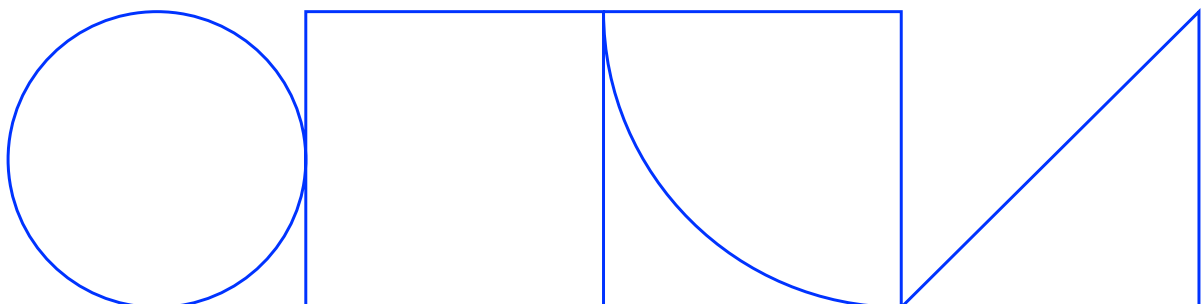


Förenklad inmätning av värme- och fuktbeteende i betong för PPB

Slutrapport

Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic
Ted Rapp, Byggföretagen
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB
Fredrik Gränne, NCC Sverige AB
Mattias Gunnarsson, Peab Sverige AB

2025-10-21

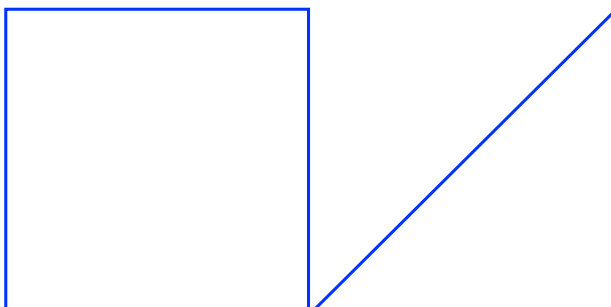


Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till branschrepresentanter som deltagit i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet, och ett mer specifikt tack till

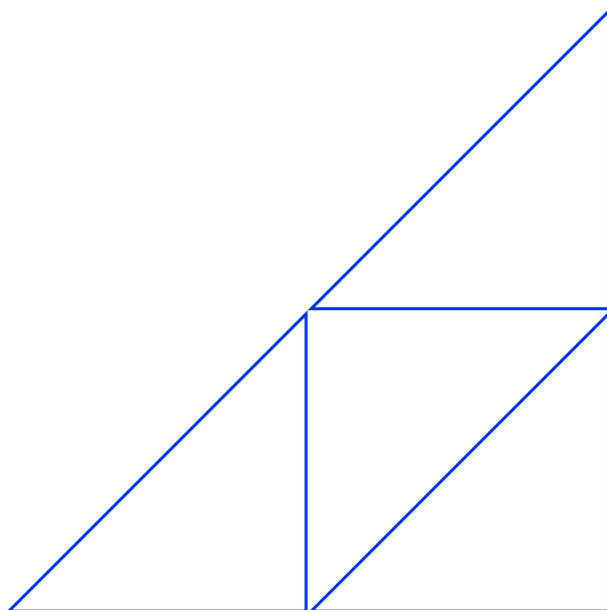
- Skanska Sverige AB
- NCC Sverige AB
- Peab Sverige AB

Projektets arbetsgrupp vill slutligen rikta ett stort och varmt tack till SBUF för finansiering av detta projekt.



Sammanfattning och slutsatser

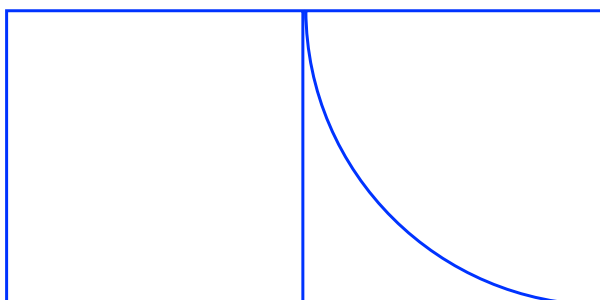
Denna rapport sammanfattar projektet SBUF 14165 *Förenklad inmätning av värme- och fuktbeteende i betong för PPB*. I rapporten presenteras en utredning av hur väl en ny materialmodell fungerar och om detta kan utnyttjas i större skala i beräkningstekniska tillämpningar. Utredningen konstaterar att den nya modellen har en klart bättre potential och tillfredsställande resultat avseende kemiskt bundet vatten och tryckhållfasthet, men att modelleringen av hydratationsvärme inte kan ses som tillräckligt bra. Med anledning av hur denna modell är konstruerad påverkar problemen med hydratationsvärmen modellens totalprestanda och gör den inte lämplig att använda i någon större skala ännu. Detta innebär att projektets specifika mål med att ta fram metod för förenklad inmätning av kemiskt bundet vatten samt föreslå att en reducerad variant av modellen för endast värme och tryckhållfasthet ersätter den gamla modellen inte kan nås. Projektet föreslår slutligen åtgärder som skulle kunna avhjälpa problemet och frigöra modellens fulla potential för praktisk användning.



Innehåll

Förord	1
Sammanfattning och slutsatser	2
1. Inledning	5
1.1 Kort bakgrund och syfte	5
1.2 Rapportens struktur	5
2 Projektets genomförande	6
2.1 Möten	6
2.1.1 Startmöte	6
2.1.2 Avslutningsmöte	6
2.2 Utredning	6
3 Utredning och resultat	7
3.1 Detaljerad bakgrund	7
3.2 Utredningens utgångspunkt	9
3.2.1 Den nya hydratationsmodellen	9
3.2.2 Hydratationsberoende egenskaper	11
3.2.3 Materialtekniska resonemang	11
3.2.4 Använda mätdata	13
3.2.5 Anpassning av parametrar	14
3.2.6 Felmått	14
3.2.7 Referens	14
3.2.8 Tilltänkt utredningsförfarande	14
3.3 Referens	15
3.3.1 Diskussion	17
3.4 Vatten, värme och hållfasthet ihop	18
3.4.1 Existerande anpassning av kemiskt bundet vatten	18
3.4.2 Initial anpassning av hydratationsvärme	20
3.4.3 Finjustering av parametrar för hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten	22
3.4.4 Hållfasthet – analys	26
3.4.5 Hållfasthet – anpassning	30
3.4.6 Diskussion	31
3.5 Värme och hållfasthet	33
3.5.1 Hållfasthet som start	33
3.5.2 Initial anpassning av hydratationsvärme	34
3.5.3 Finjustering av parametrar	34

3.5.4	Diskussion	38
4	Slutsatser & rekommendationer	39
	Referenser	39
	Bilagor	40



1. Inledning

1.1 Kort bakgrund och syfte

En rad SBUF-projekt (12563, 13064, 13197, 13198, 13140 samt 13766) har resulterat i inmätta fundamentalegenskaper för betong avseende hydratation och fukt, revidering av gamla materialmodeller och framtagning av nya inom samma område. Resultaten avseende beräkning av uttorkning samt utbyte av fukt i betongbaserade golvsystem har implementerats i det branschgemensamma predikteringsverktyget Produktionsplanering betong (PPB). Ett utav resultaten omfattade en ny hydratationsmodell med kopplingar till egenskaper som kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme samt tryckhållfasthet, presenterad i doktorsavhandlingen Stelmarczyk 2023. Denna modells validering hade huvudsakligen inriktat sig mot mätdata för kemisk bindning av vatten och omfattade endast en enklare arbetsversion av hydratationsvärme och tryckhållfasthet. För en mer detaljerad teknisk bakgrund se kapitel 3.1.

Syftet med detta projekt är att skapa en förenklad metod för inmätning av förmåga till kemisk bindning av vatten i betong, vilket är en huvudkomponent i betongens självuttorkning. Detta skall ske genom vidareutbyggnad av den nya hydratationsmodellen, dels för att bredda dess användning och bas men främst för att koppla modellering av kemisk bindning av vatten, hydratationsvärme och hållfasthet närmare varandra. Om detta kan åstadkommas tillräckligt bra skall vidare förenkling av mätmetodik för kemiskt bundet vatten undersökas. Den nya modellen skall också undersökas avseende tillämpbarhet i en förenklad tappning då endast hållfasthet och hydratationsvärme modelleras för tillämpningar avseende simulering av temperaturutveckling och hållfasthetstillväxt.

Om dessa mål inte kan uppfyllas är det tanken att projektet skall analysera varför och vilka åtgärder som skulle rekommenderas för vidare anpassning av modellen i syfte att uppfylla dessa mål.

1.2 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i fyra delar:

- Inledning
- Projektets genomförande – här redovisas hur projektet genomfördes
- Utredning och resultat – här redovisas steg för steg projektets utredande arbete, de successivt framtagna resultaten samt en diskussion och initiala slutsatser
- Slutsatser och rekommendationer – här redovisas vad projektet kommit fram till och vad projektet rekommenderar avseende uppföljningsarbete.

Rapporten innehåller även två bilagor.

2 Projektets genomförande

2.1 Möten

2.1.1 Startmöte

Ett startmöte ägde rum 2022-11-01 med medlemmar i styr- och arbetsgruppen som deltagande. Projektets innehåll presenterades och diskuterades inkl. de berörda materialmodellerna. Planering togs fram för genomförande och projektet startades.

2.1.2 Avslutningsmöte

Ett avslutningsmöte för projektet ägde rum 2025-10-21 med medlemmar i styr- och arbetsgruppen som deltagande. På mötet diskuterades projektresultaten. Slutligen fastställdes även denna rapport och projektet avslutades.

2.2 Utredning

Utredningen startade enligt plan. Indikation erhöles så småningom genom anpassningar till mätdata att projektmålen med förenklad inmätning av kemiskt bundet vatten resp. rekommenderad användning av den nya modellen för värme och hållfasthet baserat på nuvarande data inte skulle kunna nås. Den informationen som fanns för hydratationsvärme i form av mätdata från semi-adiabatisk kalorimetri möjliggjorde inte den analys som skulle krävas för att föreslå en tillräcklig bra ansats för värmemodell för att få önskad nivå av totalprestanda i den nya modellen. Eftersom detta kunde konstateras redan för mätdata för det gamla Bascementet justerades fokus i undersökningen. I stället för att ta in mätdata för endast värme och hållfasthet för andra recept lades resurser på att utföra samtliga anpassningar i den nya modellen där parametrar för hydratationsgrad delades mellan olika egenskaper för två olika varianter av modell för hydratationsvärme. Detta bedömdes ge mer intressant information inför diskussion, slutsatser och eventuellt framtida utveckling av modellen i stället för upprepning av inte tillräckligt tillfredsställande resultat för andra recept. Efter slutförd utredning dokumenterades resultaten i form av denna rapport. Rapporten granskades och godkändes av arbets- och styrgruppen.

3 Utredning och resultat

Detta kapitel redovisar det arbetet som utförts i projektet. Det börjar med en kort beskrivning av bakgrunden och olika tidigare projektresultat som fungerar som startpunkt för den utförda undersökningen. Sedan redovisas det tilltänkta angreppssättet med tillhörande resonemang kring olika utredningsaspekter som metod, typ och kvalitet av tillgängliga mätdata, referens att jämföra resultaten mot etc. Slutligen följer en genomgång av olika delar i själva utredningen med både genomförandet, resultaten samt en därtill kopplad diskussion.

3.1 Detaljerad bakgrund

Bakgrunden till denna utredning omfattar sex, nedan listade, SBUF-projekt:

- SBUF 12563 *Branschgemensamma behov för prognoser av hårdning och uttorkning i betong*
- SBUF 13064 *Förstudie och metodutveckling för implementering av fuktberäkningsmodul i datorprogrammet Produktionsplanering Betong*
- SBUF 13197 *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong*
- SBUF 13198 *Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*
- SBUF 13140 *Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering*
- SBUF 13766 *Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering del 2*

I SBUF 12563 genomförd entreprenörerna en branschgemensam inventering av aktuella och framtida behov för lättanvända och branschgemensamma prognosverktyg. Utredningen omfattade hårdning (temperatur och hållfasthet) och uttorkning i betongkonstruktioner. På lång sikt bedömdes att ett branschgemensamt verktyg även ska omfatta bedömning och planering av temperatursprickbegränsande åtgärder i hårdnande betongkonstruktioner.

Inom SBUF 13064 utreddes branschens dåvarande behov av simulering av uttorkning i betong. Denna förstudie tittade även på existerande materialdata, materialmodeller samt beräkningsmetodik och verktyg mot bakgrund av branschens behov på området. Detta resulterade i konstateranden om behov av nya materialdata, reviderade materialmodeller samt ett nytt verktyg för simulering av uttorkningsförlopp. Revideringen av gamla materialmodeller och framtagning av nya skedde inom ramen för SBUF 13140 och SBUF 13766 och resulterade i en doktorsavhandling på området, se *Stelmarczyk 2023*. Nya materialdata, baserade på omfattande nya mätningar, togs fram inom SBUF 13198. Slutligen togs det nya verktyget fram, som en del i branschens gemensamma verktyg Produktionsplanering betong, inom ramen för SBUF 13197.

Vid den ovan nämnda revideringen av materialmodeller bakom simuleringen av uttorkning, togs det fram nya materialmodeller för:

- kemiskt bindning av vatten, med bakomliggande modell för hydratation
- sorption av vatten
- transport av vatten

Den framtagna modellen för kemiskt bundet vatten baserade sig på en ny modell för hydratation. Denna hydratationsmodell använder sig av hydratationsgrad som huvudsaklig processvariabel, till skillnad från den tidigare använda temperaturekvivalenta mognadsåldern.

Mognadsåldern används traditionellt som processvariabel, då den är relativ enkel att mäta in och ger ett bra mått på hur hydratationsprocessen varierar med temperatur i början av förloppet. Tyvärr har denna modellering två nackdelar. Den första har att göra med modelleringen av senare delar av hydratationen. Den temperaturekvivalenta mognadsålder är i princip en klocka som tickar med en hastighet som är temperaturberoende och den slutar aldrig att ticka. Den tar inte hänsyn till att bindemedel och vatten förbrukas och följaktligen erbjuder inte den någon bra modellering av slutet av hydratationsprocessen. Det andra problemet har att göra med kvaliteten på hydratationsprocessen och dess resultat. Det är sedan länge känt att temperaturen påverkar inte bara hydratationsprocessens hastighet utan även kvaliteten hos den resulterande betongen. Sluthållfastheten har en tendens att bli högre om betongen får hydratisera långsammare, dvs. vid lägre temperatur. Detta fenomen har modellerats i beräkning av hållfasthetstillväxt i både Hett97, ConTeSt Pro samt PPB.

Forskningsresultat tyder på att samma fenomen tycks påverka kemisk bindning av vatten, se *Gallucci m.fl. 2013*, vilket även de omfattande mätningarna i SBUF 13198 bekräftade. Faktum att olika mängd vatten binds per given mängd reagerat bindemedel vid olika temperaturer medför även en direkt misstanke att den frisläppta hydratationsvärmen påverkas. Detta då entalpin för den kemiska reaktionen borde påverkas när olika mängd av reagerande molekyler är inblandade.

Den nya hydratationsmodellen, som dokumenterats i *Stelmarczyk 2023*, skippar mognadsåldern som processvariabel och använder sig i stället av bindemedelsrelaterad hydratationsgrad, dvs. ett tal mellan 0 och 1. Det uttrycker hur stor andel av bindemedlet som har reagerat med vatten. Detta ger modellen ett matematiskt mer direkt mått på hur långt hydratationen fortskridit, vilket lägger grunden till förutsättningen att modellen fungerar bättre för den senare delar av hydratationsprocessen. Detta löser även problemet med modellering av slutet av hydratationsprocessen, då hydratationsgraden slutar att öka när betongen har hydratiserat färdigt, i stället för den evigt tickande mognadsåldern. Modellen för kemiskt bundet vatten definierar vidare en alternativ, vattenrelaterad hydratationsgrad. Den är ett relativt mått på hur mycket vatten som deltagit i de kemiska reaktionerna med bindemedlen. Denna variabel har två temperaturberoenden. Det första, indirekta beroendet genom att den baseras på bindemedlets hydratationsgrad, återspeglar temperaturberoende hos reaktionshastigheten. Detta motsvarar det temperaturberoende som finns i mognadsåldern. Det andra, direkta beroendet av temperatur, återspeglar temperaturens inverkan på betongens kvalitet, i detta fall på hur mycket vatten som binds per mängd reagerat bindemedel.

Den nya hydratationsmodellen med sin vidare koppling till kemiskt bundet vatten har visats ge en klart bättre överensstämmelse med det uppmätta beteendet, se *Stelmarczyk 2023*. Hur denna modell vidare kan kopplas till andra hydratationsberoende variabler som hydratationsvärme och hållfasthet har inte utretts tidigare i någon större omfattning. Det existerar visserligen en förenklad modell som används idag inom ramen för uttorkningssimulering i PPB men den är att betrakta som en arbetsversion. Utredningen i detta projekt, som dokumenteras vidare i denna rapport, tar itu med just denna uppgift. Tanken är att undersöka möjligheterna till noggrannare koppling mellan den nya hydratationsmodellen samt inte bara kemiskt bundet vatten utan även tryckhållfasthet och hydratationsvärme. Undersökningen omfattar även anpassning av parametrar då man inte mäter in kemiskt bundet vatten, dvs. till endast värme och hållfasthetsmätningar. Målet med den första delen är att utnyttja nära koppling genom hydratationsmodellering mellan de tre egenskaperna för att förenkla i framtiden inmätning av kemiskt bundet vatten. Målet med den andra delen är att ersätta dagens modell för värme och hållfasthet.

3.2 Utredningens utgångspunkt

3.2.1 Den nya hydratationsmodellen

Denna utredning tar i princip vid där avhandlingen *Stelmarczyk 2023* slutar avseende modellering av hydratation och därtill kopplade variabler. Den använda hydratationsmodellen beskrivs i grunden av ekvationen nedan:

$$\alpha_c(t) = \int_0^t \beta_T \beta_w \beta_\alpha \beta_{start} dt'$$

där α_c är den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden och β_i är olika delfaktorer som styr hur fort hydratationsgraden växer.

Den centrala styrande faktorn är β_α , som beskriver hur bindemedlets tillgänglighet påverkar tillväxten av hydratationsgrad. Den definieras av formeln nedan:

$$\beta_\alpha = b_c \left(\frac{\alpha_{c,max} - \alpha_c}{\alpha_{c,max}} \right)^{\kappa_c}$$

där b_c , κ_c och $\alpha_{c,max}$ är anpassningsparametrar. $\alpha_{c,max}$ uttrycker den maximala hydratationsgrad som bindemedlet uppnår och om den inte anpassas, sätts den typiskt till 1. b_c är en grundläggande hastighetsparameter som styr hur fort hydratationsgraden växer. κ_c är en exponent som uttrycker graden av beroende mellan tillväxten hos hydratationsgraden och den relativa koncentrationen av oreagerat bindemedel, vilket uttrycks inom parenteserna i formeln.

β_w är en delfaktor som beskriver inverkan av vattnets tillgänglighet. Det är en begränsande faktor som börjar typiskt på 1 och sedan minskar mot 0 då vattnets tillgänglighet för reaktionen med bindemedel minskar – vattnet förbrukas. En formell definition av denna ges nedan:

$$\beta_w = \left(\frac{w_{Ph} - w_{Ph,stop}}{w_{Ph,max} - w_{Ph,stop}} \right)^{\kappa_w}$$

Här är w_{Ph} mängden vatten, fysikaliskt bundet i betongens porsystem. $w_{Ph,max}$ uttrycker den maximala mängden fysikaliskt bundet vatten och $w_{Ph,stop}$ den mängden vid vilken reaktionen stannar av på grund av att kvarstående vatten inte är tillgängligt för reaktionen. κ_w är en exponent som uttrycker graden av beroende mellan tillväxten hos hydratationsgraden och den relativa koncentrationen av vatten tillgängligt för reaktion med bindemedel, vilket uttrycks inom parenteserna i formeln. Här bör nämnas att modellering av vattnets inverkan förutsätter tillgång till en modell för hur vattnet lagras in i betongens porsystem, vilken som oftast kräver resultat från sorptionsmätningar. Om dessa inte är tillgängliga kan delfaktorn β_w sättas till 1 och anpassning av parametrar för hela hydratationen ske mot de övriga delfaktorerna.

Temperaturens inverkan på förloppets hastighet beskrivs av β_T på samma sätt som för den temperaturekvivalenta mognadsåldern. Detta är en relativ hastighetsfaktor som vid referenstemperaturen T_{ref} , normalt valt till 20 °C, är lika med 1. Faktorn blir högre än 1 vid högre temperatur, då reaktionshastigheten ökar, och lägre än 1 vid lägre temperatur, då reaktionshastigheten minskar. Formeln nedan uttrycker ett typiskt hastighetsberoende av s.k. Arrheniustyp, vilket är vanligt för kemiska reaktioner:

$$\beta_T = \exp \left[\theta \left(\frac{1}{T_{ref} + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right]$$

θ är ett mått på aktiveringsenergin för reaktionen. Eftersom hydratationen av bindemedel i betong består av ett flertal kemiska reaktioner, modelleras detta värde inte som en konstant utan som en funktion beroende av temperaturen enligt formeln nedan:

$$\theta = \theta_{ref} \left(\frac{30}{T + 10} \right)^{\kappa_3}$$

där θ_{ref} samt κ_3 är anpassningsparametrar på samma sätt som vid anpassning av den temperaturekvivalenta mognadsåldern.

Den sista delfaktorn i hydrationsmodellen är β_{start} . Den styr startförloppet för hydratationen och beskriver dels den initiala perioden då det "inte händer någonting" med betongen och dels hur fort betongens hydratation kommer igång därefter. Delfaktorn definieras enligt:

$$\beta_{start} = 1 - b_{start} \exp(-\tau_{start} \alpha_c)$$

där b_{start} och τ_{start} är anpassningsparametrar.

Den nya hydrationsmodellen definierar även en vattenrelaterad hydrationsgrad α_w som är ett relativt mått på hur mycket vatten som reagerat med bindemedlet. Denna hydrationsgrad definieras genom differentialekvationen nedan:

$$\frac{d\alpha_w}{dt} = \beta_{adj} \frac{d\alpha_c}{dt}$$

alternativt genom den motsvarande integralformuleringen

$$\alpha_w(t) = \int_0^t \beta_{adj} \frac{d\alpha_c}{dt} dt' = \int_0^t \beta_{adj} \beta_T \beta_w \beta_\alpha \beta_{start} dt'$$

där tillväxten (tidsderivatan) av den vattenrelaterade hydrationsgraden är proportionell mot tillväxten (tidsderivatan) av den bindemedelsrelaterade hydrationsgraden, med en proportionalitetsfaktor som beror av temperaturen enligt ekvationen nedan, med b_{adj} som anpassningsparameter:

$$\beta_{adj} = [1 - b_{adj}(T - 20^\circ\text{C})]$$

Vid 20 °C är β_{adj} lika med 1, dvs. tillväxten av bägge hydrationsgraderna går lika fort oberoende av b_{adj} . Eftersom b_{adj} endast tillåts att vara 0 eller positiv blir effekten att α_w växer långsammare än α_c för temperaturer över 20 °C och snabbare under 20 °C. Detta medför att bindemedlet binder mer vatten per mängd ju lägre temperatur det reagerar vid. Denna ansats baserar sig direkt på observationer i Gallucci m.fl. 2013, där samma typ av beroende observerats med linjär koppling till temperaturen.

Den vattenrelaterade hydrationsgraden uttrycker alltså två temperaturberoenden:

- genom att baseras på den bindemedelsrelaterade hydrationsgraden innehåller den inverkan av β_T , som fångar reaktionernas hastighetsberoende av temperaturen av Arrheniustyp
- genom β_{adj} lägger den till även en temperaturpåverkan på kvaliteten av det som bildas som resultat av reaktionen, i detta fall ett uttryck av hur mycket vatten som binds per reagerad mängd bindemedel

α_c skall alltså här ses som ett uttryck för hur hydratationen fortskrider, där temperaturen påverkar endast hastigheten i förloppet. α_w tillför en ny finess i modelleringen genom att låta temperaturen påverka även kvaliteten på hydratationens resultat.

3.2.2 Hydratationsberoende egenskaper

Den i *Stelmarczyk 2023* presenterade modellen föreslår en vidare koppling till mängden kemiskt bundet vatten, som kräver en enda ytterligare parameter $w_{Ch,ref}$. Denna parameter uttrycker mängd kemiskt bundet vatten vid full hydratation av bindemedlet då reaktionen skett vid 20 °C. Detta ger formeln för kemiskt bundet vatten:

$$w_{Ch} = w_{Ch,ref} \alpha_w$$

Denna del av modellen presenteras ihop med anpassning till mätdata och jämförelse med den gamla modellen och ger en mycket bättre överensstämmelse med mätdata. Utöver bättre värden för determinationskoefficienten för anpassningarna kan den nya modellen uttrycka den s.k. crossover-effekten. Det är då utvecklingen för kemiskt bundet vatten vid låga temperaturer, som sker långsammare och initialt ligger under den för högre, till slut övertar utvecklingen för de högre temperaturerna. Detta eftersom mer vatten binds per mängd reagerat bindemedel. Detta fenomen i mätdata kan den gamla modellen inte återspegla över huvudtaget.

Vidare föreslås endast en grundidé till hur modellen kan byggas ut till att omfatta andra hydratationsberoende egenskaper, som tryckhållfasthet och hydratationsvärme. Detta kan ske genom en direkt koppling till de definierade hydratationsgraderna:

$$f_{cc} = g(\alpha_c) + h(\alpha_w)$$

eller genom en differentialkoppling:

$$\frac{df_{cc}}{dt} = g\left(\frac{d\alpha_c}{dt}\right) + h\left(\frac{d\alpha_w}{dt}\right)$$

där f_{cc} är tryckhållfastheten, och analogt för hydratationsvärmen.

