stamme	425 ± 30	1438AD (68.3%) 1475AD 1425AD (89.2%) 1506AD 1595AD (6.3%) 1618AD	1444AD (68.3%) 1458AD 1437AD (95.4%) 1472AD	142,1%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5388	AAR-25948	Hasselnøddeskal	534 ± 66	1322AD (24.9%) 1356AD 1391AD (43.4%) 1441AD 1294AD (95.4%) 1467AD	1386AD (68.3%) 1436AD 1337AD (95.4%) 1440AD	116,4%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5422	AAR-25949	Æblekerne	531 ± 33	1396AD (68.3%) 1434AD 1323AD (20.0%) 1355AD 1392AD (75.4%) 1441AD	1396AD (68.3%) 1431AD 1326AD (19.8%) 1356AD 1392AD (75.6%) 1438AD	103%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5457	Poz-76020	Forkullet rugkerne	430 ± 30	1436AD (68.3%) 1472AD 1423AD (91.6%) 1500AD 1600AD (3.8%) 1615AD	1442AD (68.3%) 1456AD 1436AD (95.4%) 1465AD	145,9%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5465	Poz-76021	Trækul, bøg. Tre-fire årringe fra gren eller stamme	480 ± 30	1421AD (68.3%) 1446AD 1406AD (95.4%) 1456AD	1440AD (68.3%) 1452AD 1434AD (95.4%) 1458AD	72,6%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5585	Poz-76022	Forkullet rugkerne	415 ± 30	1440AD (68.3%) 1485AD 1429AD (84.2%) 1515AD 1590AD (11.2%) 1620AD	1438AD (68.3%) 1450AD 1431AD (95.4%) 1456AD	96,3%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5609	Poz-76024	Forkullet rugkerne	450 ± 30	1430AD (68.3%) 1456AD 1413AD (95.4%) 1480AD	1434AD (68.3%) 1448AD 1425AD (95.4%) 1454AD	127,8%
Odense Bys Museer, OBM9776	X5387	D013222a	Tøndestav, eg. Mulig overgang mellem kerneved og splintved bevaret		ca. 1362-77 e.Kr. (Dendrodatering)	1327AD (68.3%) 1360AD 1327AD (95.4%) 1374AD	
Odense Bys Museer, OBM9776	X5424	D013225a/ D013226a	Tøndestave, eg. Begge med bevaret splintved.		ca. 1325-36 e.Kr. (Dendrodatering)	1315AD (68.3%) 1337AD 1293AD (95.4%) 1337AD	

NOTER

1. Boye 2019, s. 282f.
2. Ifølge AUD (Arkæologiske Udgravninger i Danmark) blev der i perioden 1986 til 2001 udført 2147 dendrokronologiske analyser af materiale fra udgravninger, der relaterede sig til middelalder eller nyere tid. I samme periode blev der udført 247 C14-analyser på materiale, der relaterede sig til middelalder eller nyere tid. Det er forfatterens opfattelse, at denne tendens er fortsat, selvom der ikke længere føres en national oversigt.
3. Kulstofisotoperne C12, C13 og C14 fraktioneres i kulstofkredsløbet, da f.eks. planter optager færre C13- end C12-atomer fra luftens kuldioxid via fotosyntese. Fraktioneringen af kulstofisotoperne måles ved en bestemmelse af forholdet (ratioen) mellem de to stabile isotoper C12 og C13. Resultatet angives som en $\delta^{13}\text{C}$ værdi, som bruges til korrektionen. Se også Olsen et al. 2008, s. 9.
4. Reimer et al 2020.
5. Kanstrup & Olsen 2020.
6. En *outlier* er et statistisk begreb, der dækker over ekstreme værdier eller observationer, der afviger mistænkeligt meget fra det øvrige datasæt. I forbindelse med C14-dateringer må vi regne med, at ca. én ud af tyve dateringer ligger uden for det angivne 95,4% sandsynlighedsinterval.
7. Bronk Ramsey 2009b.
8. Se f.eks. Haase & Olsen 2021, Torfing 2019, Hansen 2015, Villumsen 2013, Waterbolk 1971.
9. Bayliss 2009, s. 130f; Whittle et al. 2011, s. 18.
10. Bayes 1783.
11. Bl.a. Christen 1994; Buck et al. 1996 og Bronk Ramsey 2009a.
12. OxCal: Bronk Ramsey 1994; 1995; 2009a; 2017; Bcal: Buck et al. 1999; Chrono-Model: Lanos & Dufresne 2019.
13. Bayliss 2015, s. 678; Hamilton & Krus 2018, s. 189.
14. Paulsson 2010; 2014.
15. Paulsson 2015; 2017.
16. Torfing 2015.
17. Hornstrup et al. 2012.
18. Herschend 2016; 2017.
19. Rose 2020.
20. F.eks. Rose, Meadows & Bjerregaard 2018; Daly & Bork-Pedersen 2018; Dahlström et al. 2018; Haase & Olsen 2021, Croix et al. 2019.
21. Man kan simulere C14-dateringer med udgangspunkt i kendt kalenderår ved at bruge *R_simulate* funktionen i OxCal.
22. Bayliss 2009, s. 127ff.
23. Alle kalibreringer af C14-dateringer og de kronologiske modeller er lavet i OxCal ver. 4.4 (Bronk Ramsey 2009a) med anvendelse af IntCal20 kalibreringskurven (Reimer et al. 2020).
24. Bronk Ramsey 2009a, s. 343ff.
25. Se bl.a. Bayliss 2007, s. 78.
26. Bronk Ramsey 1995, s. 429.