Det är här denna utredning kommer in med målet att undersöka hur dessa förslag kan omsättas i konkreta modeller och hur väl dessa kan anpassas till mätdata samtidigt för flera uppmätta egenskaper. Det är även meningen att titta på hur anpassningar fungerar då endast hydratationsvärme och tryckhållfasthet mäts, dvs. när mätdata för kemiskt bundet vatten saknas. Ytterligare ett specifikt mål är att kontrollera möjligheten till reducerad inmätning av kemiskt bundet vatten genom utnyttjande av anpassning av hydratationsmodellering till tryckhållfasthet och hydratationsvärme. Detta dock endast om tillräcklig god överensstämmelse med mätdata kan uppnås för modellen som helhet.

3.2.3 Materialtekniska resonemang

Den ovan visade modellen för kemiskt bundet vatten bygger på två materialtekniska slutsatser. Den första baserar sig på det faktum att vatten konsumeras av en eller flera kemiska reaktioner. Den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden är ett mått på hur långt dessa reaktioner har gått, genom att indikera hur mycket av bindemedlet som förbrukats. För varje liten ökning av bindemedelsrelaterad hydratationsgrad bör det ske en proportionerlig ökning av förbrukat, alltså kemiskt bundet, vatten, om reaktionen binder lika mycket vatten per mängd bindemedel. Det finns alltså en anledning att förvänta sig någon form av proportionalitet mellan hydratationsgraderna för bindemedel och vatten. Vidare framgår av *Gallucci m.fl. 2013* att proportionalitetsfaktorn inte är konstant utan varierar med temperaturen. För att proportionaliteten skall kunna gälla vid varierande temperatur kan man inte förvänta sig denna direkt mellan hydratationsgraderna utan mellan deras tidsderivator – därav formuleringen nedan:

$$\frac{d\alpha_w}{dt} = \beta_{adj} \frac{d\alpha_c}{dt}$$

Vidare framgår av *Gallucci m.fl. 2013* att faktorn mellan verkar vara en linjär funktion av temperaturen, vilket resulterar i följande formel för β_{adj} där 20°C används som referens och faktorn är normaliserad, dvs. 1 vid referenstemperatur:

$$\beta_{adj} = [1 - b_{adj}(T - 20^\circ\text{C})]$$

För att koppla detta till en absolut mängd vatten krävs nu endast en multiplikativ faktor som uttrycker mängd kemiskt bundet vatten vid full hydratation av bindemedlet då reaktionen skett vid 20 °C, vilket $w_{Ch,ref}$ är och formeln för kemiskt bundet vatten blir, som presenterat tidigare:

$$w_{Ch} = w_{Ch,ref} \alpha_w$$

Detta resonemang håller om det endast är temperaturen som påverkar proportionaliteten mellan hur mycket vatten som binds av hur mycket bindemedel. Detta är dock en förenkling av verkligheten då hydratationen inte kan ses som enhetlig i tid, dvs. olika reaktioner sker med olika intensitet vid olika tidpunkter. Sammanfattningsvis kan sägas att i moderna betongsammansättningar brukar klinkermaterial reagera först och tillsatsmaterialen senare. Vill man se det mer precist blir reaktionsordningen ungefär:

1. kalciumaluminater och kalciumferroaluminater
2. kalciumsilikater, först alit och sedan belit
3. eventuella hydrauliska delar av tillsatsmedel
4. eventuella puzzolana delar av tillsatsmedel

Detta med en viss överlappning och ibland delvis förskjutning mellan faserna. Även vid samma temperatur finns det alltså anledning för vattenmängden som binds av bindemedel att variera. Trots detta verkar det som att den föreslagna modellen kan anpassas väldigt väl till uppmätta materialegenskaper.

Liknade resonemang kan föras avseende hydrationsvärme. Detta är överskottsvärme från hydrationsreaktioner som är exotermiska. Det innebär att när reaktanterna blandas sker det spontant en reaktion och dess reaktionsentalpi frisläpps som hydrationsvärme. Ju mer material som reagerar desto mer värme borde frisläppas. Även här finns det alltså ett liknande grundargument för att hydrationsvärmen borde vara i någon mening proportionell mot bindemedlets hydrationsgrad. Proportionalitetsfaktorn kan inte förväntas vara konstant. Detta är en direkt slutsats från faktum att vid olika temperaturer binds det olika mängd vatten per samma mängd bindemedel. Då olika antal vattenmolekyler frisläpper en del av sin energi när de binds till ett fast ämne, vilket bidrar till hydrationsvärmen, måste den frisläppta värmemängden variera med temperatur. C-S-H-gel, som är den främsta slutprodukten för betongens hydratation, har en mycket komplex struktur och varierande sammansättning, beroende på hur och vid vilken temperatur den bildas. Då vattenmolekyler kan bindas på olika sätt, finns det skäl att förvänta sig att proportionalitetsfaktorn mellan värme och hydrationsgrad varierar med temperatur men inte nödvändigtvis linjärt. Då värmen också beror av hur mycket bindemedel som reagerar, kan en man tänka sig att den är beroende delvis av den vattenrelaterade hydrationsgraden och delvis den bindemedelsrelaterade.

De mätdata som finns tillgängliga för hydrationsvärme kommer från semiadiabatiska kalorimetrar. Det innebär att den registrerade värmeutvecklingen sker vid varierande temperatur. Detta medför att man inte kan studera hur värmen avges från hydratation vid konstant temperatur. Detta vore ytterst intressant med för detta ändamål behövs mätdata från isotermisk kalorimetri och denna mätmetod

förutsätter i regel prover som är så små att den inte är representativa för betong. Detta medför att med tillgängliga data kan endast direkta anpassningar av olika ekvationer till hela den uppmätta hydratationsvärmen utföras. Från de materialtekniska resonemangen ovan kan följande förslag för undersökning av hur hydratationsvärmen modelleras tas fram:

1. Proportionerlig på differentialnivå mot den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden där proportionalitetsfaktorn varierar linjärt med temperaturen men annorlunda än för kemiskt bundet vatten: $\frac{dQ}{dt} = [1 - a_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_c}{dt}$
2. Proportionerlig på differentialnivå mot bägge hydratationsgrader: $\frac{dQ}{dt} = a_1 \frac{d\alpha_c}{dt} + a_2 \frac{d\alpha_w}{dt}$
3. Proportionerlig på funktionsnivå mot bägge hydratationsgrader: $Q = a_1\alpha_c + a_2\alpha_w$
Proportionerlig på funktionsnivå mot potenser av bägge hydratationsgrader där exponenten inte avviker för mycket från 1: $Q = a_1\alpha_c^{k_c} + a_2\alpha_w^{k_w}$

Det kan matematiskt visas att förslag 1 är ekvivalent med förslag 2, se bilaga 2. Vidare resulterar en enkel integration av förslag 2 i förslag 3, då a_1 och a_2 är anpassningsparametrar. Förslag 4 är en generalisering av förslag 3 och ses därför som det mest intressanta att undersöka. Denna undersökning kan lämpligen ske i två steg där man först anpassar endast mot den andra termen, som är en funktion av den vattenrelaterade hydratationsgraden, då denna term innehåller viss kvalitetsinformation om vad som bildas och inte bara hur fort det sker. I det senare skedet kan anpassning ske mot bägge termerna för att se om den bindemedelsbaserade hydratationsgraden resulterar i förbättrad modellprestanda.

När det kommer till tryckhållfasthet blir de materialtekniska resonemangen genast mycket mer komplexa. Hållfastheten blir rimligtvis kopplad till hur bindemedel och vatten avsätter sig som fast material. Detta bidrar successivt till att först överbrygga gapen mellan ballaskornen och bindemedelskornen och sedan förstärka dessa. Komplexiteten i denna process medger inte några enkla slutsatser. Däremot finns det vissa empiriska observationer från tidigare undersökningar som pekar i riktning inte alltför olik de för värme och kemiskt bundet vatten. Det innebär att tillväxten av hållfasthet skulle vara proportionerlig mot tillväxten av hydratationsgrad vid konstant temperatur. De tillgängliga mätdata som finns för tryckhållfasthet medger separation av temperaturer. De provtryckta kuberna är hydratiserade vid 4 olika, konstanta temperaturer. Här finns det anledning att testa linjär anpassning av hållfasthet mot hydratationsgrad, både den bindemedelsrelaterade och den vattenrelaterade, innan man föreslår vidare en modellfunktion för anpassning till hela datamängden.

En rimlig materialteknisk observation kan vara på sin plats. Det krävs att en del hydratation sker först innan ballastkornen kan låsas mot varandra och uppvisa någon som helst tryckhållfasthet. Detta bör medföra att det initialt inte sker någon som helst tillväxt av hållfasthet med hydratationsgrad, innan hydratationsgraden uppnått en viss nivå. Detta bör kunna ses i en linjäranpassning, inte genom lutningskoefficienten utan genom värdet på den additiva konstanten. Det som är det intressanta med lutningen för de olika temperaturerna är hur mycket den varierar. Detta kan påverka val av funktion för anpassning mot mätdata för alla temperaturer samtidigt.

3.2.4 Använda mätdata

De mätdata för värme, hållfasthet och kemiskt bundet vatten som används i utredningen kommer ursprungligen från SBUF 13198, se *Stelmarczyk m.fl. 2019*. Det är samma data som används i jämförelser i den doktorsavhandlingen från vilken den nya hydratationsmodellen kommer, se *Stelmarczyk 2023*. Dessa mätdata är baserade på tre industriella recept för betong med det ursprungliga/gamla Bascementet med ca 16% flygaska, med vattencementtalen 0,32, 0,40 samt 0,55. Det är tyvärr den enda existerande uppsättning av alla dessa mätdata för samma betong, där kemiskt

bundet vatten har uppmätts på prover hydratiserade vid olika temperaturer. Detta för att fånga effekten av att olika mängd vatten binds per samma mängd bindemedel vid olika temperaturer.

3.2.5 Anpassning av parametrar

Anpassning av parametrar har skett med samma metodik för icke-linjära samband som beskrivs för hydratationsmodellen i doktorsavhandlingen *Stelmarczyk 2023*.

3.2.6 Felmått

Som numeriskt mått på fel i anpassningen används ett genomsnittligt fel per mätpunkt:

$$\text{Fel} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_{\text{modell},i} - v_{\text{mätt},i}|$$

där $v_{\text{mätt}}$ är det uppmätta värdet, v_{modell} är modellens värde motsvarande mätpunkten i fråga och n är antalet mätpunkter. Detta värde är enkelt att interpretera. Det visar hur långt i snitt modellen ligger från de mätpunkter den anpassats mot. Felvärdet har samma enhet som de anpassade och uppmätta värdena.

3.2.7 Referens

Som referens i jämförelse med den nya modellens prestanda, används den s.k. gamla hydratationsmodellen, som är baserad på modellering av mognadsålder. Mognadsåldern fungerar som generell processparameter på vilken referenshållfasthet och hydratationsgrad baseras. Hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten modelleras som en multipel av hydratationsgraden. Slutligen används mognadsålder och hydratationsgrad för beräkning avseende sänkning av hållfasthet med hänsyn till höga temperaturer. Detta för att korrigera referenshållfastheten till tryckhållfasthetens slutliga värde. För detaljer och de specifika ekvationerna se *Fjällström 2013* eller litteraturstudien i doktorsavhandlingen *Stelmarczyk 2023*.

3.2.8 Tilltänkt utredningsförfarande

Utredningen är indelad i tre steg:

1. **Klargörande av referens** – här utförs anpassningar av materialdata till den gamla modellen för att etablera en referens för jämförelse och dragning av slutsatser. Det tas fram både diagram som visar hur den anpassade modellen fungerar samt felmått för jämförelse av hur bra modellen återger mätdata som den anpassats mot.
2. **Vatten, värme & hållfasthet ihop** - I detta steg är tanken att utgå från den existerande anpassningen för kemiskt bundet vatten och bygga vidare i olika steg. Till en början läggs hydratationsvärme till genom undersökning av olika anpassningar. Därefter används hydratationsmodellen för att analysera hur tryckhållfasthet utvecklas för de olika temperaturerna som funktion av den cementrelaterade resp. den vattenrelaterade hydratationsgraden. Slutligen väljs en modell för tryckhållfasthet och hela hydratationsmodellen med kopplingar till alla de tre uppmätta egenskaperna anpassas till mätdata.
3. **Värme och hållfasthet** - Slutligen undersöks hur den nya hydratationsmodellen fungerar utan en modelldel eller mätdata för kemiskt bundet vatten, dvs. i sammanhang då man endast är intresserad av hydratationsvärme och hållfasthet.

3.3 Referens

Anpassning av den gamla modellen sker normalt i följande steg, se *PPB Manual Del M2 & M3*, med följande beroenden mellan stegen:

1. Preliminär anpassning av referenshållfasthet och anpassning av mognadsålder.
2. Anpassning av referenshållfasthet – mognadsålder används.
3. Anpassning av hydratationsgrad och hydratationsvärme – mognadsålder används.
4. Anpassning avseende sänkning av hållfasthet vid höga temperaturer – mognadsålder, hydratationsgrad och referenshållfasthet används.

Om modellen även skall hantera kemiskt bundet vatten finns det två vägar att vandra:

- Separat anpassning - steg 3 separat för data för kemiskt bundet vatten. Detta innebär att det kommer att finnas två uppsättningar av parametrar för hydratationsgrad, en anpassad indirekt till data för värme och en till data för vatten.
- Samtidig anpassning – i steg 3 anpassas parametrar för hydratationsgrad samtidigt mot mätdata för värme och vatten.

Tabell 1 och Tabell 2 ger en sammanfattande bild av anpassningsfelen för vatten, värme och hållfasthet.

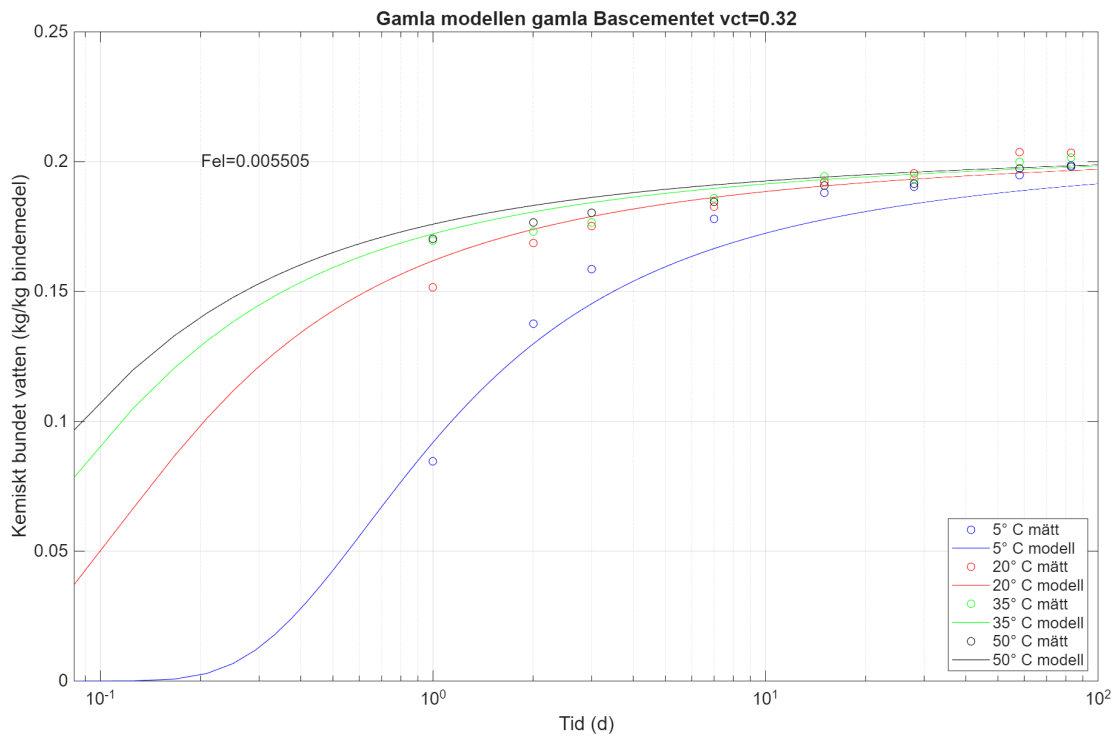
	Anpassningsfel		
Vct	Fcc (MPa)	Q (kJ/ kg s)	Wn (kg/kg C)
0,32	4,10	11,10	0,00551
0,40	3,21	13,66	0,00411
0,55	1,54	6,34	0,00691

Tabell 1. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (F_{cc}), hydratationsvärme (Q) och kemiskt bundet vatten (W_n) för det gamla Bascementet och den gamla modellen, där anpassning av hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten använder sig av separata parametrar för hydratationsgrad och tryckhållfastheten utnyttjar hydratationsgraden anpassad till värme

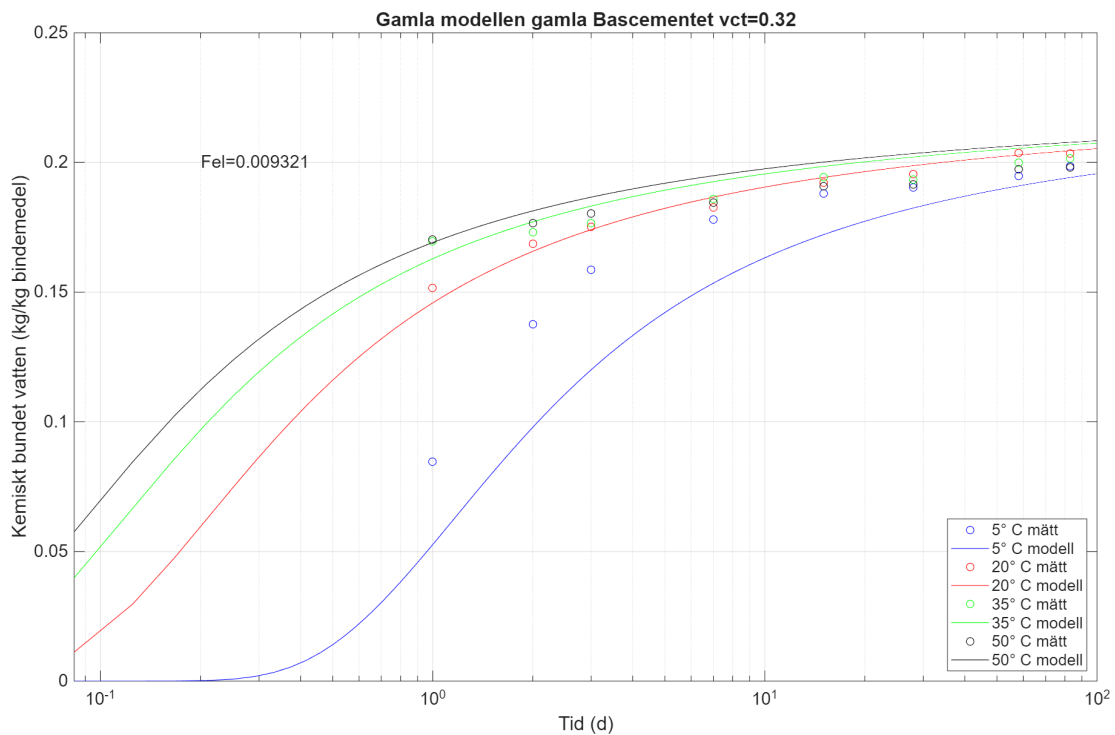
	Anpassningsfel		
Vct	Fcc (MPa)	Q (kJ/ kg s)	Wn (kg/kg C)
0,32	4,12	14,50	0,00932
0,40	3,22	15,64	0,00446
0,55	1,55	6,68	0,00888

Tabell 2. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (F_{cc}), hydratationsvärme (Q) och kemiskt bundet vatten (W_n) för det gamla Bascementet och den gamla modellen, där anpassning av hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten använder sig av gemensamma parametrar för hydratationsgrad

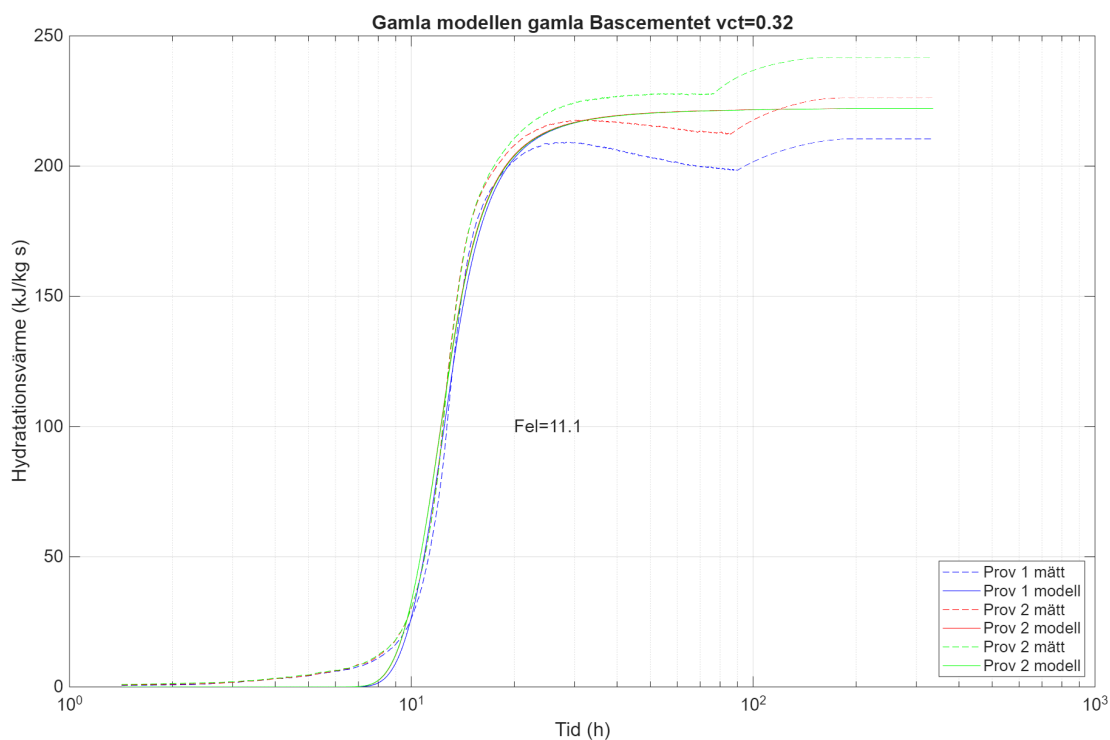
Av jämförelsen ovan framgår att precisionen i anpassningen minskar då gemensamma parametrar för hydratationsgrad används. Det är främst hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten som påverkas. Modellen för tryckhållfastheten tycks fungera likvärdigt i bägge fallen. Hur denna skillnad ser ut i detalj framgår av diagrammen i Figur 1-Figur 4 som ger exempel på dessa anpassningar för vct 0,32. För diagram för de övriga vattencementtalen, tryckhållfasthet samt i linjär tidsskala se bilaga 1.



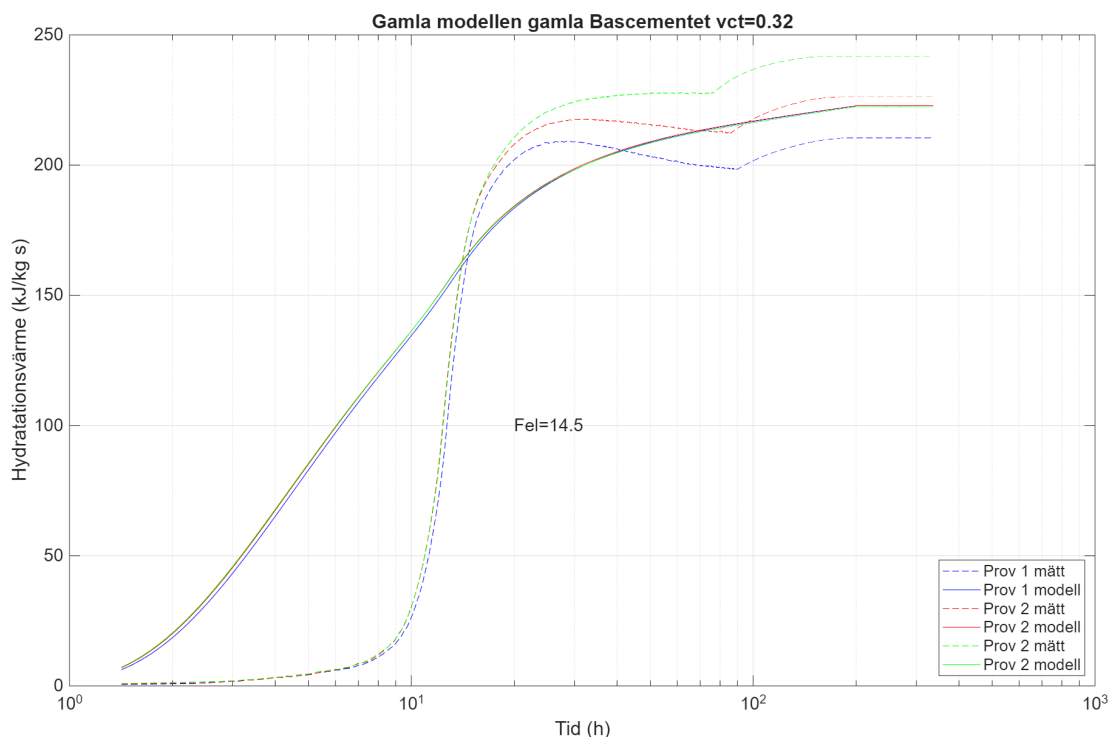
Figur 1. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



Figur 2. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



Figur 3. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



Figur 4. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.

3.3.1 Diskussion

Enligt den gamla modellen skall hydratationsvärme samt kemiskt bundet vatten vara direkt proportionerliga mot hydratationsgraden. Jämförelsen ovan visar att det finns en signifikant skillnad

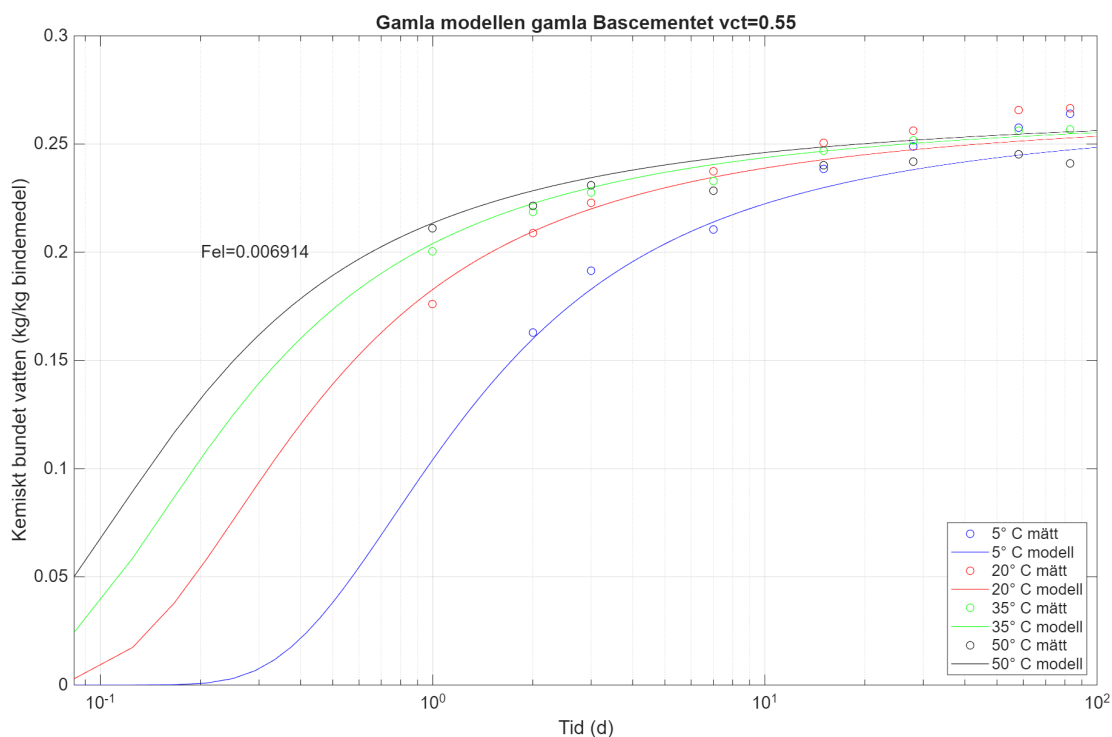
mellan denna modell och verkligheten. Då anpassning sker mot resp. uppsättning av mätdata med separata parametrar för hydratationsgrad kommer modellerna att dels visuellt efterlikna de uppmätta värdena bättre, dels ha ett lägre anpassningsfel. När samma anpassning utförs med endast en uppsättning av parametrar för hydratationsgrad för mätvärden för både värme och vatten flyttas kurvorna i diagrammen från mätpunkterna och anpassningsfelen ökar. Det verkar som om hydratationsvärmen och kemiskt bundet vatten hade en egen syn på hydratationsgraden. Fenomenet har naturligtvis att göra med att modellerna för värme och vatten med direkt proportionerlig koppling mot hydratationsgrad är förenklingar av verkligheten och återger inte samtliga beroenden. Det är av värde att observera detta fenomen redan för den gamla modellen då det kommer att spela roll senare i denna utredning.

3.4 Vatten, värme och hållfasthet ihop

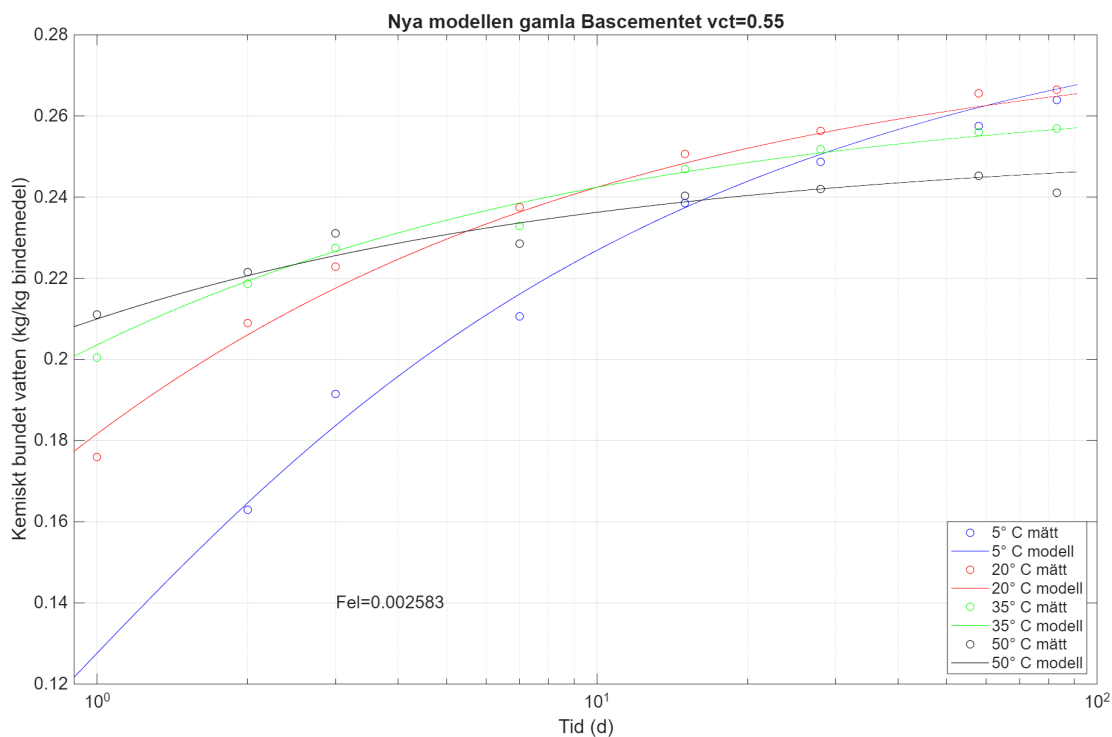
Denna del i utredningen tittar på anpassning av samtliga delar av den nya modellen till existerande mätdata för kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme och tryckhållfasthet. Utredningen börjar där doktorsavhandlingen Stelmarczyk 2023 slutade, dvs. i anpassning av kemiskt bundet vatten. Därefter läggs hydratationsvärme med två modellansatser till och delresultaten redovisas. För tryckhållfastheten genomförs först en analys av möjlig korrelation till existerande modellvariabler. Baserat på denna föreslås en modell för tryckhållfastheten och anpassningsresultaten redovisas. Slutligen sker en diskussion av resultaten, bakomliggande orsaker samt möjliga vägar fram för förbättring och tillämpning av den nya modellen.

3.4.1 Existerande anpassning av kemiskt bundet vatten

Den nya modellens syn på kemiskt bundet vatten bygger på observationer från materialforskning, mer specifikt på *Gallucci m.fl. 2013*. Där konstateras det att mängden kemiskt bundet vatten per mängd bindemedel i C-S-H-gelen, som är den största slutprodukten av betongens hydratation, varierar med temperaturen. Undersökningen i artikeln visar på ett beroende som verkar vara linjärt med temperaturen. Denna ansats används i den nya modellen och ger en tydligt bättre överensstämmelse med mätdata än den gamla modellen. Exempel på detta ges i Figur 5 och Figur 6 för gamla Bascementet vct 0,55. I diagrammet för den nya modellen syns tydligt den s.k. cross-over effekten. Låg temperatur resulterar initialt i långsam tillväxt men med högt slutvärde. Hög temperatur resulterar initialt i snabb tillväxt men med lågt slutvärde. Cross-over effekten finns inte i diagrammet med anpassningen av den gamla modellen, då formeln bakom inte möjliggör detta fenomen.



Figur 5. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten



Figur 6. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

En sammanfattande jämförelse för samtliga tre vattencementtal ges i Tabell 3. Där framgår det tydligt att anpassningsfelet i princip halveras med den nya modellen.

Vct	Anpassningsfel Wn (kg/kg C)	
	Gammal modell	Ny modell
0,32	0,00551	0,00276
0,40	0,00411	0,00215
0,55	0,00691	0,00258

Tabell 3. Anpassningsfel för kemiskt bundet vatten (Wn) för den gamla och den nya modellen, där anpassning endsat utförts till mätdata för kemiskt bundet vatten

3.4.2 Initial anpassning av hydratationsvärme

Den initiala anpassningen av hydratationsvärme i den nya modellen utgår från parametrar för hydratationsgrad som anpassades för kemiskt bundet vatten. I anpassningen används dock endast mätdata för hydratationsvärme för felminimering. Därför är denna anpassning lämplig att jämföras med den gamla modellens anpassning med separata parametrar för hydratationsvärme.

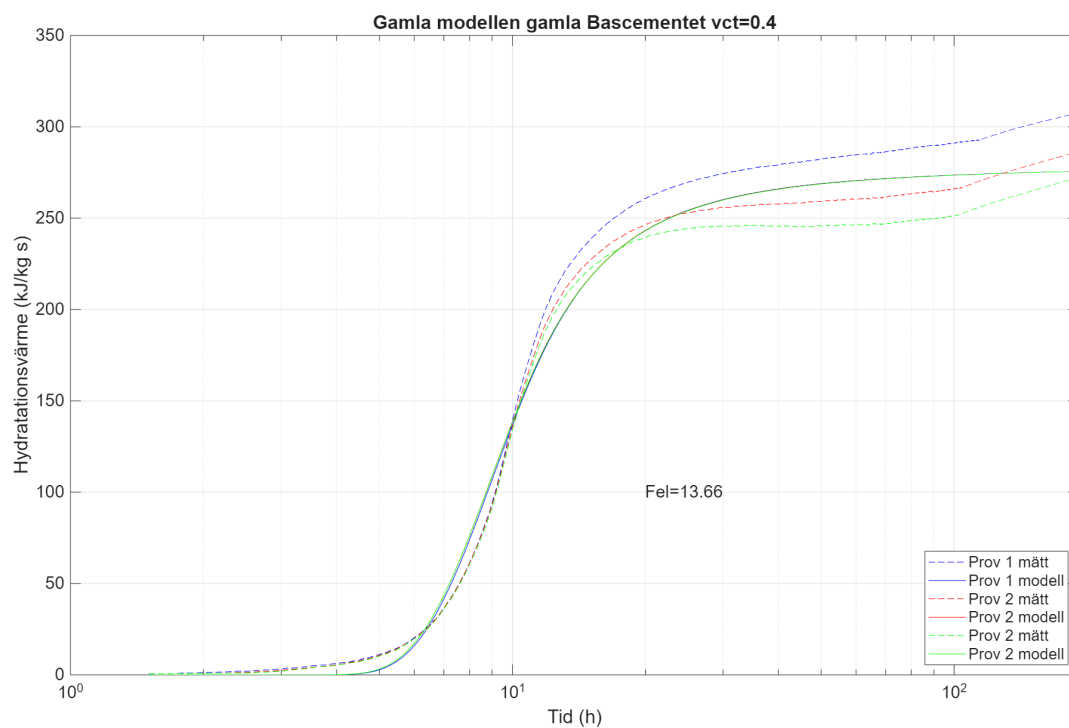
För hydratationsvärme finns endast mätdata från semi-adiabatisk mätning, vilken utförs vid varierande temperatur. Detta medger inte någon analys av värmeutveckling som funktion av hydratationsgrad vid olika temperaturer. I enlighet med resonemanget i 3.2.3 testas här en anpassning av två modeller för hydratationsvärme. Den ena modellen använder sig av en term, som är en funktion av den vattenrelaterade hydratationsgraden:

$$f_{cc} = p_w \alpha_w^{\kappa_w}$$

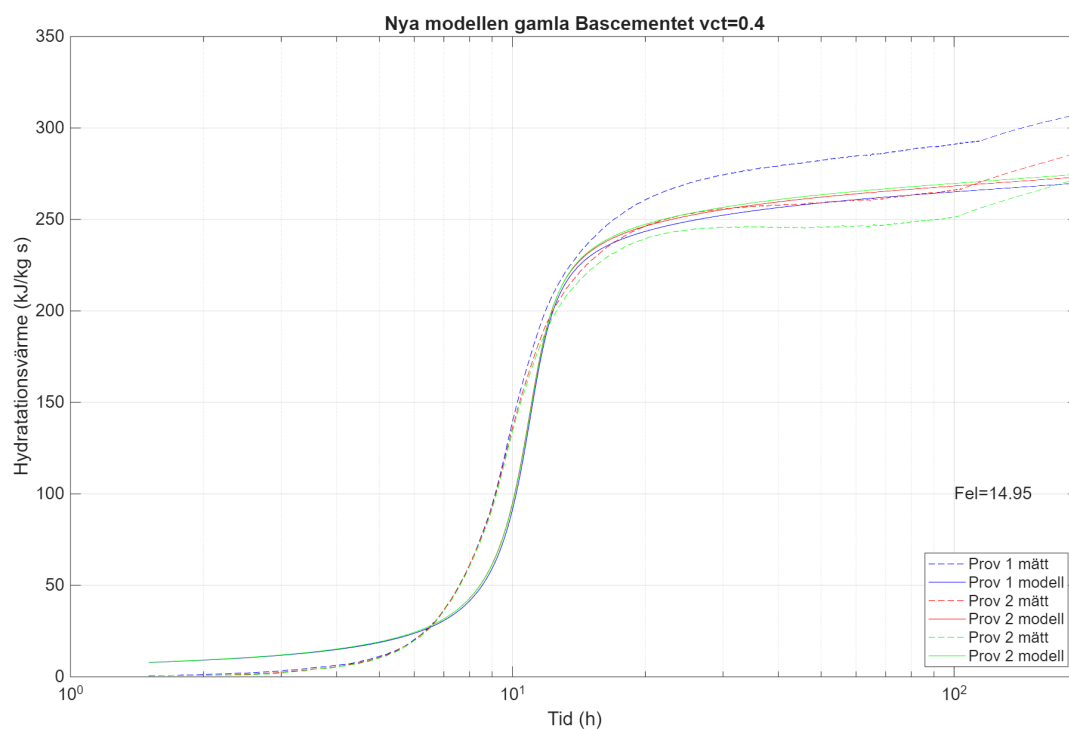
Den andra modellen använder sig av två termer, som är funktioner av den vattenrelaterade samt den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden:

$$f_{cc} = p_c \alpha_c^{\kappa_c} + p_w \alpha_w^{\kappa_w}$$

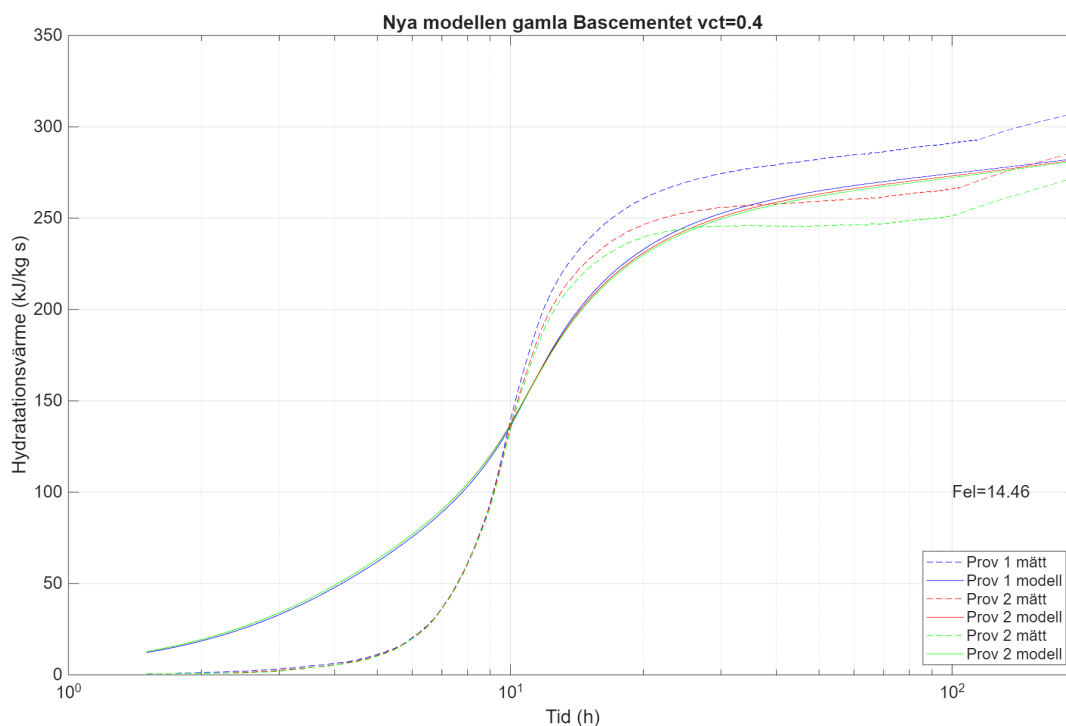
Ett exempel på anpassning för ny modell med en term visas i Figur 8 och med två termer i Figur 9 med motsvarande anpassning för den gamla modellen i Figur 7.



Figur 7. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen



Figur 8. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme



Figur 9. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme

Anpassningsfelen är i samma storleksordning. Kurvan i Figur 9 ser ut att ligga längre bort från mätdata i början av hydratationsförloppet. Detta ger dock ett lägre anpassningsfel då den ligger närmare i den senare halvan och mätpunkterna är fördelade ekvidistant i tiden. Det blir alltså fler mätpunkter ju längre ut man kommer till höger i ett diagram med logaritmisk tidsskala.

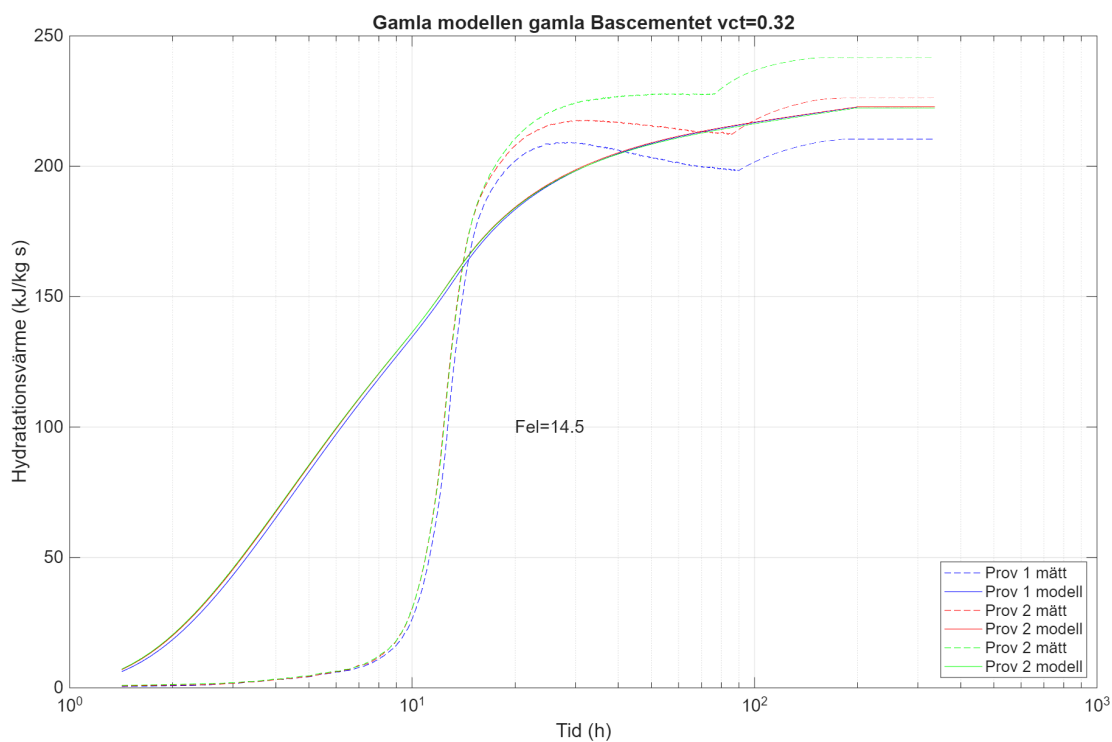
I Tabell 4 sammanfattas man vattencementtalen. Anpassningsfelen är i samma storleksordning till något sämre än för den gamla modellen. Det tycks inte finnas någon klar förbättring här med två i stället för en term i den nya modellen.

	Anpassningsfel Q (kJ/ kg s)		
Vct	Gammal modell	Ny modell en term	Ny modell två termer
0,32	11,10	11,42	11,47
0,40	13,66	14,95	14,46
0,55	6,34	7,61	7,77

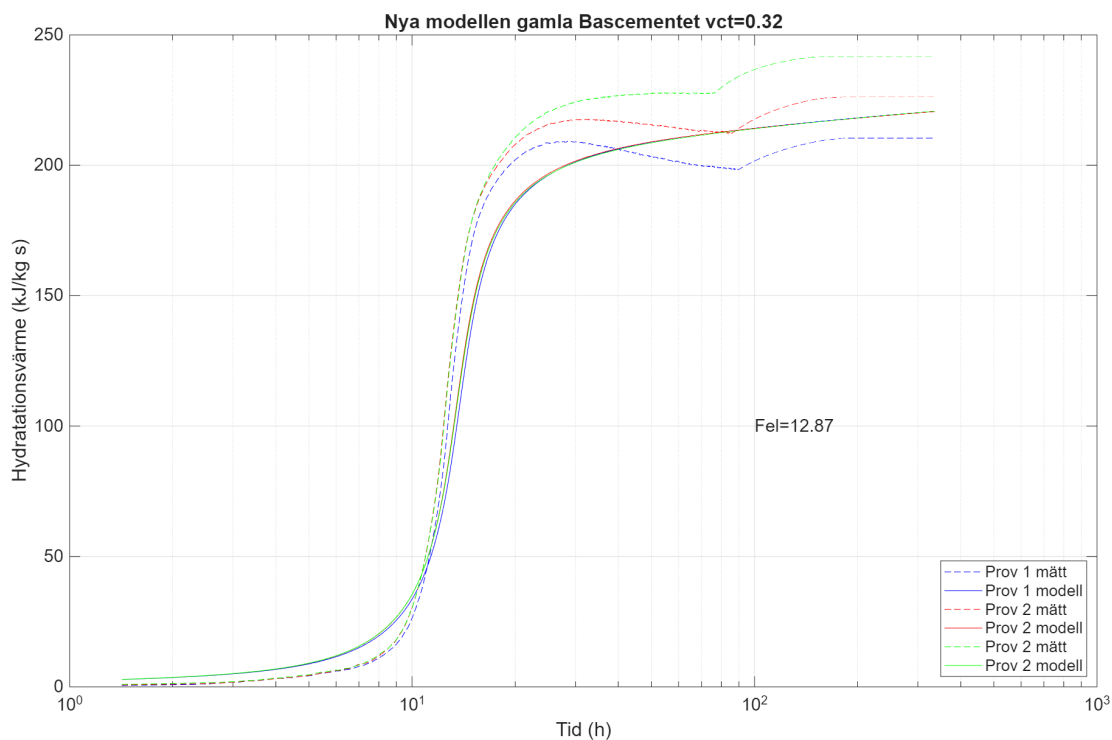
Tabell 4. Anpassningsfel för hydratationsvärme (Q) och den gamla modellen (separat anpassning av värme) och den nya modellen med både en och två termer i ekvationen för värme (initialanpassning)

3.4.3 Finjustering av parametrar för hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

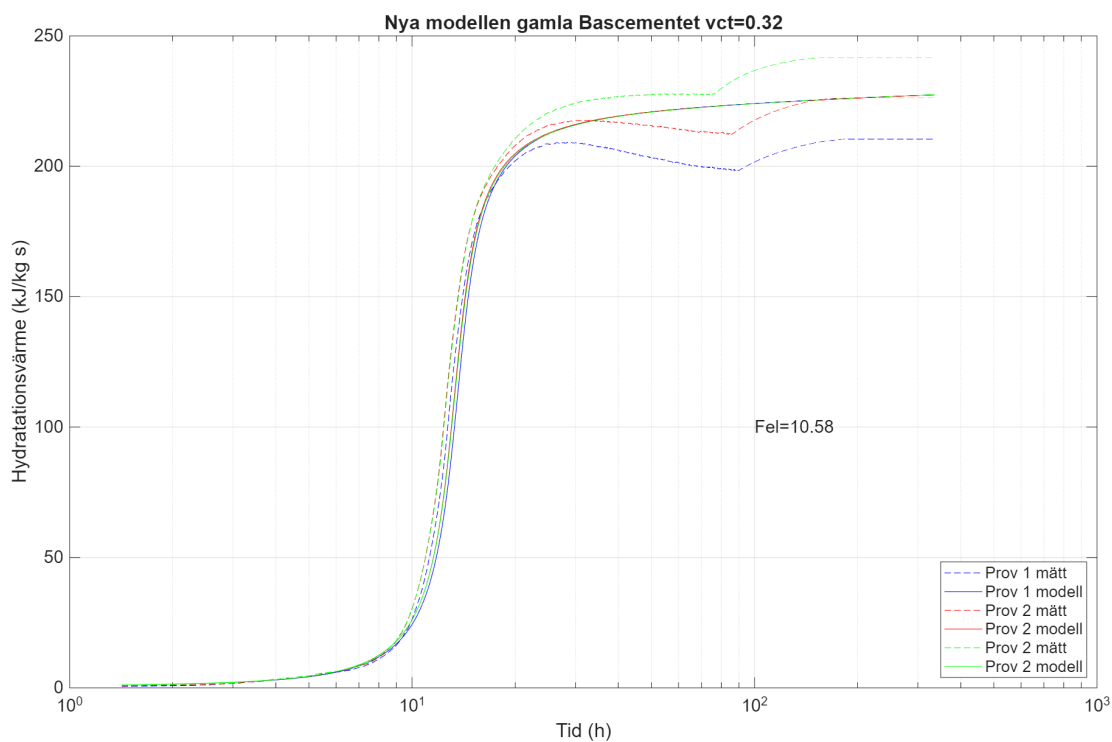
För att få fram modellprestanda för samtidig anpassning av parametrar mot mätdata för både kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme utförs en justering av samtliga initialt anpassade parametrar. Denna gång med bägge uppsättningar av mätdata som underlag för felminimering. Analysen av den gamla modellens prestanda vid samtidig anpassning visade på sämre överensstämmelse med mätdata. Den nya modellens prestanda för både en och två termer i värmeekvationen exemplifieras i figurerna nedan med motsvarande anpassning från den gamla modellen för jämförelse. Hydratationsvärmen visas i Figur 10-Figur 12 och kemiskt bundet vatten i Figur 13-Figur 15.