27. Bronk Ramsey 2009b.
28. Bronk Ramsey 2009b, s.7f.
29. Dee & Bronk Ramsey 2014, Rose et al. 2020.
30. Bronk Ramsey 2009a, s. 346.
31. Bronk Ramsey 2009a, s. 345f; Lee & Bronk Ramsey 2014; se også Torfing 2019, s. 47ff for en alternativ fremgangsmåde.
32. Krogsgårdmark II. SJM 380 II, sb 190513-123. I forbindelse med anlæggelsen af Cobrakablet blev en del af et bebyggelsesområde fra ældre jernalder udgravet. Udgravningen omfattede flere sikre hustømter samt ovnanlæg. Den ene ovn og flere hustømter blev skåret af den i artiklen omtalte grøft fra tiden lige før vor tidsregning. Lokaliteten lå lavt i landskabet ned mod en marsk-eng.
33. Fuld information om alle prøver er samlet i appendix A.
34. Haase 2017.
35. Haase & Olsen 2021.
36. Daly 2015; 2016.
37. Haase & Olsen 2021.
38. Daly 2015.
39. Bayliss 2009, s. 134; Buck & Meson 2015, s. 9.
40. Se også Bayliss 2007, s. 83.
41. Se f.eks. Hansen 2015, s. 54ff.

LITTERATUR

- Bayes, T.R. 1763: An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 53, s. 370–418.
- Bayliss, A. 2007: Bayesian Buildings: An Introduction for the Numerically Challenged. *Vernacular Architecture* 38, s. 76–87.
- Bayliss, A. 2009: Rolling Out Revolution: Using Radiocarbon Dating in Archaeology. *Radiocarbon* 51(1), s. 123–147.
- Bayliss, A. 2015: Quality in Bayesian Chronological Models in Archaeology. *World Archaeology* 47(4). s. 677–700.
- Boye, L. 2019: *Den typologiske udvikling af østsjællandske huse fra førromersk til germansk jernalder*. Upubliceret ph.d. afhandling, Københavns Universitet.
- Bronk Ramsey, C. 1994: Analysis of Chronological Information and Radiocarbon Calibration: The Program OxCal. *Archaeological Computing Newsletter*, 41, s. 11–16.
- Bronk Ramsey, C. 1995: Radiocarbon Calibration and Analysis of Stratigraphy: The OxCal Program. *Radiocarbon* 37(2), s. 425–430.
- Bronk Ramsey, C. 2009a: Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. *Radiocarbon* 51(1), s. 337–360.
- Bronk Ramsey, C. 2009b: Dealing with Outliers and Offsets in Radiocarbon Dating. *Radiocarbon* 51(3), s. 1023–1045.
- Bronk Ramsey, C. 2017: Methods for Summarizing Radiocarbon Datasets. *Radiocarbon* 59(6), s. 1809–1833.
- Buck, C.E., W.G. Cavanagh & C.D. Litton 1996: *Bayesian Approach to Interpreting Archaeological Data*. Chichester: Wiley.