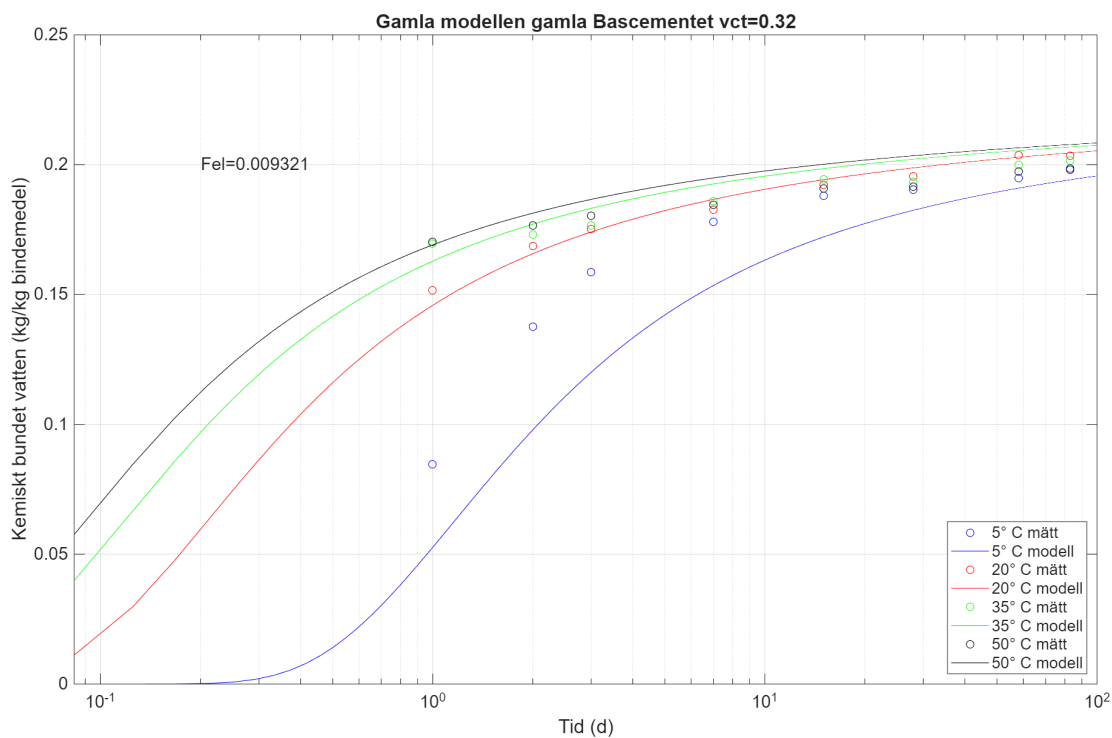
Figur 10. Anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



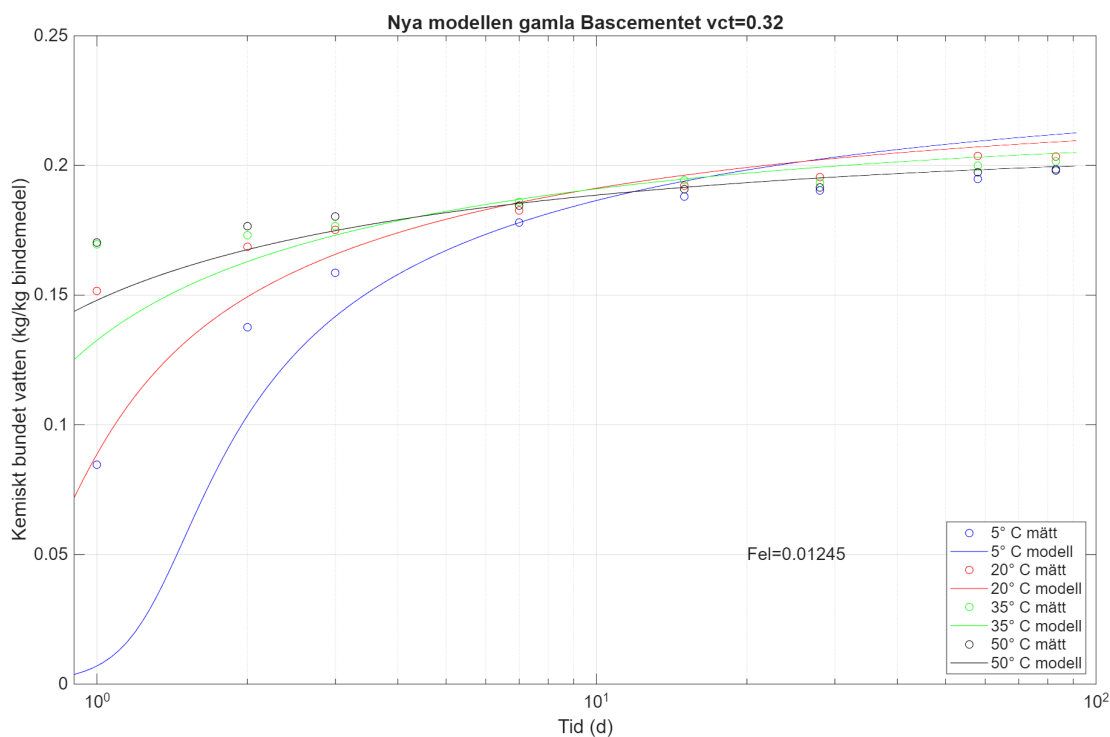
Figur 11. Anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



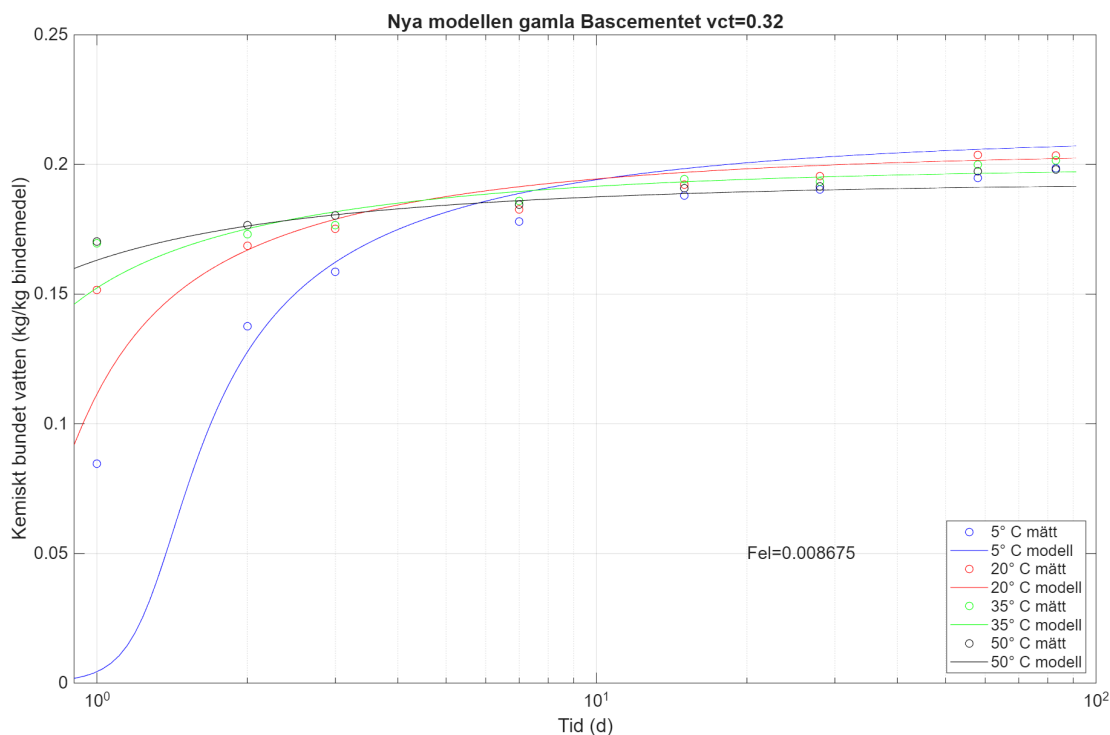
Figur 12. Anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



Figur 13. Anpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



Figur 14. Anpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



Figur 15. Anpassnings för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

Även den nya modellen förlorar i anpassningsnoggrannhet vid samtidig anpassning. Här syns dock en skillnad mellan användning av en resp. två termer i värmeekvationen.

En sammanfattning ges i Tabell 5 för kemiskt bundet vatten och i Tabell 6 för hydratationsvärme.

	Anpassningsfel W_n (kg/kg C)		
Vct	Gammal modell	Ny modell (en term för värme)	Ny modell (två termer för värme)
0,32	0,00932	0,01245	0,00868
0,40	0,00446	0,00289	0,00252
0,55	0,00888	0,00388	0,00389

Tabell 5. Anpassningsfel för kemiskt bundet vatten (W_n) för den gamla modellen och den nya modellen med både en och två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

	Anpassningsfel Q (kJ/ kg s)		
Vct	Gammal modell	Ny modell en term	Ny modell två termer
0,32	14,50	12,87	10,58
0,40	15,64	13,72	13,97
0,55	6,68	7,44	7,37

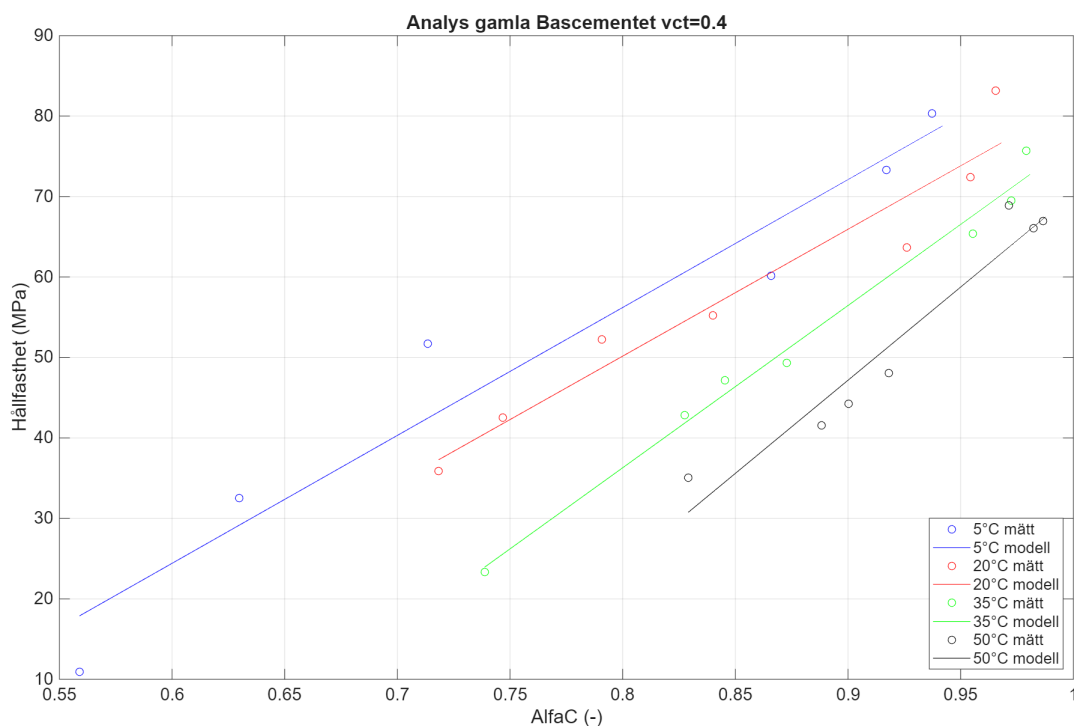
Tabell 6. Anpassningsfel för hydratationsvärme (Q) för den gamla modellen och den nya modellen med både en och två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

För kemiskt bundet vatten är den nya modellen fortfarande markant bättre för vct 0,40 och 0,55. För vct 0,32 är varianten med en term för värme sämre och med två termer bättre, dock inte lika mycket som för de högre vattencementtalen. Denna skillnad kan bero på att hydratationsförloppet skiljer sig mellan dessa fall. För vct 0,40 och högre är det bindemedlet som är den begränsande faktorn och för 0,32 är det vattnet. Detta kan också påverkas av att receptet med vct 0,32 innehöll mycket flyttillsats för att uppfylla konsistenskrav, vilket påverkar hur vatten beter sig i början av hydratationsförloppet.

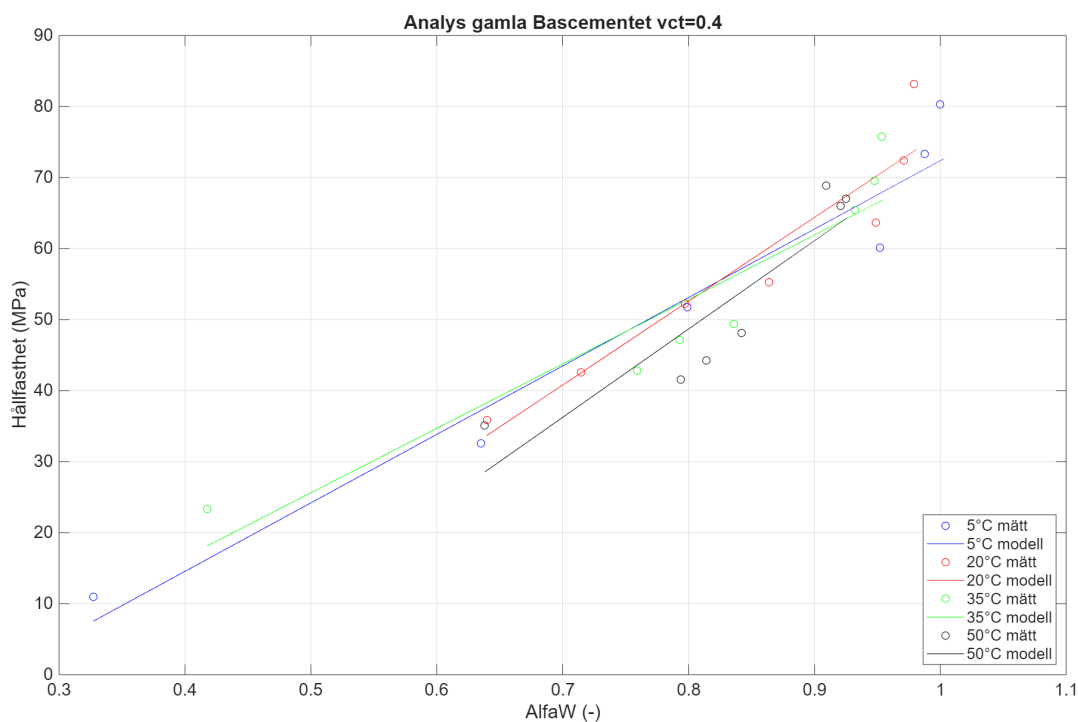
För hydratationsvärme är bilden också spridd. Skillnaderna mellan anpassningsfelen är inte särskilt stora men de slår åt olika håll för de olika vattencementtalen.

3.4.4 Hållfasthet – analys

För tryckhållfasthet ges en möjlighet till djupare analys, då mätdata är uppdelade efter hydratation i olika, konstanta temperaturer. Här är tanken att undersöka en observation om att hållfastheten tycks utvecklas proportionellt mot hydratationsgraden vid konstant temperatur. Rent materialtekniskt är det svårt att verifiera detta då mekanismerna till uppkomsten av hållfasthet, dvs. hur resultat av hydratationen avsätter sig mellan ballast och ohydratiserat bindemedel, inte tillåter enkel slutsatsdragning. Det som denna utredning fokuserat på är analys av mätdata mot andra redan anpassade delar av modellen. De tidigare anpassningarna för kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme har resulterat i en modell för hydratationsgrad, egentligen två på grund av två undersökta formuleringar för ekvationen för värme. Den första delen av analysen går ut på att undersöka hur väl linjära samband mellan tryckhållfasthet och hydratationsgrad vid olika temperaturer passar till mätdata. Exempel på detta ges för vct 0,4 i Figur 16 för bindemedelsrelaterad hydratationsgrad och Figur 17 för vattenrelaterad hydratationsgrad, bägge baserade på parametrar från anpassningar med värmeekvationen med en term.

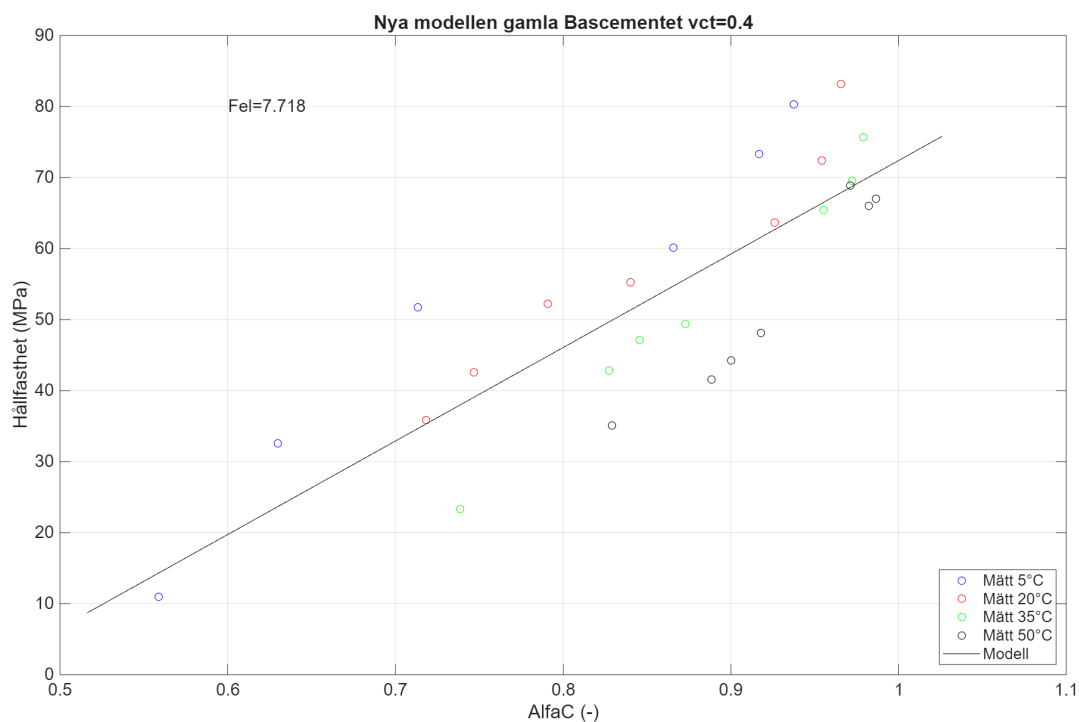


Figur 16. Korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur

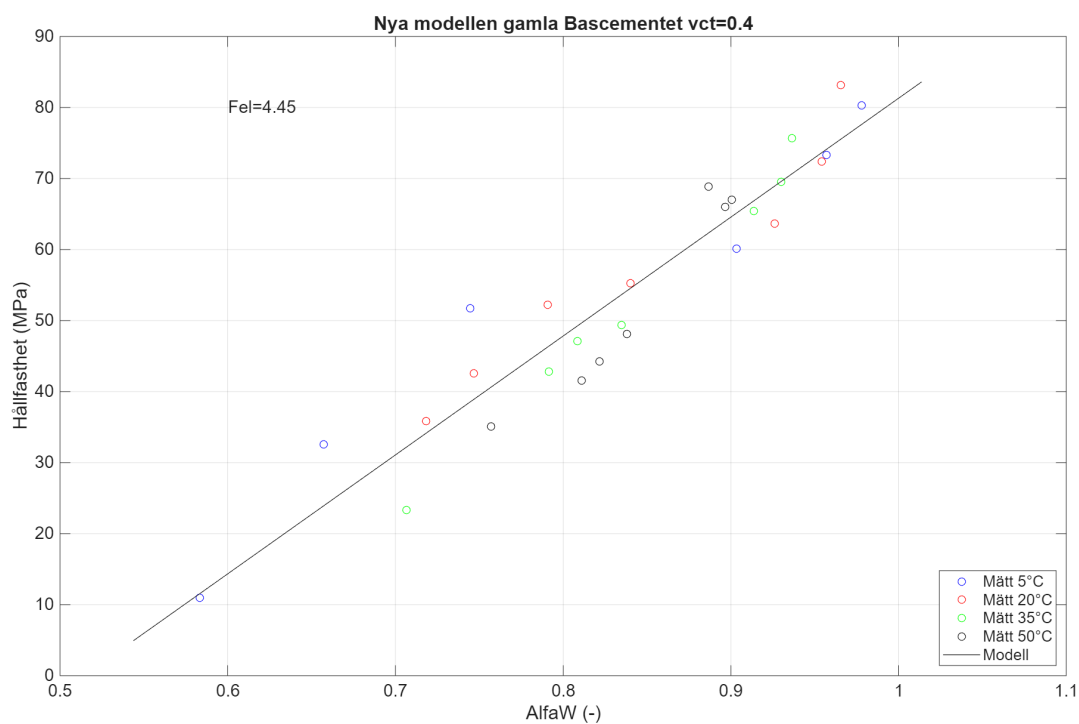


Figur 17. Korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur

Diagrammen antyder att idén kan vara användbar då det verkar finnas en viss linjär korrelation i fallen med båda hydratationsgraderna. För att gå vidare med detta behöver anpassningsfelen kvantifieras. Detta ges exempel på i Figur 18 samt Figur 19. Bägge figurerna visar på försök till anpassning av tryckhållfasthet som linjär funktion av hydratationsgrad för mätdata för samtliga temperaturer.



Figur 18. Anpassning av ett linjärt samband mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) för det gamla Bascementet vct 0,40



Figur 19. Anpassning av ett linjärt samband mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) för det gamla Bascementet vct 0,40

En sammanfattande bild av samtliga sådana anpassningar, dvs. för alla vattencementtalen och bägge varianter på underliggande modellen för värme ges i Tabell 7 (en term för värme) och Tabell 8 (två termer för värme).

	Anpassningsfel Fcc (MPa)		
Vct	Gammal modell	Ny modell, mot AlfaC (en term för värme)	Ny modell, mot AlfaW (en term för värme)
0,32	4,12	5,32	5,27
0,40	3,22	7,72	4,45
0,55	1,55	5,29	4,47

Tabell 7. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (Fcc) för den gamla modellen och den nya modellen med linjär anpassning mot bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) där en term i ekvationen för värme används för anpassning av underliggande hydratationsgrader

	Anpassningsfel Fcc (MPa)		
Vct	Gammal modell	Ny modell, mot AlfaC (två termer för värme)	Ny modell, mot AlfaW (två termer för värme)
0,32	4,12	7,21	7,22
0,40	3,22	7,14	4,19
0,55	1,55	5,24	4,38

Tabell 8. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (Fcc) för den gamla modellen och den nya modellen med linjär anpassning mot bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) där två termer i ekvationen för värme används för anpassning av underliggande hydratationsgrader

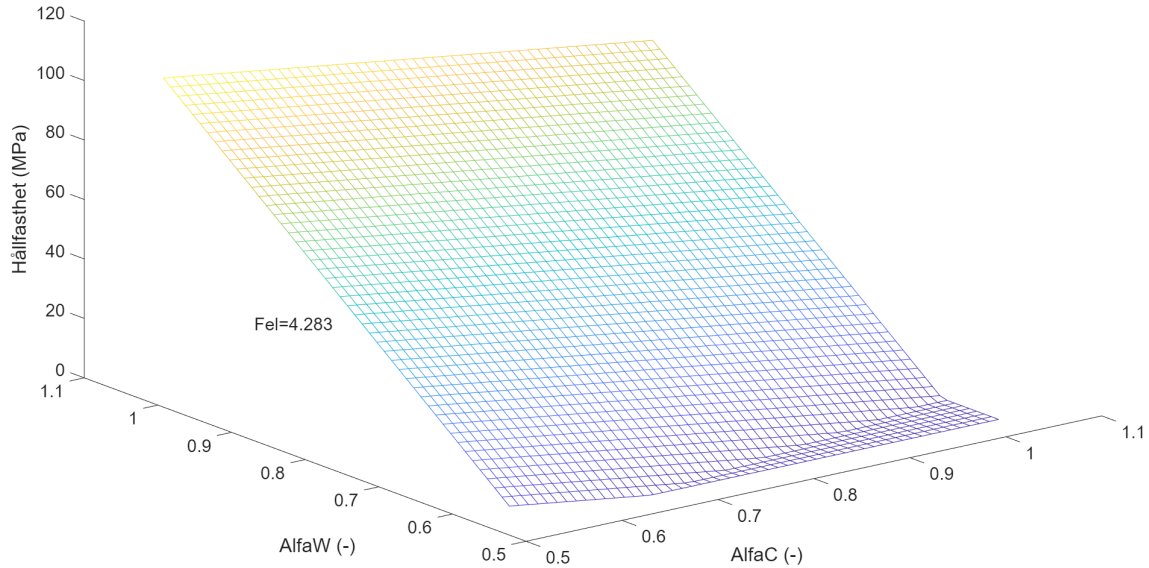
Det tyck finnas en korrelation mot bägge typer av hydratationsgrad. Detta kan tolkas att både mängden hydratiserat bindemedel och mängden kemiskt bundet vatten bidrar till tillväxten av hållfasthet, vilket låter rimligt. Korrelationen tycks vara något större mot den vattenrelaterade hydratationsgraden (mindre anpassningsfel).

Baserat på denna analys antas följande modell för vidare undersökning:

$$f_{cc} = \begin{cases} p_1\alpha_c + p_2\alpha_w + p_3 & \text{då } p_1\alpha_c + p_2\alpha_w + p_3 > 0 \\ 0 & \text{då } p_1\alpha_c + p_2\alpha_w + p_3 \leq 0 \end{cases}$$

Ansatsen är alltså linjär i bägge hydratationsgraderna för att utnyttja bägge korrelationerna. En konstant term kommer att behövas då tryckhållfastheten inte börjar växa direkt från början av hydratationen. Detta syns i anpassningsdiagrammen genom att de anpassade linjerna skär x-axeln vid en hydratationsgrad i närheten av 0,5. För att funktionen inte skall resultera i negativa hållfastheter för lägre hydratationsgrader införs en trunkering till 0 då den linjära ansatsen ger ett negativt värde. Ett exempel för hur en sådan funktion kan se ut ges i Figur 20.

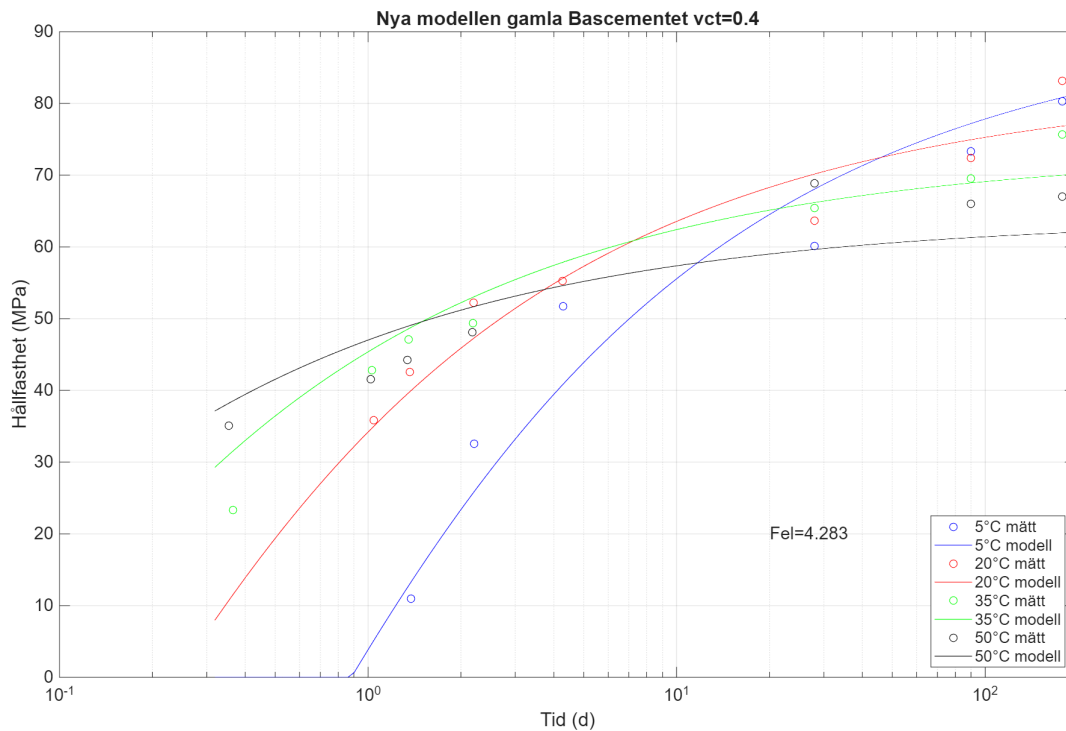
Nya modellen gamla Bascementet vct=0.4



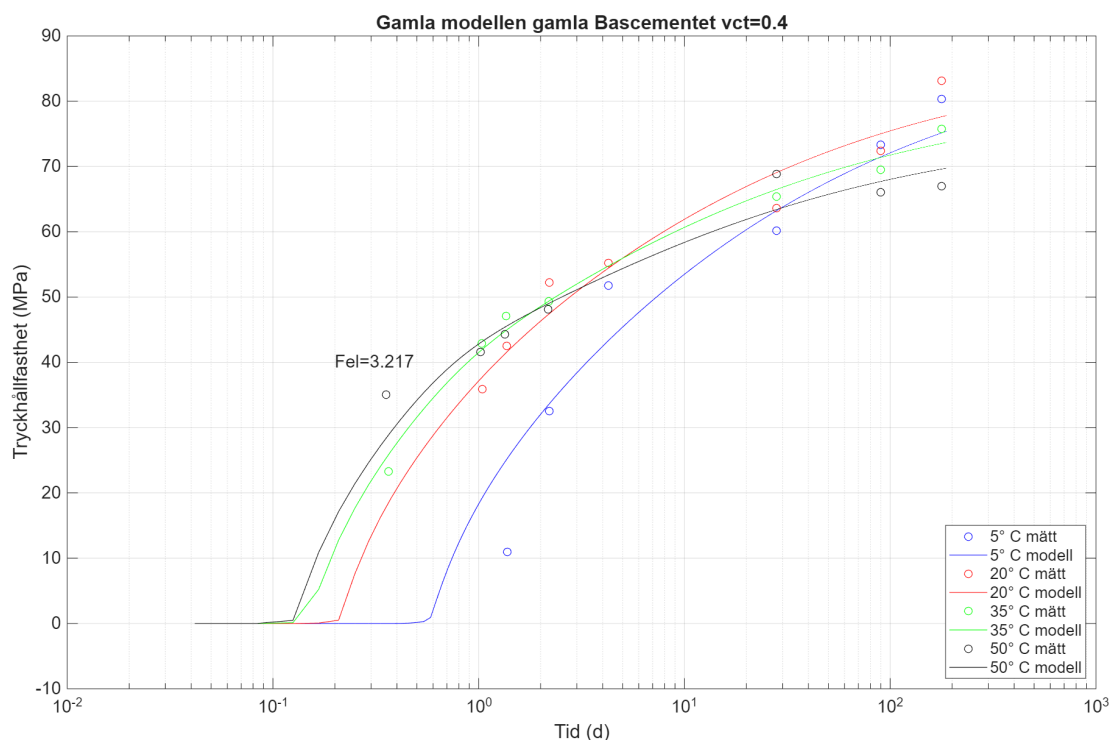
Figur 20. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW)

3.4.5 Hållfasthet – anpassning

Exempel på hur den föreslagna modellen fungerar i verkligheten ges i Figur 21 med motsvarande anpassning från den gamla modellen i Figur 22 som jämförelse.



Figur 21. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme



Figur 22. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

En sammanfattning av samtliga anpassningar av hållfastheten ges i Tabell 9. Här framgår att den nya modellen inte presterar lika bra som den gamla, även om den ibland inte ligger långt ifrån. Man skall här komma ihåg att just hållfastheten i den gamla modellen är den enda modellerade egenskapen som tar hänsyn till temperaturen, inte bara avseende hur fort den utvecklas utan även mot vilket slutvärde. Detta sker dock till ett pris för en komplex korrektion av referenshållfastheten med 5 anpassningsparametrar endast för korrektionen.

Vct	Anpassningsfel Fcc (MPa)		
	Gammal modell	Ny modell, mot AlfaC och AlfaW (en term för värme)	Ny modell, mot AlfaC och AlfaW (två termer för värme)
0,32	4,12	5,21	7,07
0,40	3,22	4,28	3,97
0,55	1,55	4,05	3,98

Tabell 9. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (Fcc) för den gamla modellen och den nya modellen med bi-linjär anpassning mot bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) där både en och två termer i ekvationen för värme används för anpassning av underliggande hydratationsgrader

3.4.6 Diskussion

I den nya modellen står den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden i centrum, då alla mätbara egenskaper på något sätt baserar sig på den. Den första svårigheten i anpassningarna ovan och konstruktionen av ekvationer som kopplar denna hydratationsgrad till de mätbara egenskaperna grundar sig i frånvaron av mätdata för just bindemedelsrelaterad hydratationsgrad. Detta resulterar i att anpassningarna av dessa parametrar indirekt sker genom anpassningar till de uppmätta egenskaperna som kemiskt bundet vatten, tryckhållfasthet och hydratationsvärme. Tillgång till mätdata för

hydratationsgrad skulle avsevärt kunna underlätta finjustering av hur denna är kopplad till de andra egenskaperna i modellen.

Då den bindemedelsrelaterade hydratationsgraden anpassas endast genom mätdata för kemiskt bundet vatten blir resultatet mycket bättre än för den gamla modellen. Detta beror främst på att den nya modellen kan ta hänsyn till att det binds olika mycket vatten per mängd bindemedel vid olika temperaturer. Det kan inte den gamla och skillnaden blir uppenbar.

När modellerna anpassas samtidigt till både kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme kompliceras bilden och modellprestanda försämras. Som redan konstaterat i analysen av den gamla modellen, som används som referens, verkar olika uppmätta egenskaper ha "sin egen syn" på hydratationsgrad. Samma fenomen syns även i anpassningar av den nya modellen. Detta avhjälpas inte heller särskilt effektivt av användning av två hydratationsgrader, den bindemedelsrelaterade som återger temperaturens påverkan på hydratationens hastighet och den vattenrelaterade som återger temperaturens påverkan på kvaliteten hos slutprodukten. Detta trots att den vattenrelaterade hydratationsgraden fungerar utmärkt i den nya modellen då anpassning endast sker mot kemiskt vatten.

Anledningarna till att kemisk bindning av vatten och hydratationsvärme inte tycks "dra jämnt" i modellen kan vara flera. Ansatsen i modellen för kemisk bindning av vatten baserar sig på forskningsresultat för sammansättningsvariation hos C-S-H-gelen som är ett resultat av reaktion hos kalciumpulver och möjligen senare puzzolaner. I början av hydratationen är det dock aluminater och ferroaluminater som dominerar reaktionen och binder relativt sett mycket mer vatten. Detta kan störa modellens enhetliga bild av kemiskt bundet vatten, särskilt i början av hydratationsförloppet. När det gäller själva hydratationsvärmen kan det vara så att den frisläpps proportionerligt mot hydratationsgrad vid konstant temperatur, men att temperaturberoendet inte är linjärt. Här tycktes inte ens kombinationen av två olika hydratationsgrader med dessutom en potens som medger krökning av kurvan för beroende av resp., ha gett ett stabilt och bättre resultat än i den gamla modellen. Då mätdata för hydratationsvärme vid konstant temperatur saknas kan man inte utföra en direkt analys mot korrelation mot hydratationsgraderna, se hur proportionalitetskoefficienterna varierar med temperatur och föreslå en bättre modell. Tillgång till lämpliga mätdata från isotermisk kalorimetri skulle kunna avhjälpa detta problem och resultera i framtagning av en bättre modellansats för hydratationsvärme.

Tryckhållfastheten är uppmätt vid olika konstanta temperaturer, vilket medger en mer direkt analys av korrelationer. Det kan konstateras att det verkar finnas ett linjärt samband mellan hållfastheten och bägge hydratationsgraderna. Detta verkar rimligt då både mängden reagerat bindemedel och mängden kemiskt bundet vatten bidrar till bildande av fasta slutprodukter av hydratationen som låser ballasten och det oreagerade bindemedlet mot varandra, vilket resulterar i hållfasthet. Den framtagna modellansatsen med linjärt beroende av bägge hydratationsgraderna ger en hyfsad dock inte fulltillfredsställande start. Det är dock svårt att ge en slutlig bedömning av hur bra den delen av modellen är. Detta då den baserar sig på hydratationsgrader anpassade till både kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme med samtliga problemställningarna diskuterade ovan.

Med anledning av ovanstående dras slutsatsen att en förenklad inmätning av kemiskt bundet vatten, som utnyttjar genom modellmässiga kopplingar hydratationsmodellen från enklare mätningar för tryckhållfasthet och hydratationsvärme, inte kan tas fram i nuvarande skede. För att detta skall vara möjligt och meningsfullt måste den nuvarande modellen förbättras främst avseende koppling mellan hydratationsvärme och hydratationsgrad.

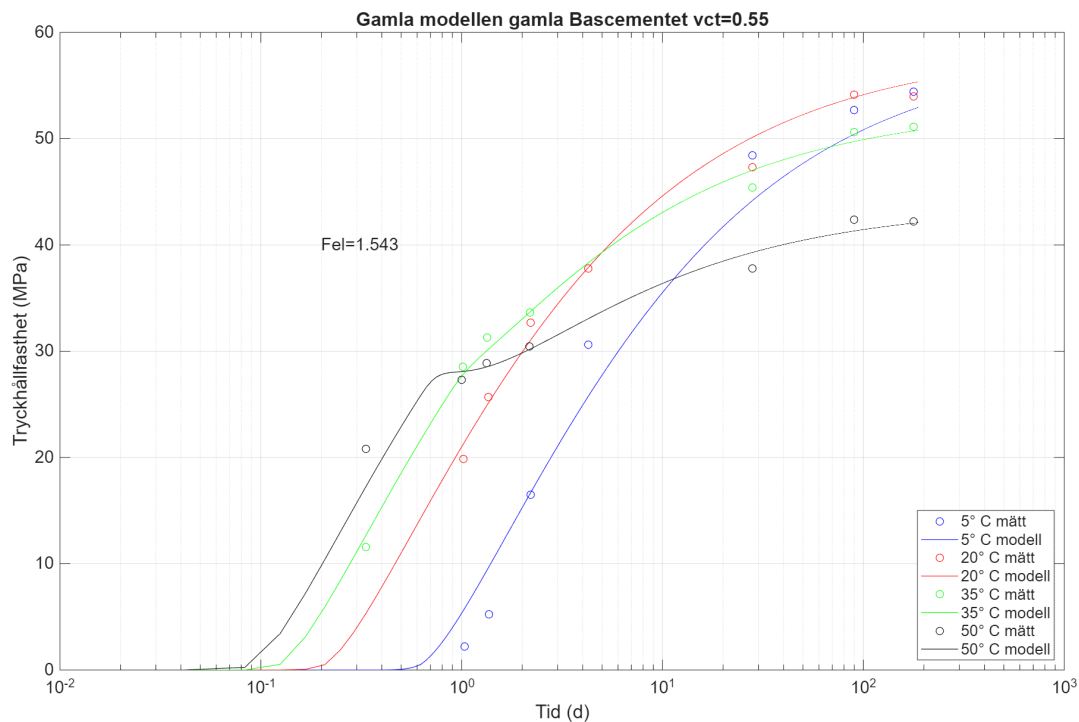
3.5 Värme och hållfasthet

Denna del i utredningen utgår från resultaten i den föregående och fokuserar på att utvärdera hur dessa fungerar om mätdata omfattar endast tryckhållfasthet och hydratationsvärme, dvs. utan mätning av kemiskt bundet vatten. Detta scenario är frekvent förekommande i sammanhang då man är ute efter att simulera betongens beteende endast avseende temperaturutveckling och hållfasthetstillväxt i syfte att beräkna formrivningstider eller anpassa åtgärder vid vintergjutning.

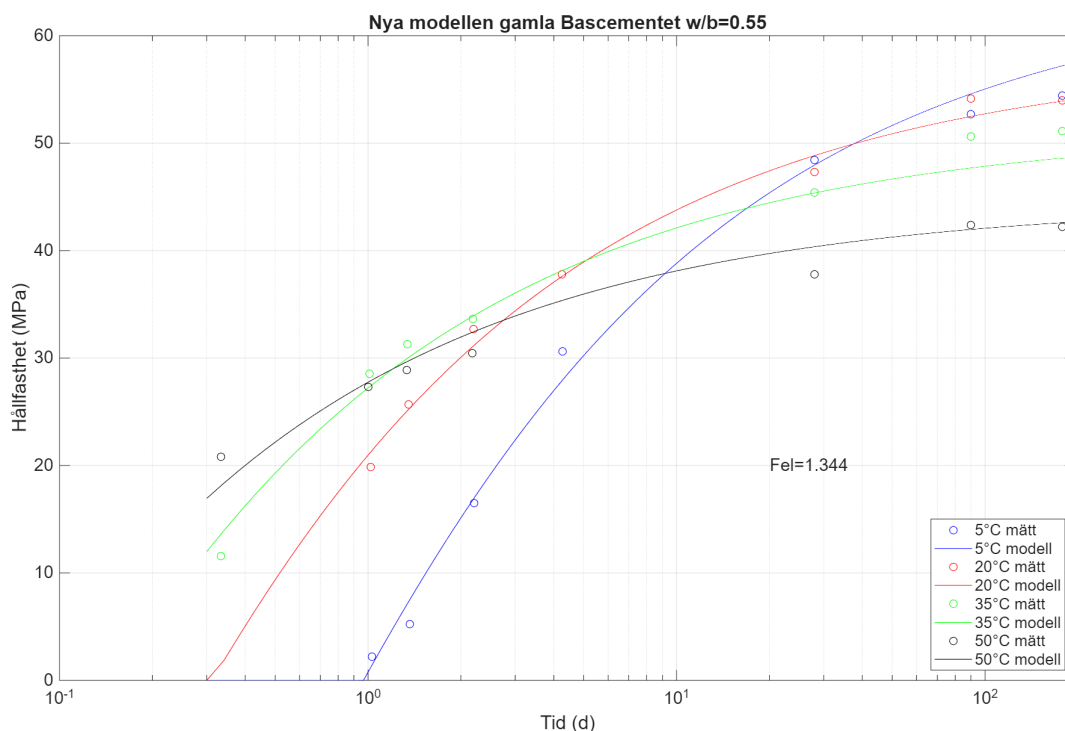
Först sker en anpassning av tryckhållfasthet med underliggande modell för hydratationsgrad. Därefter läggs hydratationsvärme till och helhetsresultaten presenteras. Slutligen sker en diskussion av resultaten, bakomliggande orsaker samt möjliga vägar fram för förbättring och tillämpning av den nya modellen.

3.5.1 Hållfasthet som start

Anpassningsförfarande i denna del av utredningen är annorlunda då data för kemiskt bundet vatten inte är tillgängliga. Här börjar anpassningen med tryckhållfasthet eftersom dessa data klart och tydligt återspeglar inverkan av olika temperaturer under hydratationsförloppet. Modellen för hydratationsgraderna, dvs. den bindemedelsrelaterade och den vattenrelaterade, är som tidigare och modellen för tryckhållfastheten är den föreslagna i analysen i kap. 3.4.4. Exempel på anpassningsresultaten ges i Figur 24 med motsvarande för den gamla modellen i Figur 23 för jämförelse.



Figur 23. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen



Figur 24. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet

En sammanfattning av anpassningarna ges i Tabell 10. Här framgår det att modellerna presterar ungefär likvärdigt, med mindre skillnader i olika riktningar för olika vattencementtalen.

	Anpassningsfel Fcc (MPa)	
Vct	Gammal modell	Ny modell
0,32	4,10	4,26
0,40	3,21	3,08
0,55	1,54	1,34

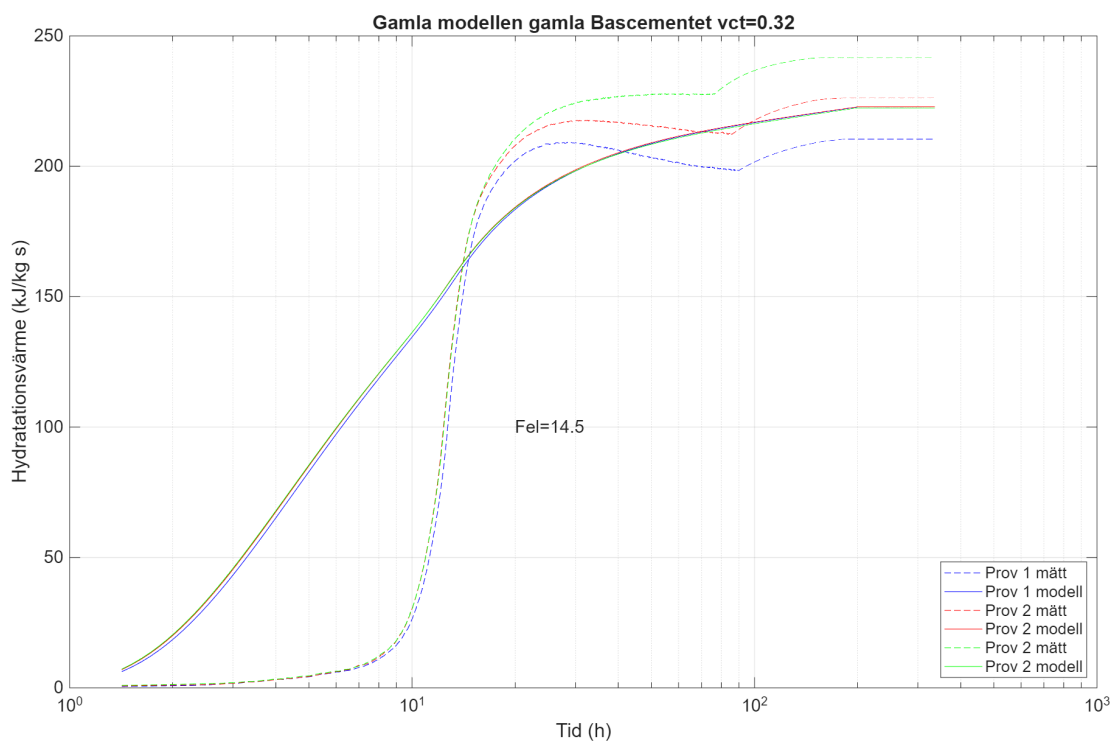
Tabell 10. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (Fcc) för den gamla modellen och den nya modellen där anpassning skett endast mot mätdata för tryckhållfasthet

3.5.2 Initial anpassning av hydratationsvärme

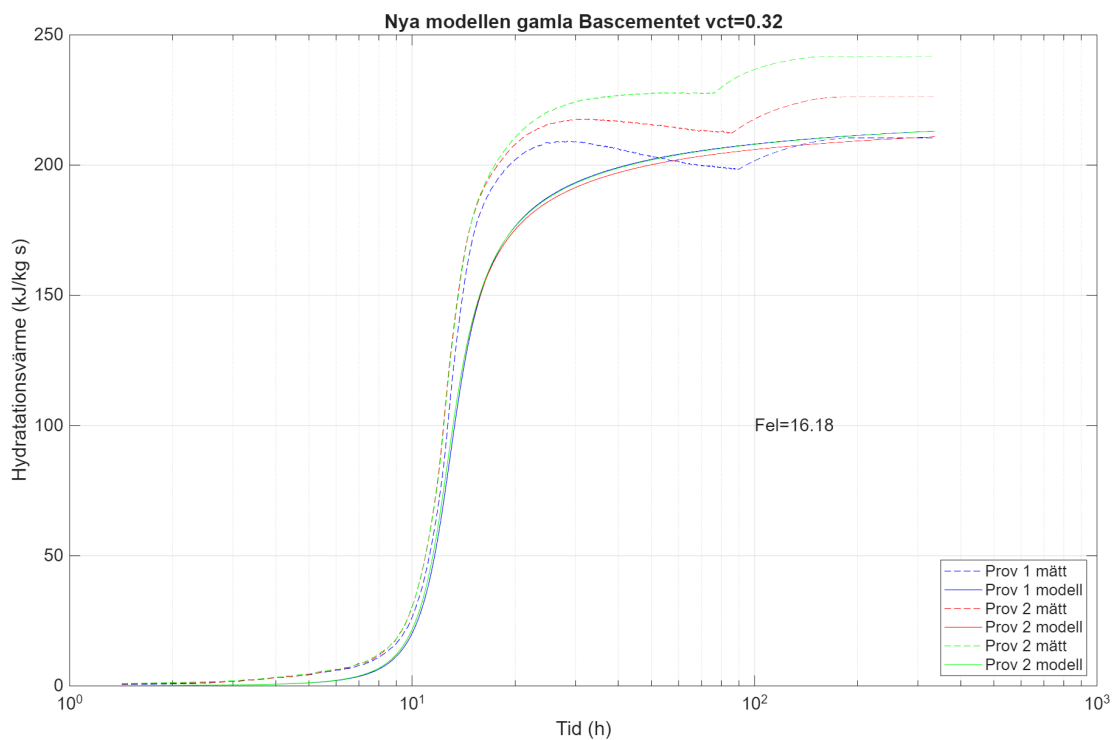
Som nästa steg sker en initial anpassning av parametrar till mätdata för hydratationsvärme. Resultaten från denna redovisades i den tidigare delen av utredningen främst för analys av hur modellerna fungerar. Här ses denna del som ett mellansteg som inte tillför något i utredningen. Den redovisas inte i själva rapporten utan utredningen går vidare till de finjusterade parametrarna för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme. För den nyfikne redovisas dock samtliga anpassningsdiagram för detta mellansteg i bilaga 1.

3.5.3 Finjustering av parametrar

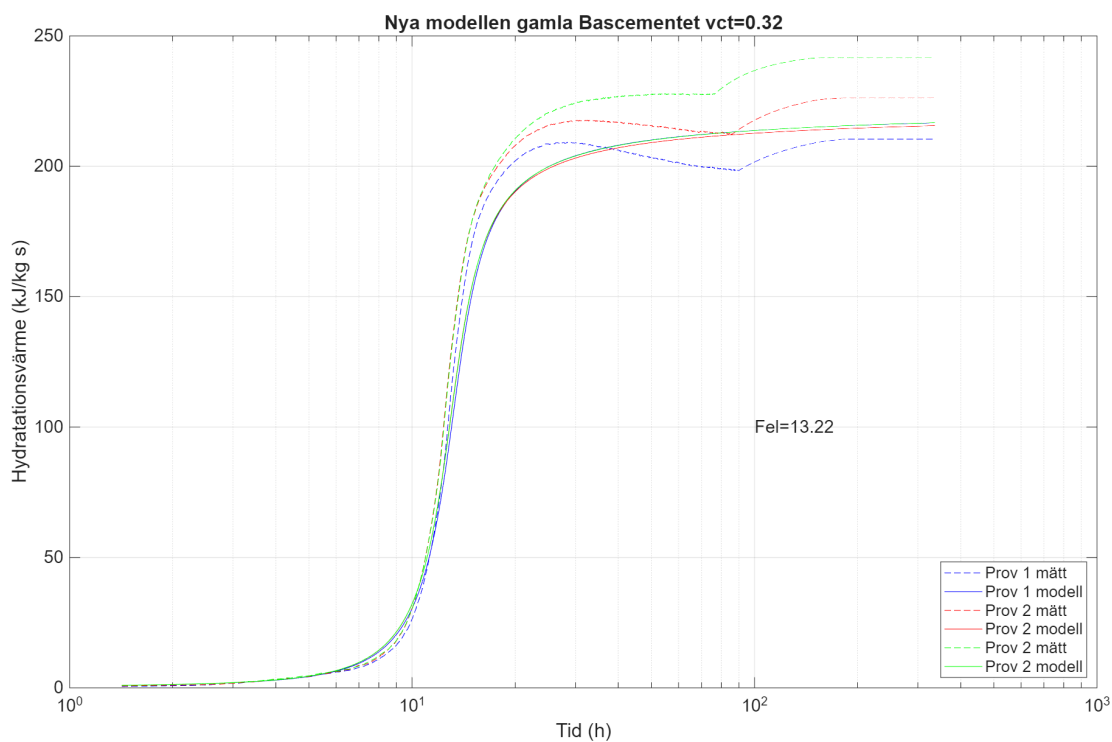
Slutligen finjusteras alla parametrar bakom modellerna för tryckhållfasthet och hydratationsvärme mot mätdata för båda egenskaperna samtidigt. Resultaten exemplifieras inkl. referens för den gamla modellen för hydratationsvärme i Figur 25-Figur 27 samt för tryckhållfasthet i Figur 28-Figur 30. Anpassningarna har även här utförts för bägge varianter för ekvationen för hydratationsvärme i den nya modellen, dvs. både för en och två termer.