- Buck, C.E., J.A. Christen & G.N. James 1999: BCal: an on-line Bayesian radiocarbon calibration tool. *Internet Archaeology*, 7(7).
- Buck, C.E. & B. Meson 2015: On being a good Bayesian. *World Archaeology* 47(4), s. 567-584.
- Christen, J.A. 1994: Summarizing a Set of Radiocarbon Determinations: a Robust Approach. *Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 43(3), s. 489-503.
- Croix S., O.E. Gundersen, S.M. Kristiansen, J. Olsen, S.M. Sindbæk & M. Søvsø 2019: Dating earthwork fortifications: Integrating five dating methods in Viking-age Ribe, Denmark. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, s. 1-11.
- Dahlström, H., B. Poulsen & J. Olsen 2018: From a Port for Traders to a Town of Merchants: Exploring the Topography, Activities and Dynamics of Early Medieval Copenhagen. *Danish Journal of Archaeology*. 7(1), s. 69-116.
- Daly, A. 2015: Dateringsundersøgelse af tømmer fra Thomas B Thriges gade, Dendro fase 1, dendro.Dk, København, Odense.
- Daly A. 2016: Dateringsundersøgelse af tømmer fra Thomas B Thriges gade, Dendro fase 2, dendro.Dk, København, Odense.
- Daly, A. & K. Bork-Pedersen 2018: Wiggle-match dating the fortification of Køge, *Danish Journal of Archaeology*, 7(2), s. 1-14.
- Dee, M.W. & C. Bronk Ramsey 2014: High-Precision Bayesian Modeling of Samples Susceptible to Inbuilt Age. *Radiocarbon* 56(1), s. 83-94.
- Haase, K. 2017: OBM9776 I. Vilhelm Werners Plads Odense sogn, Odense herred, tidl. Odense amt. Sted nr.08.04.07-Kampagne 16-05-2013.
- Haase, K. & J. Olsen 2021: Building a high-resolution chronology of a medieval urban site through Bayesian modelling. *Archaeometry*.
- Hamilton, W.D. & A.M. Krus 2018: The Myths and Realities of Bayesian Chronological Modeling Revealed. *American Antiquity* 83(2), s. 187-203.
- Hansen, J. 2015: *Landsbydannelse og bebyggelsesstruktur i det 1. årtusinde – et bebyggelsehistorisk regionalstudie*. Upubliceret ph.d. afhandling, Syddansk Universitet.
- Herschend, F. 2016: Towards a standardized discussion of priors in Bayesian analyses of ¹⁴C dated archaeological periods: A study based on the dates from Gjøsund. *Journal of Archaeology and Ancient History* 19, s. 3-28.
- Herschend, F. 2017: Askim-tunets kronologi. En tillämpad bayesiansk analys. *Viking. Norsk Arkeologisk Årbok* 80, s. 25-38.
- Hornstrup, K.M., J. Olsen, J. Heinemeier, H. Thrane & P. Bennike 2012: A New Absolute Danish Bronze Age Chronology – as based on Radiocarbon Dating of Cremated Bone Samples from Burials. *Acta Archaeologica*. 83(1), s. 9-53.
- Kanstrup, M. & J. Olsen 2020: Nye kalibreringskurver – betyder det noget? *Arkeologisk Forum* 43, s. 25-28.
- Lanos Ph. & Ph. Dufresne 2019: *ChronoModel version 2.0: Software for Chronological Modelling of Archaeological Data using Bayesian Statistics*. <https://chronomodel.com>.
- Paulsson, B.S. 2010: Scandinavian Models: Radiocarbon Dates and the Origin and Spreading of Passage Graves in Sweden and Denmark. *Radiocarbon*. 52(3), s. 1002-1017.
- Paulsson, B.S. 2015: Ess, Östra Odarslöv 13:5, Odarslövs Socken, Skåne, Radiocarbon Dating And Bayesian Chronological Modelling, report 3/2015. I: K. Brink &