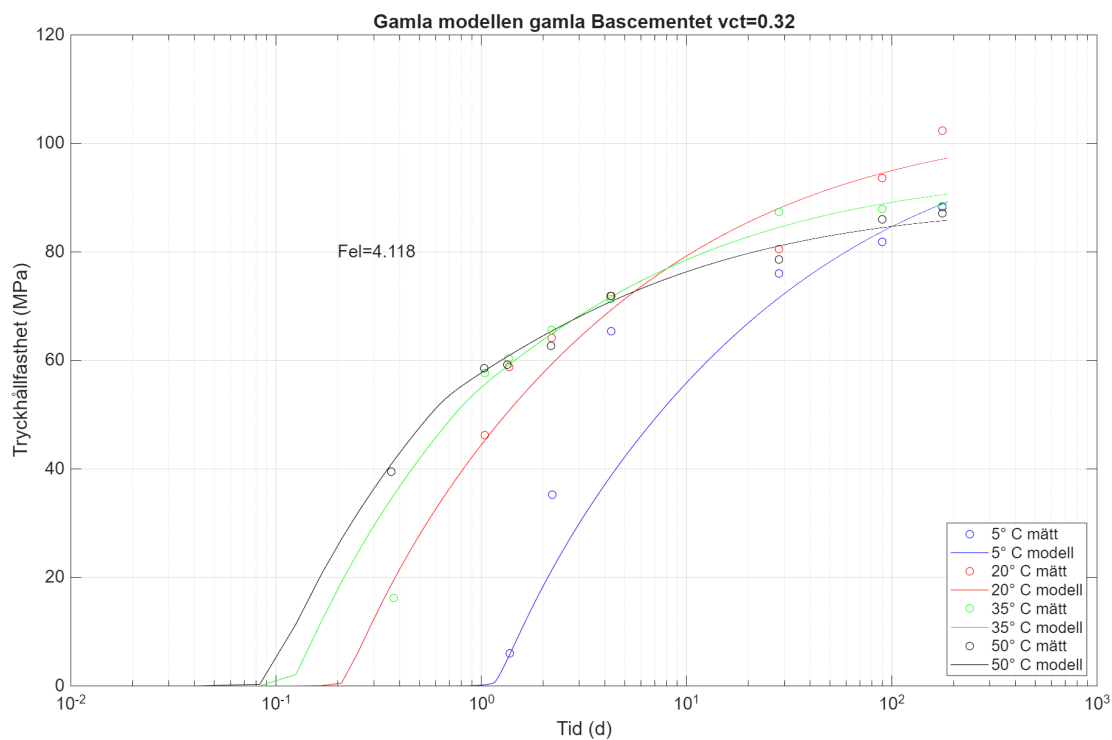
Figur 25. Anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen



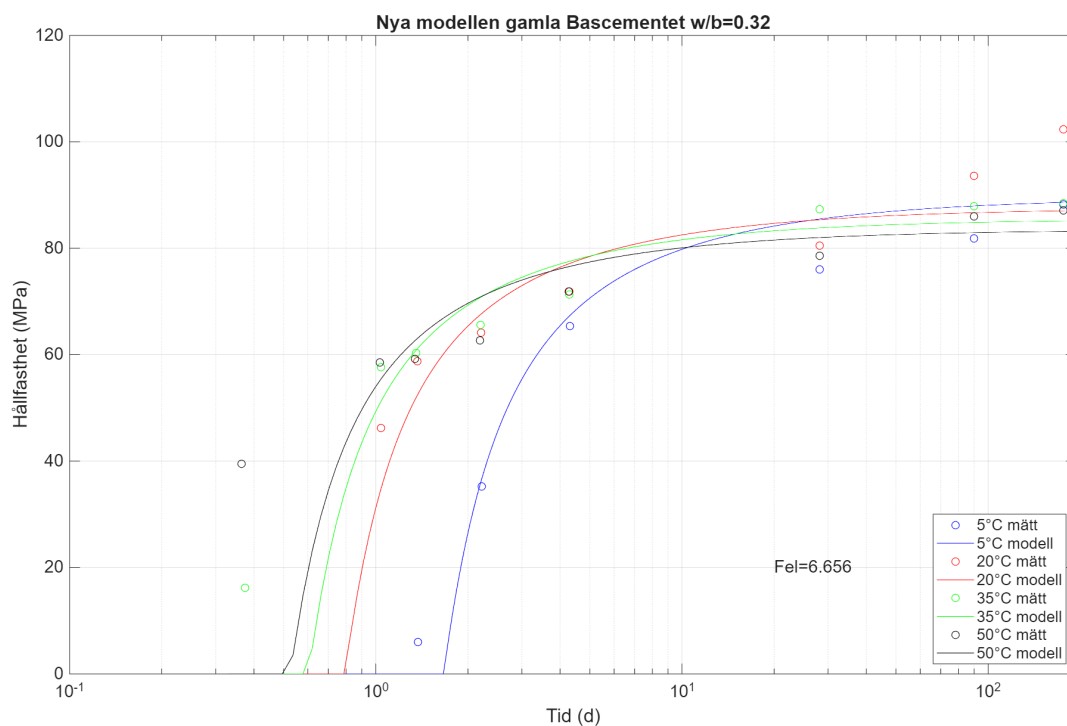
Figur 26. Anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



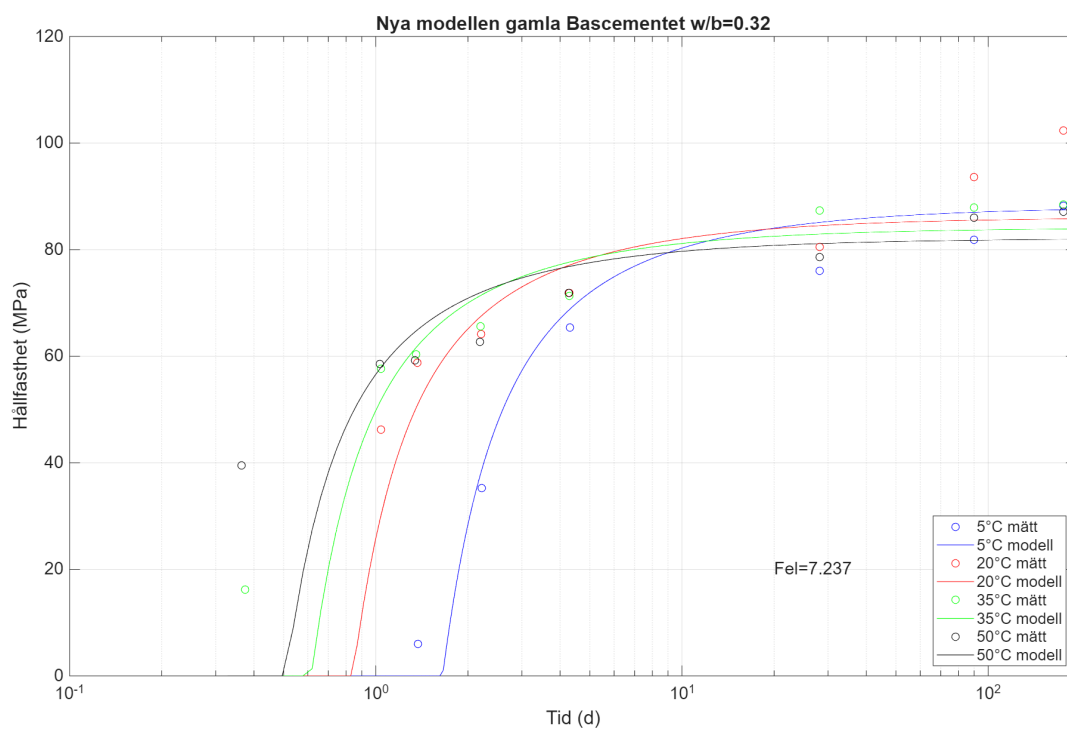
Figur 27. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



Figur 28. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen



Figur 29. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



Figur 30. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme

En sammanfattande bild av anpassningsresultaten ges i Tabell 11 för hydratationsvärme och Tabell 12 för tryckhållfasthet.

	Anpassningsfel Q (kJ/ kg s)		
Vct	Gammal modell	Ny modell en term	Ny modell två termer
0,32	14,50	16,18	13,22
0,40	15,64	14,38	18,11
0,55	6,68	5,60	7,40

Tabell 11. Anpassningsfel för hydratationsvärme (Q) för den gamla modellen och den nya modellen med både en och två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och tryckhållfasthet

	Anpassningsfel Fcc (MPa)		
Vct	Gammal modell	Ny modell (en term för värme)	Ny modell (två termer för värme)
0,32	4,12	6,66	7,24
0,40	3,22	4,10	5,59
0,55	1,55	1,99	2,31

Tabell 12. Anpassningsfel för tryckhållfasthet (Fcc) för den gamla modellen och den nya modellen med både en och två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och tryckhållfasthet

Prestandan för den nya modellen verkar vara jämförbar för hydratationsvärme med differenser som slår litet olika. För tryckhållfastheten är den också jämförbar, dock något sämre än den gamla modellen.

3.5.4 Diskussion

Den främst slutsatsen från denna del av utredningen är att den använda kopplingen mellan hydratationsgrader och tryckhållfasthet verkar fungera bra, då dess anpassning inte störs av samtidig anpassning av värme. Detta framgår av initialanpassningen av hållfastheten. Någon förbättring erbjuder inte den nya modellen jämfört med den gamla när det gäller anpassningsfelen. De verkar fungera lika bra. Här skall dock observeras att tryckhållfastheten i den gamla modellen är den enda egenskapen som tar hänsyn till temperaturens inverkan på nivå av slutvärden och kan modellera den s.k. cross-over-effekten. Här förväntas alltså inte någon markant förbättring utan snarare en förenkling i modellmatematiken. Den gamla modellen bygger på en mycket komplex korrektion av referenshållfasthet, vilket den nya eliminerar med en enkel koppling till hydratationsgrader.

Precis som i den tidigare delen av utredningen, kompliceras bilden då samtidig anpassning mot hydratationsvärme kommer in i bilden. Även här försämras totalprestandan för den nya modellen och denna försämring påverkar hållfastheten. Samma resonemang till varför värmemodellen är den mest misstänkta i sammanhanget som i den tidigare delen av utredningen är på sin plats. Även här skulle en mer träffsäker ansats, baserad på analys av mätdata från isotermisk kalorimetri, kunna förbättra hela bilden.

Den generella slutsatsen är att innan värmedelen av den nya modellen har bättre prestanda, när den anpassas tillsammans med hållfasthetsdata, är inte modellen redo för en bred tillämpning.

4 Slutsatser & rekommendationer

Projektets allmänna slutsats är att den nya modellen visar tydlig potential när det gäller användning av hydratationsgrad som processvariabel i modellering av den unga betongens egenskaper. De två stora förbättringarna jämfört med den gamla modellen som används idag är:

- inbyggd stopp för hydratation i grundmodellen till skillnad från en klocka som aldrig slutar ticka i fallet med temperaturekvivalent mognadsålder
- matematiskt enkel möjlighet att koppla egenskaper till hydratationsgrad där temperaturens inverkan kan inkluderas, inte bara på förloppets hastighet utan även slutprodukten kvaliteten.

Dessa slutsatser kan dras huvudsakligen av modellens prestanda avseende kemiskt bundet vatten och tryckhållfasthet, som ger lovande resultat.

Modelleringen av hydratationsvärme förblir för närvarande en kvarvarande utmaning med utrymme för förbättring. De två undersökta modellerna fungerar men ej på ett tillfredsställande sätt. Vid samtidig anpassning av flera egenskaper, där hydratationsvärme är inblandad, dras modellens totalprestanda ner. Detta då problem med värmemodellen påverkar anpassning av de generella parametrarna för hydratation, som används av alla modellerade egenskaper. Detta medför att de specifika målen inte kan uppnås avseende:

- att upprätta en metod för inmätning av kemiskt bundet vatten som är mindre i omfattning och således snabbare och billigare än dagens
- direkt användning av den nya modellen för hydratationsvärme och tryckhållfasthet

För att komma till rätta med ovanstående problem krävs en analys av hur hydratationsvärme korreleras till hydratationsgrad under konstant temperatur, vid flera olika temperaturer. Detta kan uppnås genom mätning av hydratationsvärme med isotermisk kalorimetri. En annan förstärkning av underliggande material för analys och finjustering av kopplingar mellan de modellerade egenskaperna samt hydratationsgraden vore uppskattning av hydratationsgraden med någon lämplig mätteknik, t.ex. röntgendiffraktion (XRD) kombinerad med s.k. Rietveldanalys. Med dessa data tillgängliga möjliggörs en nivå av korrelationsanalys som kan användas för att föreslå en mer träffsäker modellkoppling mellan hydratationsvärme och hydratationsgrad samt justera de övriga modellkopplingarna vid behov. Projektets rekommendation blir att utföra de ovan nämnda kompletterande analyserna, föreslå därpå baserade modelländringar, huvudsakligen för hydratationsvärme, och evaluerad modellens prestanda på nytt.

Då resultaten av denna utredning inte medger någon direkt tillämpning har projektet konstaterat att en publicering av en artikel i branschpressen i nuläget inte är meningsfull.

Referenser

Fjällström 2013 – Fjällström P., *Measurement and Modelling of Young Concrete Properties*, Licentiate Thesis, LTU 2013

Gallucci et al 2013 – E. Gallucci, X. Zhang, K.L. Scrivener, *Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-SH)*, Cement and Concrete Research 2013

PPB Manual del M2 - *Materialdata för ung betong – teori och mätning*, Byggföretagen 2025

PPB Manual del M3 - *Materialdata för ung betong – anpassning*, Byggföretagen 2025

SBUF 12563 – Hedlund, H., Ström, B., Gränne, F., Rapp, T., och Brander, P., *Branschgemensamma behov för prognoser av härdning och uttorkning i betong*

SBUF 13064 - Stelmarczyk M., Hedlund H., Johansson P., Nilsson L.-O., Åhs M., Rapp T., *Förstudie och metodutveckling för implementering av fuktberäkningsmodul i datorprogrammet Produktionsplanering Betong, Slutrapport*

SBUF 13197 & 13198 – Stelmarczyk M., Rapp T., Hedlund H., *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong, Slutrapport, 2019*

Stelmarczyk 2023 – Stelmarczyk M., *Applied Modeling of Moisture Phenomena in Concrete*, Doctoral Thesis, LTU 2023

Bilagor

Bilaga 1 – Diagram med resultat för samtliga utförda anpassningar inom denna utredning

Bilaga 2 – Bevis för matematisk likvärdighet mellan två modellansatser för värme

Innehåll Bilaga 1

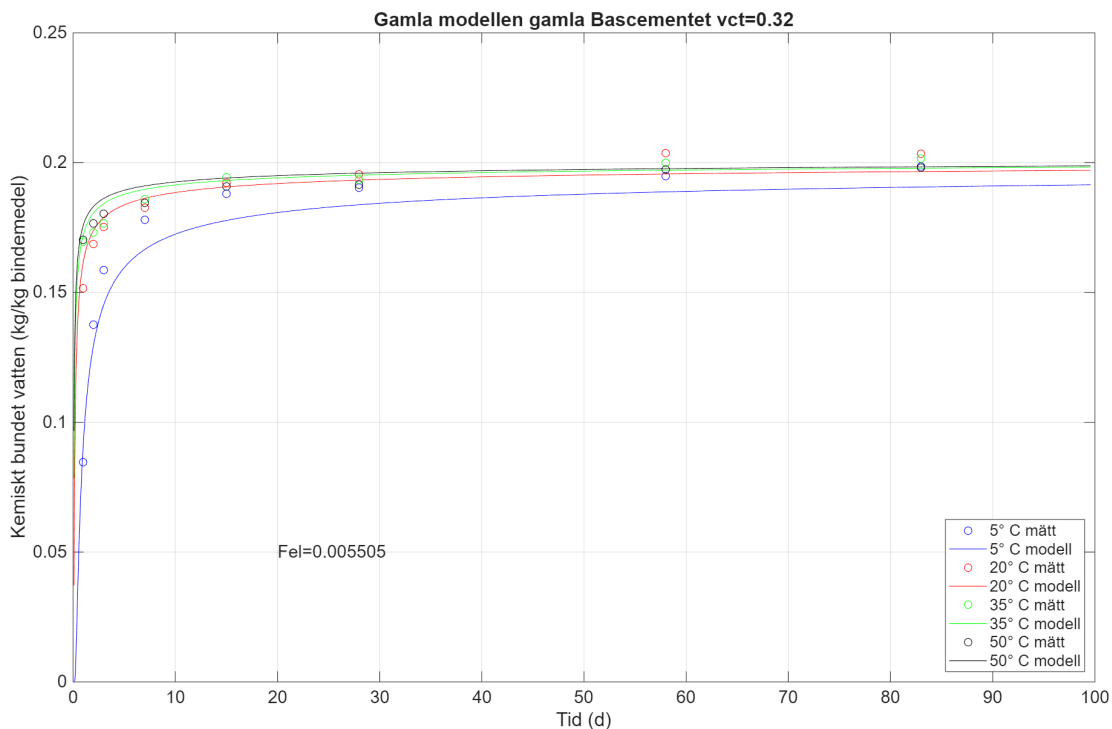
1	Gamla modellen separat anpassning	2
1.1	Kemiskt bundet vatten.....	2
1.2	Värme.....	5
1.3	Hållfasthet.....	8
2	Gamla modellen samtidig anpassning.....	12
2.1	Kemiskt bundet vatten.....	12
2.2	Värme.....	15
2.3	Hållfasthet.....	18
3	Nya modellen - vatten, värme och hållfasthet, en term för värme	22
3.1	Initialt kemiskt bundet vatten.....	22
3.2	Initialt värme	25
3.3	Justerat värme & kemiskt bundet vatten	28
3.4	Hållfasthet – analys mot AlfaC.....	34
3.5	Hållfasthet – analys mot AlfaW.....	37
3.6	Hållfasthet – analys mot AlfaC och AlfaW	40
4	Nya modellen - vatten, värme och hållfasthet, två termer för värme	45
4.1	Initialt kemiskt bundet vatten.....	45
4.2	Initialt värme	46
4.3	Justerat värme & kemiskt bundet vatten	49
4.4	Hållfasthet – analys mot AlfaC.....	55
4.5	Hållfasthet – analys mot AlfaW.....	58
4.6	Hållfasthet – analys mot AlfaC och AlfaW	61
5	Nya modellen - värme och hållfasthet, samtidig anpassning, en term för värme	66
5.1	Initial hållfasthet	66
5.2	Initial värme	69
5.3	Justerad hållfasthet och värme.....	72
6	Nya modellen - värme och hållfasthet, samtidig anpassning, två termer för värme.....	79
6.1	Initial hållfasthet	79
6.2	Initial värme	79
6.3	Justerad hållfasthet och värme.....	82

1 Gamla modellen separat anpassning

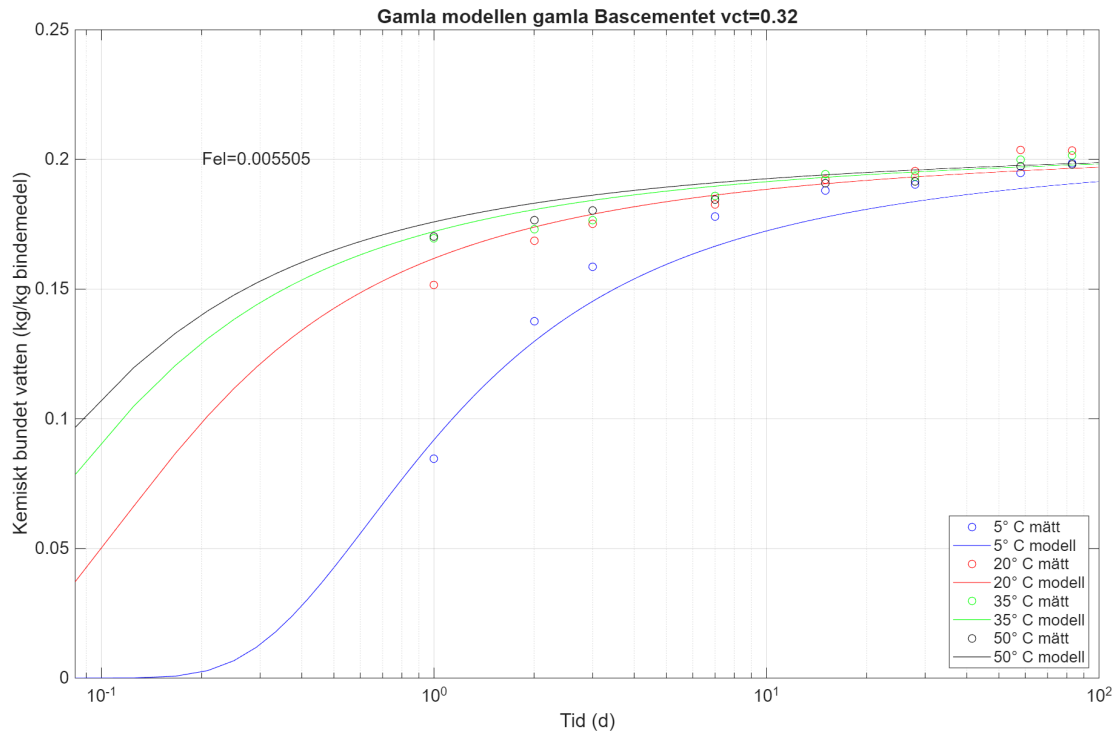
Anpassningsförfarandet är enligt:

- Anpassning av mognadsgrad och referenshållfasthet sker till mätdata för hållfasthet. Dessa resultat visas inte då de inte jämförs med några anpassningar i den nya modellen.
- Anpassning av kemiskt bundet vatten och hydratationsgrad sker till mätdata för kemiskt bundet vatten. Parametrar för mognadsgrad återanvänds.
- Anpassning av hydratationsvärme och separata parametrar för hydratationsgrad sker till mätdata för hydratationsvärme. Parametrar för mognadsgrad återanvänds.
- Anpassning av hållfasthetssänkning vid höga temperaturer sker till mätdata för hållfasthet. Parametrar för mognadsgrad, referenshållfasthet och hydratationsgrad från hydratationsvärme återanvänds.

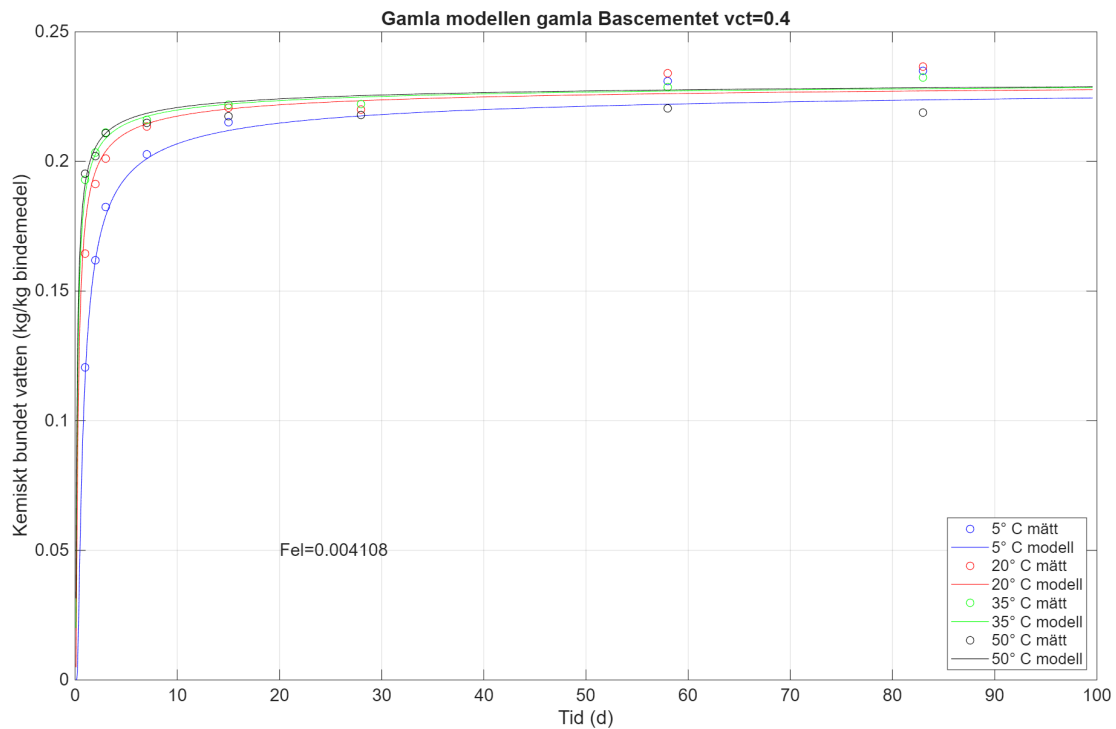
1.1 Kemiskt bundet vatten



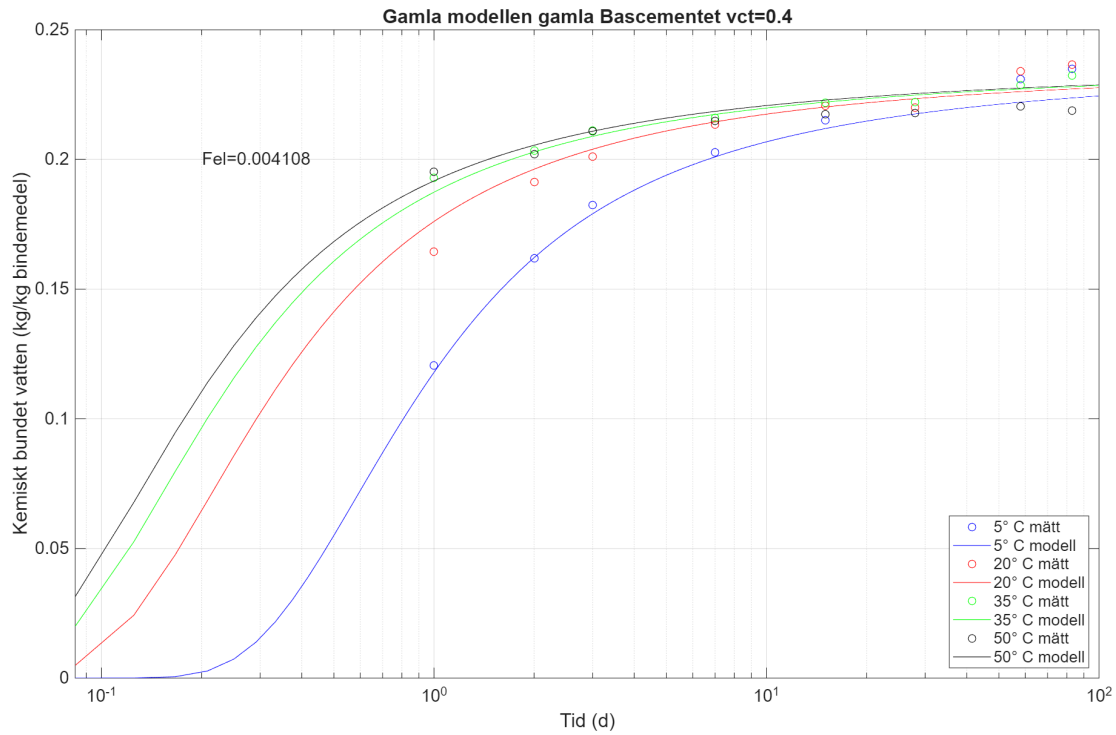
Figur 1. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



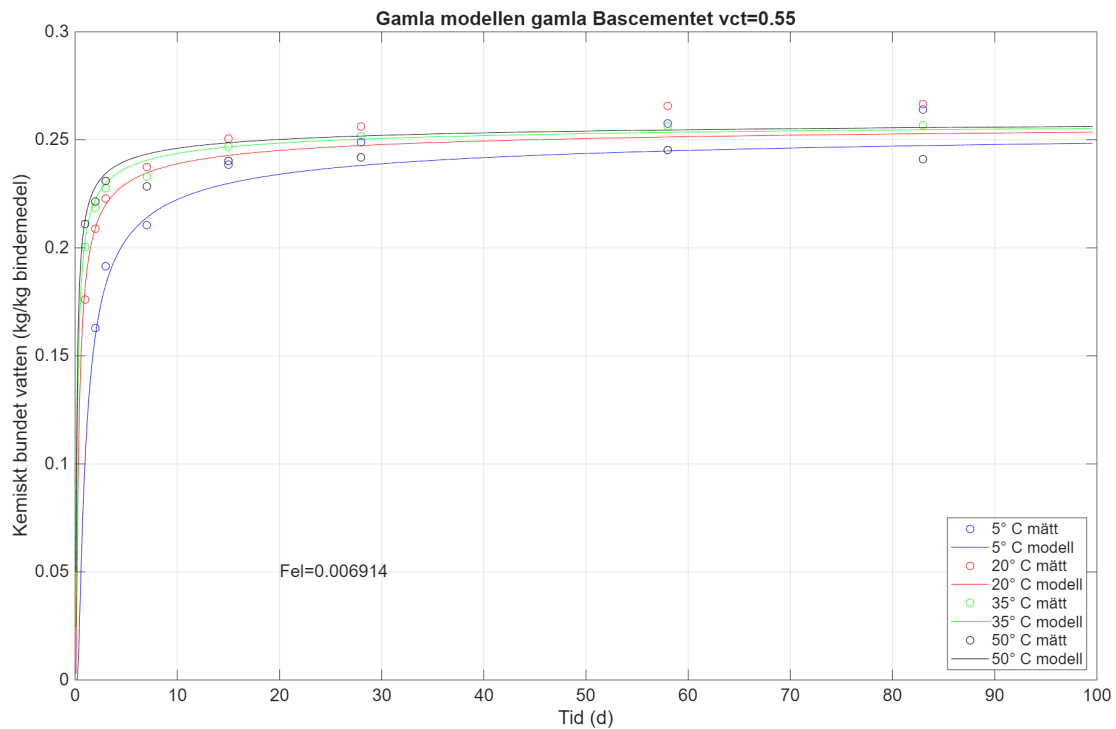
Figur 2. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



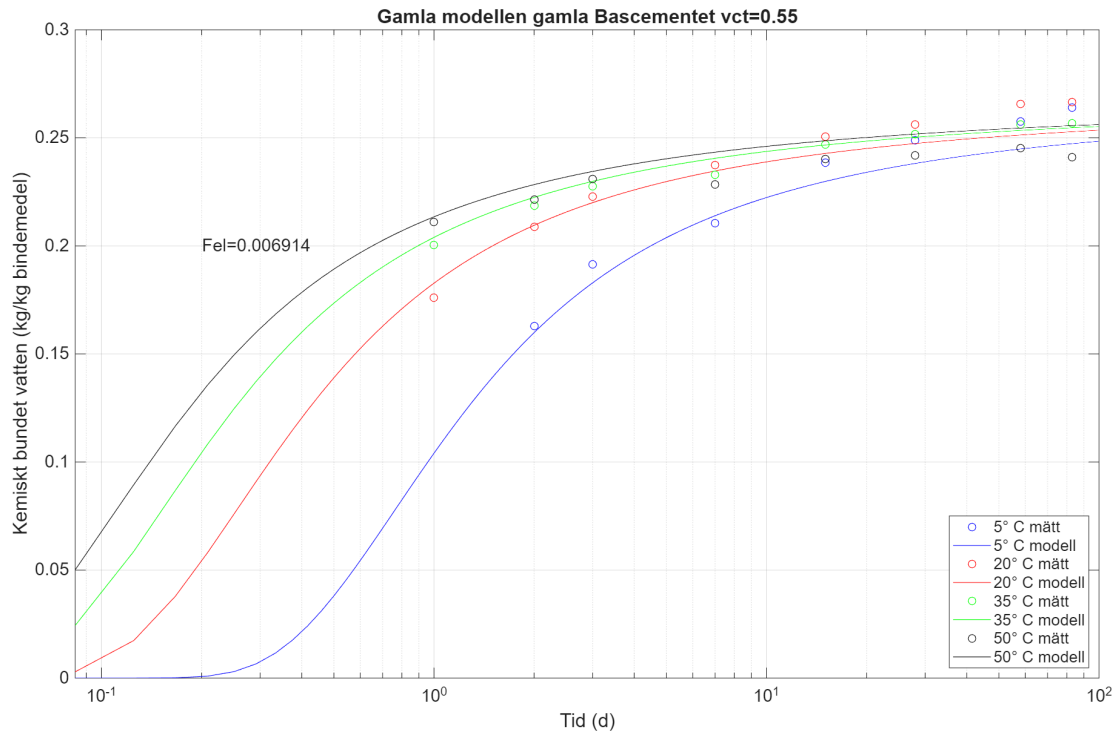
Figur 3. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



Figur 4. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.

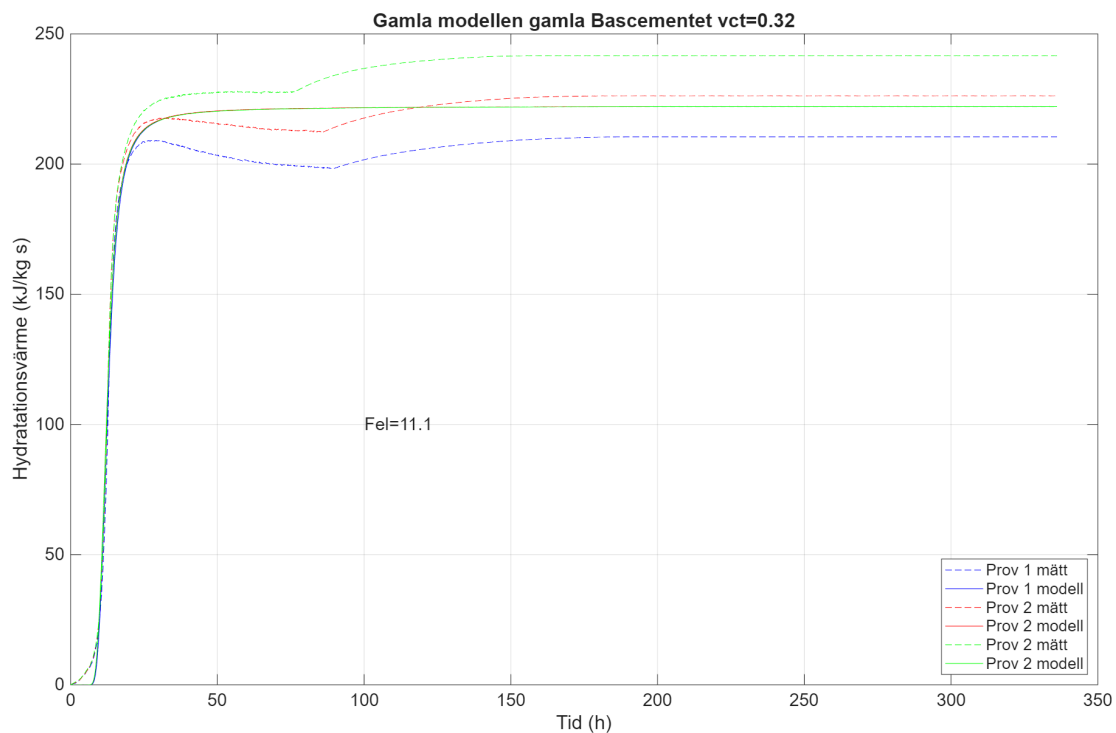


Figur 5. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.

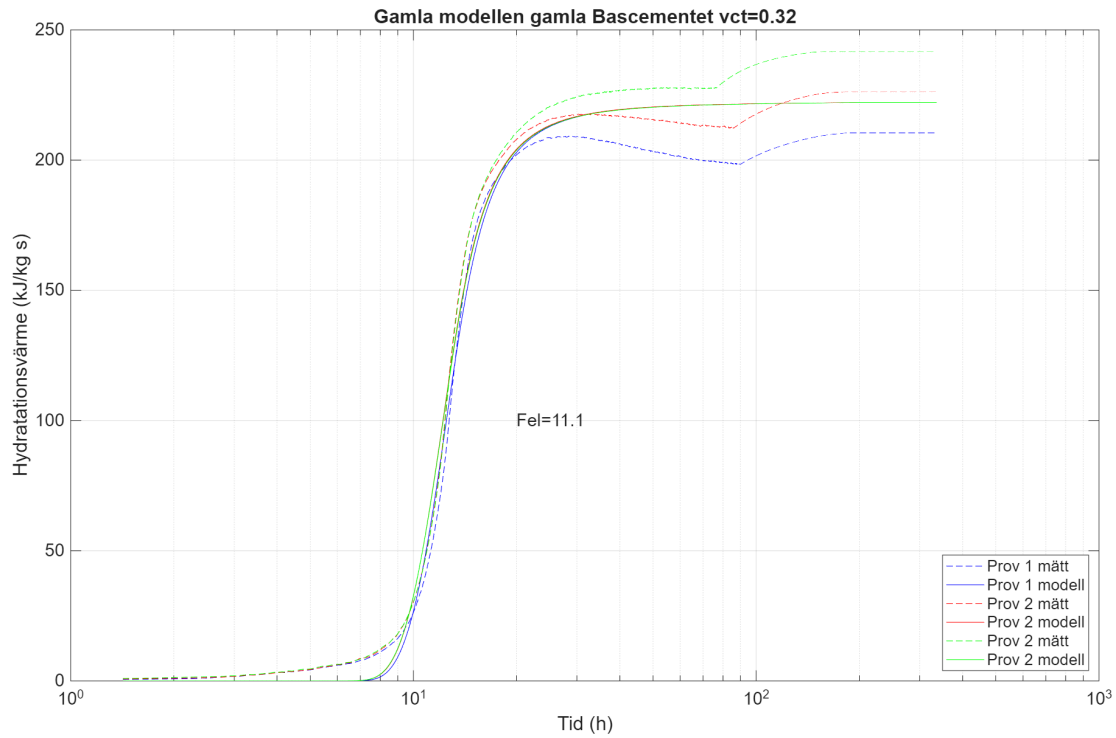


Figur 6. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.

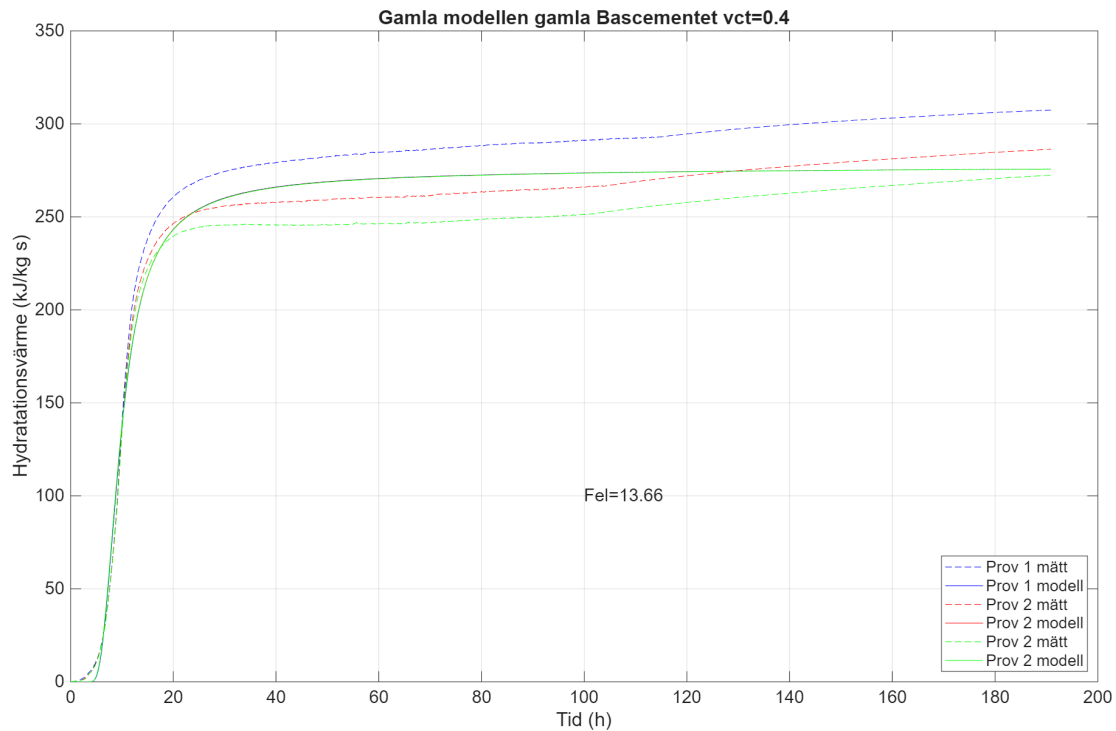
1.2 Värme



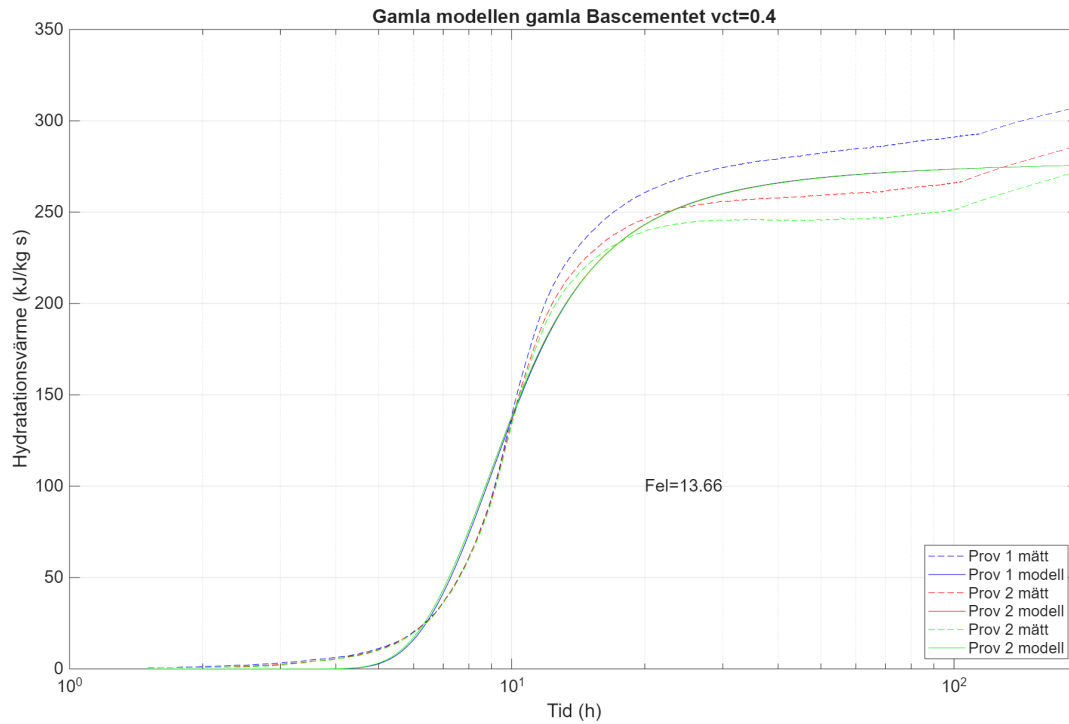
Figur 7. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



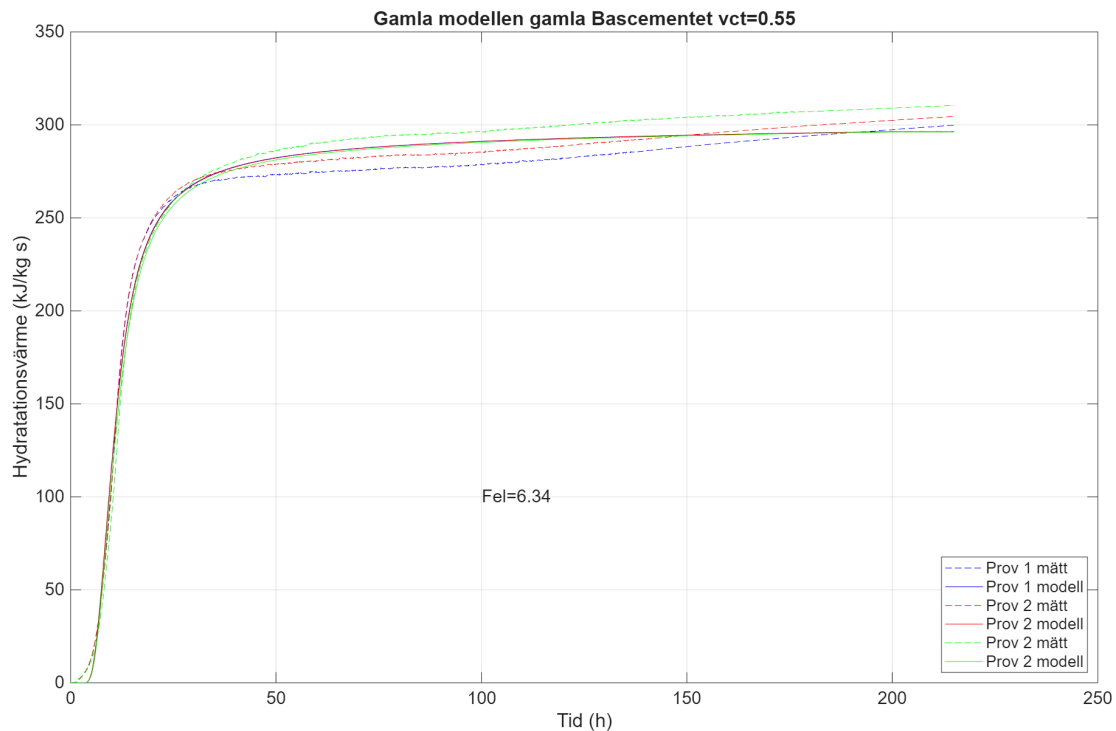
Figur 8. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



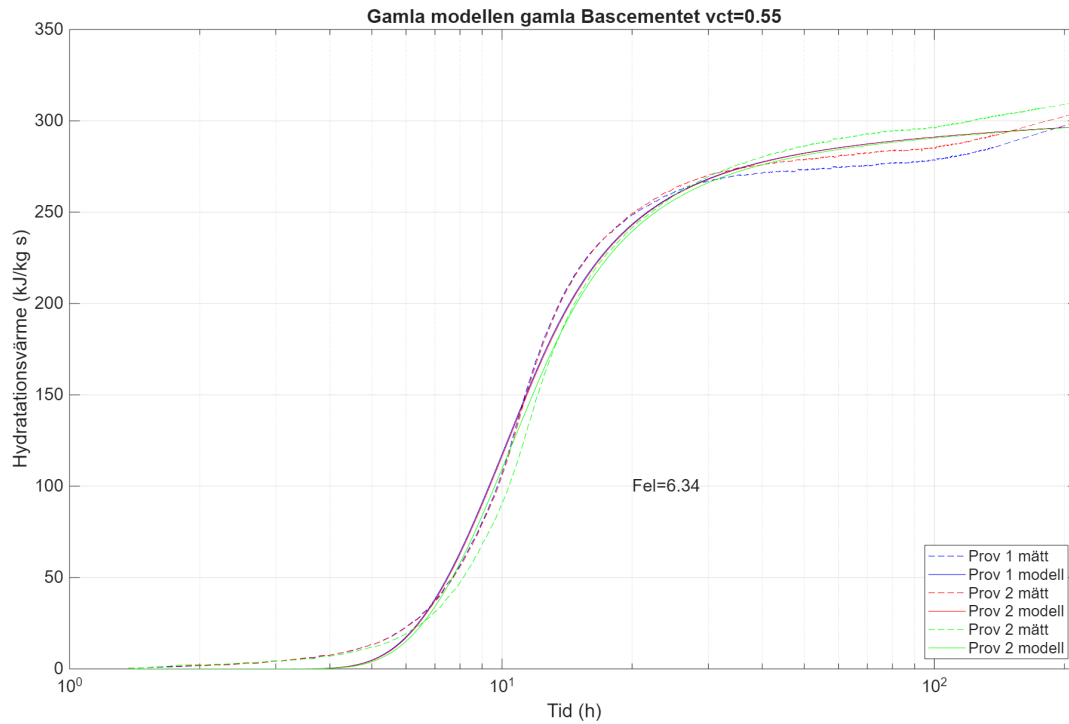
Figur 9. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



Figur 10. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

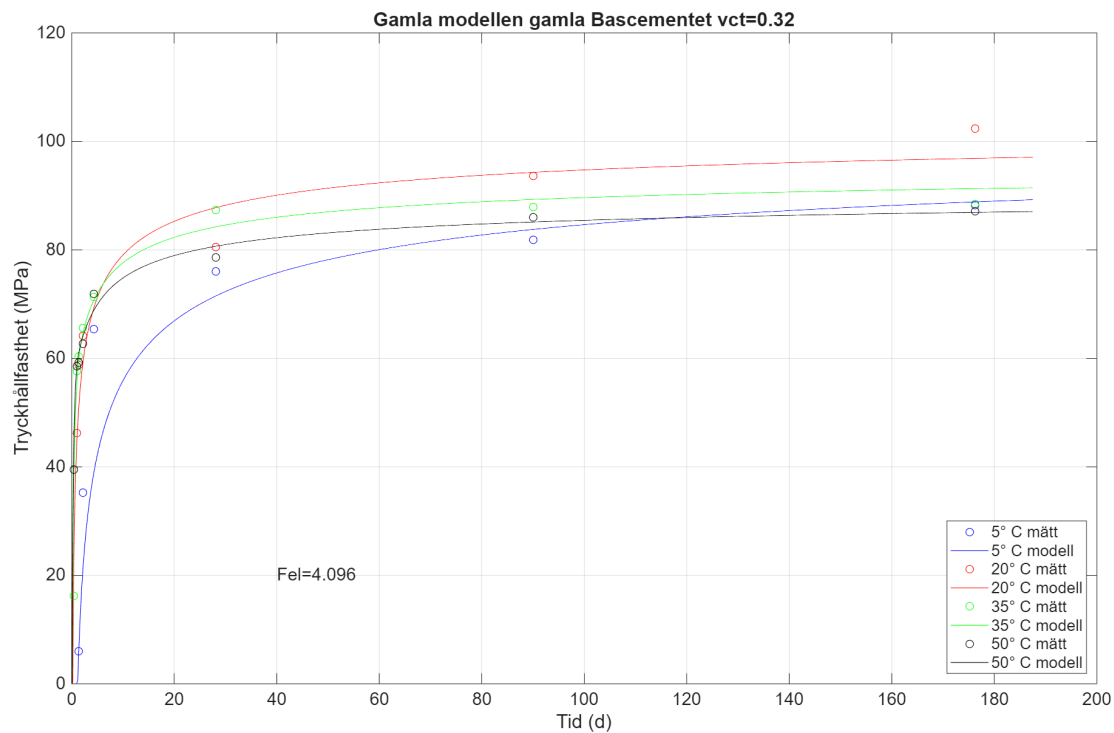


Figur 11. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

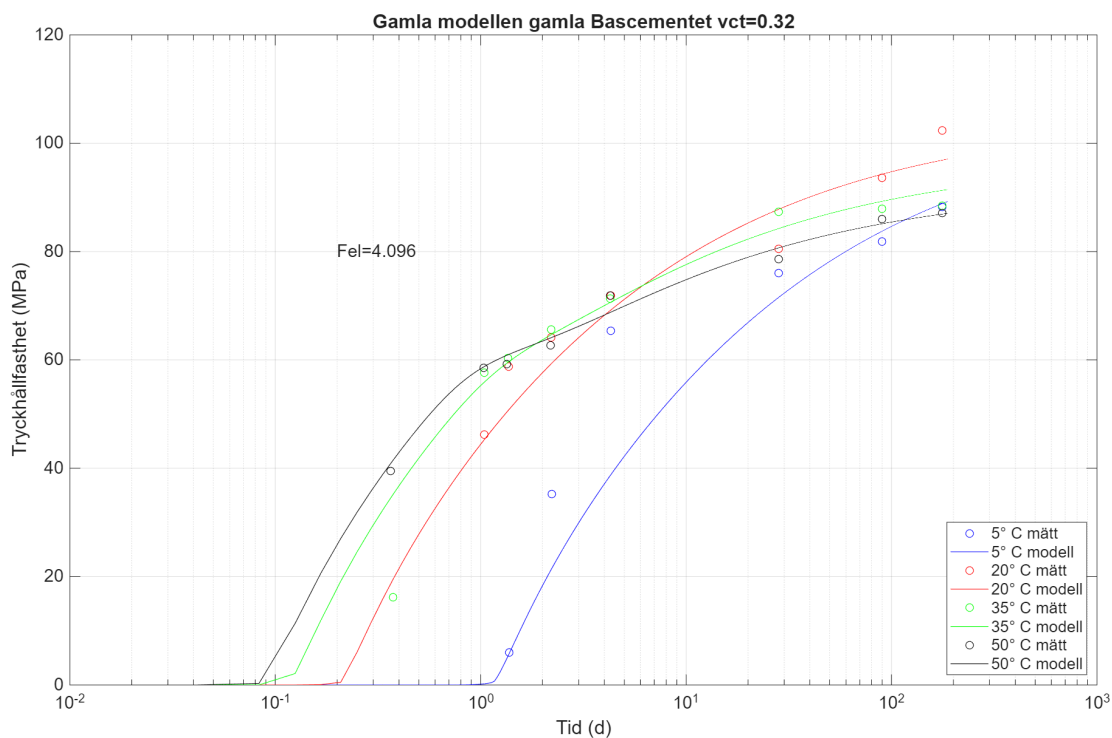


Figur 12. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där separata parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