- S. Larsson (red.): *Östra Odarslöv 13:5, ESS-området, Fortid möter framtid*, vol. 3, s. 198-233.
- Paulsson, B.S., M. Andersson, M. Artursson, K. Brink 2017: A Highly Precise Chronology For The Process Of Neolithization In Southern Scandinavia: The Ess Project In Lund, Sweden. *Radiocarbon* 59(2), s. 1-11.
- Reimer, P., W. Austin, E. Bard, A. Bayliss, P. Blackwell, C. Bronk Ramsey, M. Butzin, H. Cheng, R. Edwards, M. Friedrich, P. Grootes, T. Guilderson, I. Hajdas, T. Heaton, A. Hogg, K. Hughen, B. Kromer, S. Manning, R. Muscheler, J. Palmer, C. Pearson, J. van der Plicht, R. Reimer, D. Richards, E. Scott, J. Southon, C. Turney, L. Wacker, F. Adolphi, U. Büntgen, M. Capano, S. Fahrni, A. Fogtmann-Schulz, R. Friedrich, P. Köhler, S. Kudsk, F. Miyake, J. Olsen, F. Reinig, M. Sakamoto, A. Sookdeo & S. Talamo 2020: The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4), s. 725-757.
- Rose, H.A. 2020: Bayesian Chronological Modelling of the Early Iron Age in Southern Jutland, Denmark. PhD afhandling, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:8:3-2021-00213-9>).
- Rose, H.A., J. Meadows & M. Bjerregaard 2018: High-Resolution Dating of a Medieval Multiple Grave. *Radiocarbon*. 60(5), s. 1547-1559.
- Rose, H.A., J. Meadows & M.B. Henriksen: 2020. Bayesian Modeling of Wood-Age Offsets in Cremated Bone. *Radiocarbon*. 62(2), s. 379-401.
- Torfiing, T. 2015: A new time: Bayesian models of an Early Neolithic enclosure in North-Western Denmark. *Danish Journal of Archaeology* 4(2), s. 109-124.
- Torfiing, T. 2019: Hvorfor er der korn i mit stolpehul? Diskussion af C14-dateringer af huse og et bud på en løsning. *Arkæologisk Forum* 40, s. 43-50.
- Waterbolk, H.T. 1971: Working with Radiocarbon Dates. *Proceedings of the Prehistoric Society* 37(2), s. 15-33.
- Whittle, A., F. Healy, & A. Bayliss 2011: *Gathering Time: Dating the Early Neolithic Enclosures of Southern Britain and Ireland*. Oxford: Oxbow.
- Villumsen, S. 2013: Hvad vi daterer, når vi daterer huse. *Arkæologisk Forum* 28, s. 19-22.

Bayesian chronological modelling in Danish archaeology

In Danish archaeology, radiocarbon dating has become an integrated part of the archaeological toolbox. A certain scepticism towards the accuracy of the method means, however, that it often remains a supplement to archaeological interpretation and other informal dating methods.

Bayesian modelling counters this scepticism by combining radiocarbon dating with archaeological observations and other dating methods such as stratigraphy, dendrochronology and numismatic dating. Based on data from sources such as these, a Bayesian model calculates the statistical probability distribution of individual radiocarbon dates. Because the modelled dates consider all available information relating to the samples and their context, they can produce more accurate, robust dates and chronologies than those based on simple calibrated dates. Moreover, through Bayesian modelling, it is possible to estimate the dates of events that cannot be dated directly, such as the beginning or end of a settlement phase.

The benefits of implementing Bayesian modelling in Danish archaeology are considerable. However, given that it can seem confusing and difficult to comprehend, in the following we will introduce the method by presenting and discussing some examples of Bayesian modelling.

Radiocarbon dates are probabilistic, which means that each radiocarbon measurement holds considerable uncertainty. Each radiocarbon date is expressed as a bell-shaped normal distribution around a median (fig. 1). The date is reported as a radiocarbon age and a standard deviation (e.g. 1690 BP \pm 30 years). The uncertainty

of the radiocarbon measurement is often increased through calibration to calendar years by matching with the wiggles and plateaus of the calibration curve. Since calibrated radiocarbon dates are distributed around the radiocarbon sample's actual age, a visual assessment of the calibration plot will often lead to misinterpretation of the date of specific events or the beginning, end, or duration of phases. Bayesian statistics is a way of countering these uncertainties and misinterpretations. In the following, we use the calibration program OxCal.

The first example is a fictional case where ten simulated radiocarbon dates, corresponding to known years at 10-year intervals between AD 970 and 1060, are calibrated (fig. 2). From a visual assessment of the calibrated dates, it seems they are contemporaneous since the probability distribution of each individual date is up to 200 years. The wide probability distribution blurs the fact that the events are each ten years apart. If we add the prior information that the events form a sequence in which sample A is older than sample B etc., the modelled dates then display narrower probability distributions (fig. 3). These are called posterior probability distributions. A so-called Boundary is added to the model to limit the sequence and mark the first and last non-dated event, since it is unlikely that a sample representing the first and last event in a sequence has been taken.

Stratigraphic information is termed an informative prior, while an uninformative prior represents a situation where the only information about the samples is that they

belong to the same phase. Uninformative priors are illustrated by five samples from the postholes of an Iron Age house. The house had been in use for 30 years. The simulated dates are then placed within a 30-year period (fig. 4). Again, the unmodelled dates blur the actual duration of the use-phase of the house. The prior information that the samples are interpreted as being contemporaneous is now added to the model using the Phase command. The model then estimates when the use of the house began and when it ended. In OxCal, the Agreement Index, A, is an indicator of the match between the data and the model. It is based on the overlap of the calibrated probability distribution and the posterior distributions. An Agreement Index below 60% is an indication of a problematic sample. An Agreement Index is also calculated for the whole model (A_{model}).

In a more complex example, stratigraphical information regarding the Iron Age house is added. Samples from a stratigraphically younger house and a younger pit are added to the model as two phases in a sequence (fig. 5). The three samples from the pit are regarded as being contemporaneous, and the 'combine' command is used.

In the simulated example, five samples are enough to create a robust model for a house's use-phase. But the number of samples needed also depends on where on the calibration curve the dates end up, and a small number of samples may be compensated for by strong priors.

The following example is not simulated but from the excavation of an Iron Age house. Three samples were taken from a roof-bearing post. The samples were taken from growth rings spaced, respectively, 10 and 12 years apart. The charred remains of hazel wattle were found between the stones in the cobbled floor (fig. 6). The hazel was interpreted as the remains of the wattle walls of the excavated house.

Two ditches surrounding the house were sampled, one of which was stratigraphically older than the other. The samples and the prior information were combined in a Bayesian model. The house's date was narrowed from 158-8 BC to 91-6 BC (fig. 7).

The final example is from the excavation of a medieval house in a town (fig. 10). Five samples from the floors in the house's basement were added in a Bayesian model (fig. 9). The floors superseded each other. Moreover, two dendrochronological samples from latrine barrels, older than the house, and samples from the barrels' content were added to the model (fig. 10). Based on the archaeological interpretation, the use of the house was dated to between AD 1250 and 1450. However, the model showed that it was more likely to have been in use between AD 1413 and 1487 (fig. 11). This new date suggests that the potsherds found in the floor layers were redeposited.

These examples demonstrate the considerable potential of Bayesian modelling. However, they also show that it is essential to exercise great care in constructing the model and providing a thorough account of the archaeological priors. It may be necessary to create several models to test the priors' robustness or to test different priors. Bayesian modelling presents a systematic and formalised way to test various archaeological interpretations.

*Sune Villumsen
Mathias Søndergaard
Museum Sydøstdanmark*

*Kirstine Haase
Odense Bys Museer*

*Tobias Tørfing
Sydvestjyske Museer*

*Helene Agerkov Rose
Zentrum für Baltische und
Skandinavische Archäologie (ZBSA),
Landesmuseen Schleswig-Holstein*