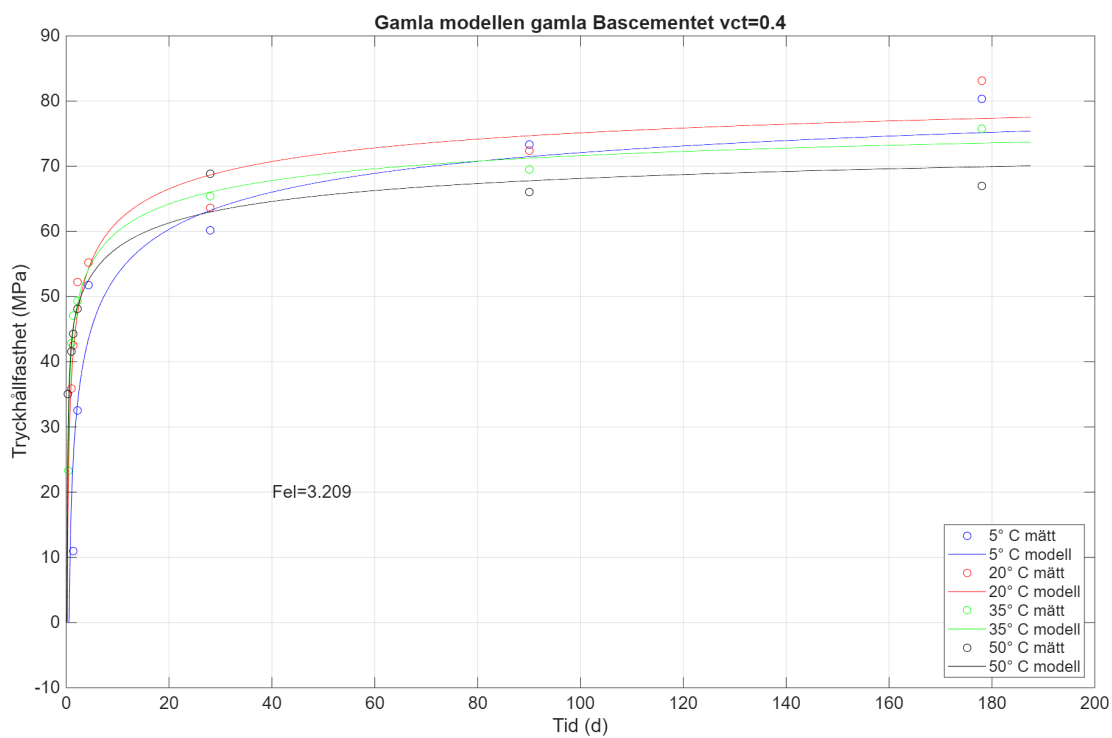
1.3 Hållfasthet



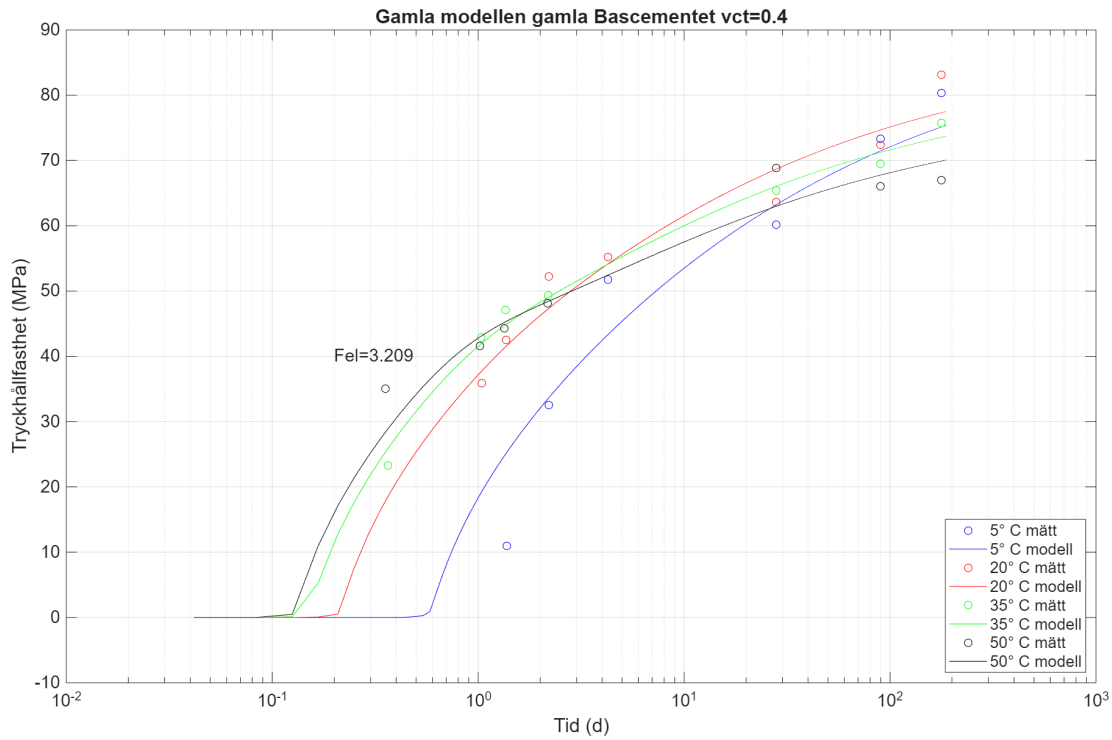
Figur 13. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme använts i denna anpassning



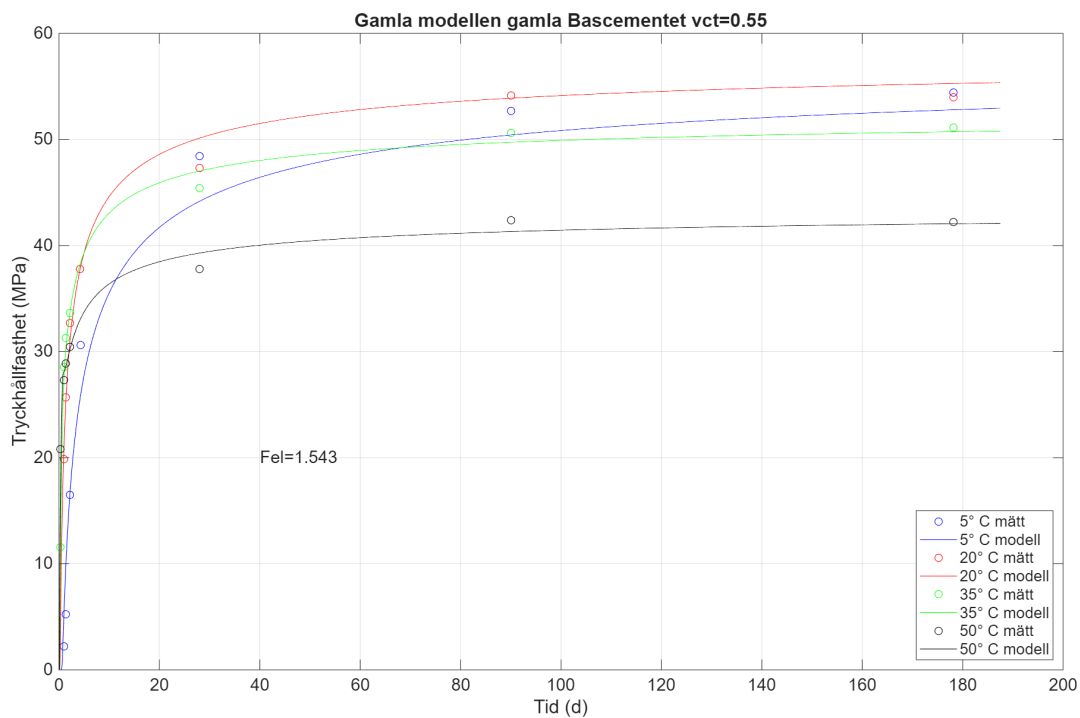
Figur 14. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassat till mätdata för värme använts i denna anpassning



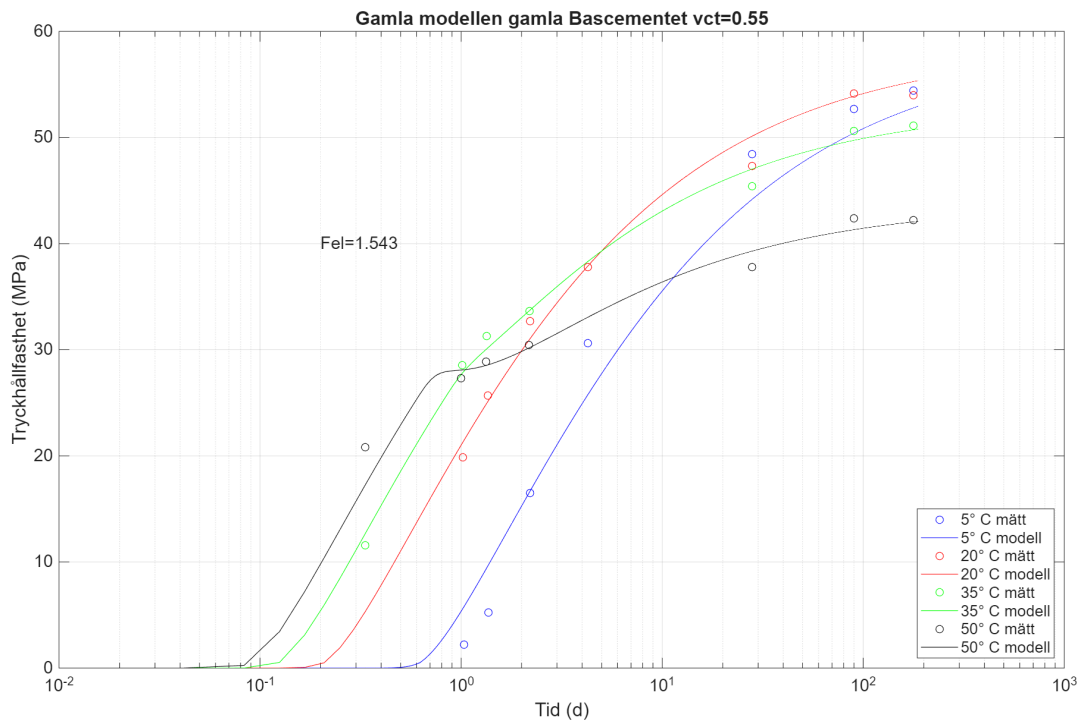
Figur 15. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassat till mätdata för värme använts i denna anpassning



Figur 16. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassat till mätdata för värme använts i denna anpassning



Figur 17. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassat till mätdata för värme använts i denna anpassning



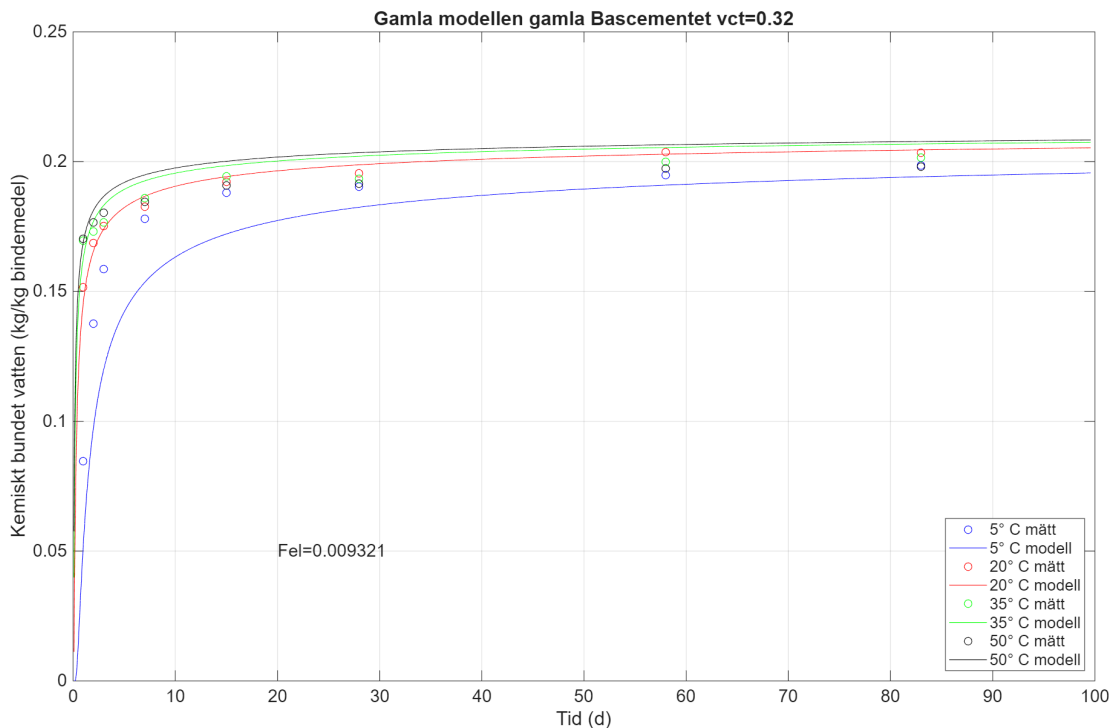
Figur 18. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där parametrar för hydratationsgrad anpassat till mätdata för värme använts i denna anpassning

2 Gamla modellen samtidig anpassning

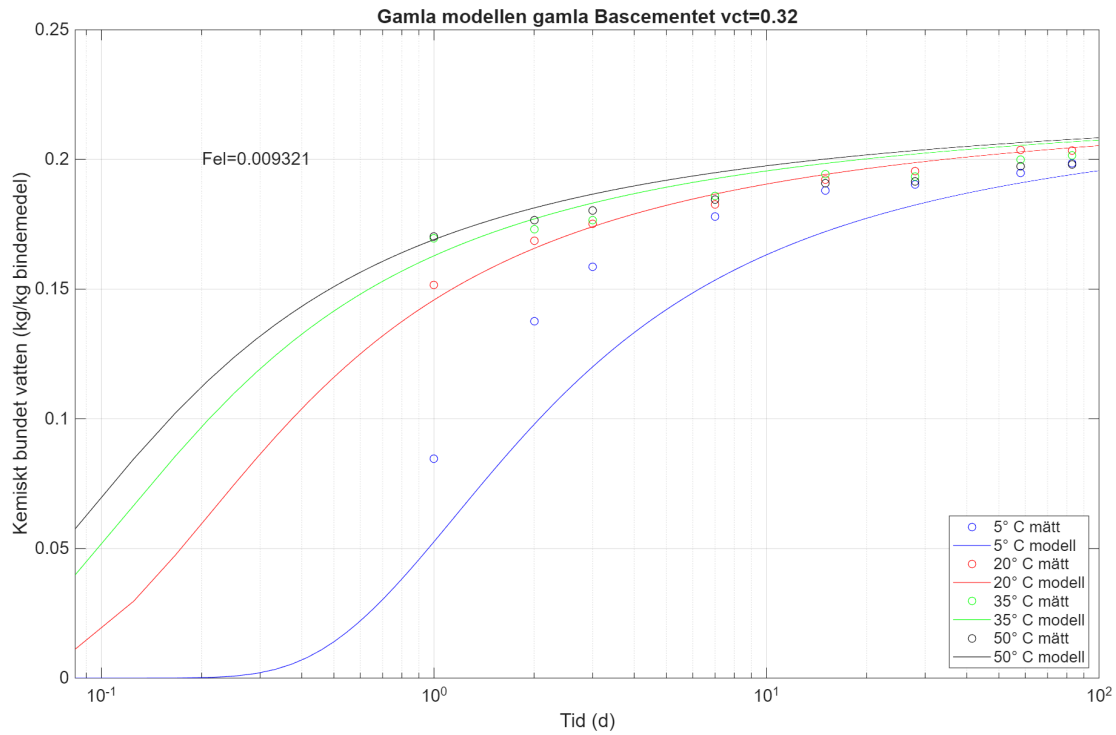
Anpassningsförfarandet är enligt:

- Anpassning av mognadsgrad och referenshållfasthet sker till mätdata för hållfasthet. Dessa resultat visas inte då de inte jämförs med några anpassningar i den nya modellen.
- Anpassning av kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme och hydratationsgrad sker samtidigt till mätdata för kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme. Parametrar för mognadsgrad återanvänds.
- Anpassning av hållfasthetssänkning vid höga temperaturer sker till mätdata för hållfasthet. Parametrar för mognadsgrad, referenshållfasthet och hydratationsgrad återanvänds.

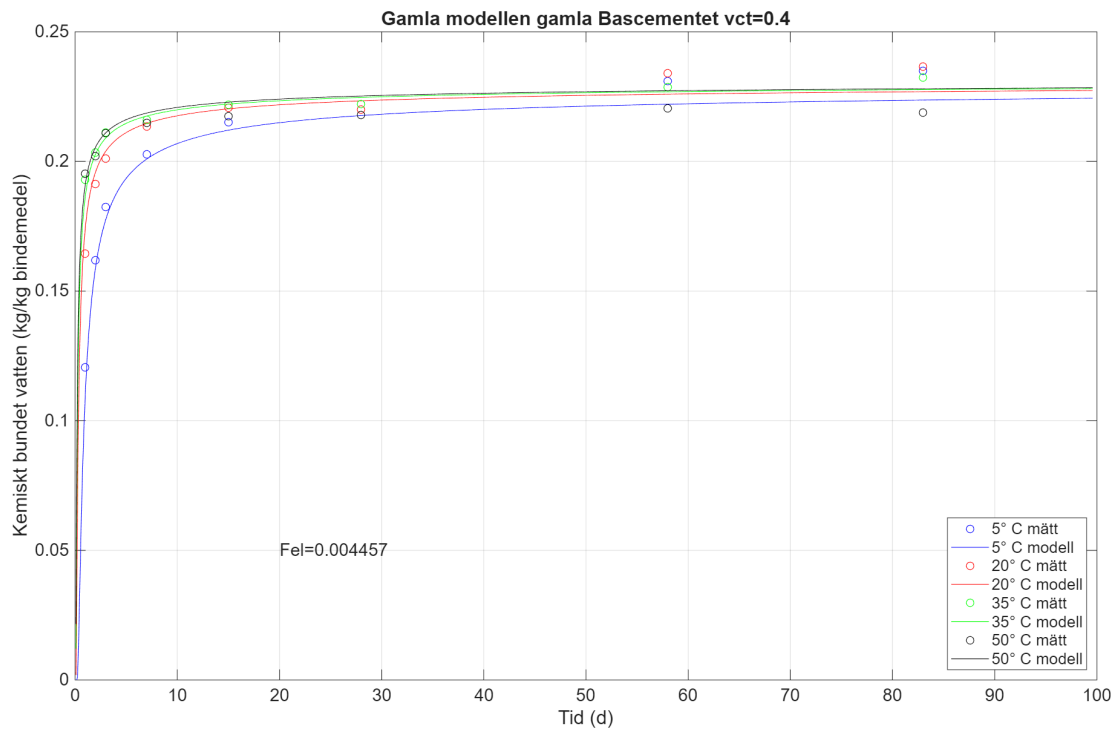
2.1 Kemiskt bundet vatten



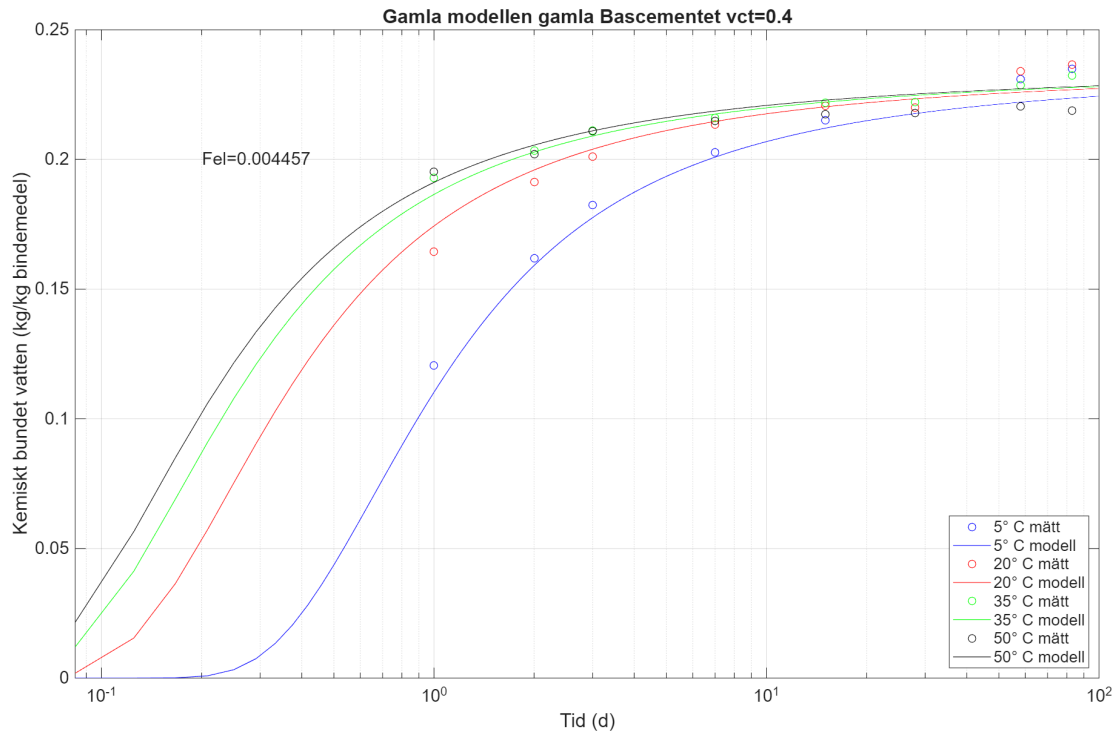
Figur 19. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten.



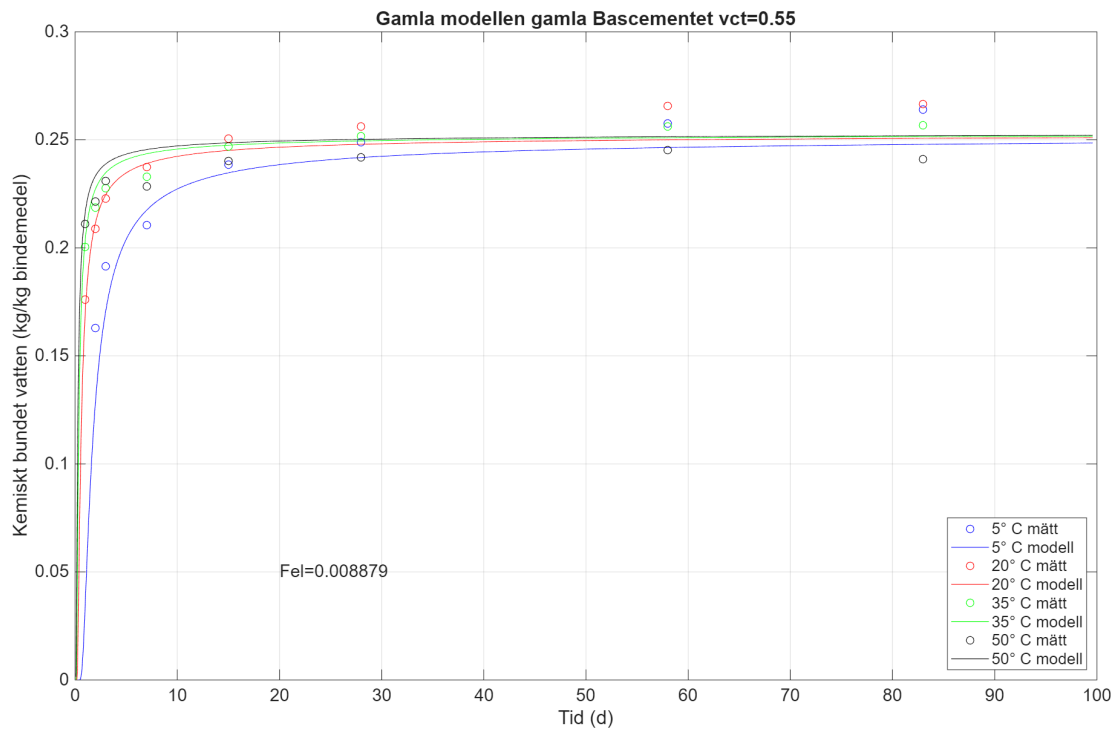
Figur 20. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



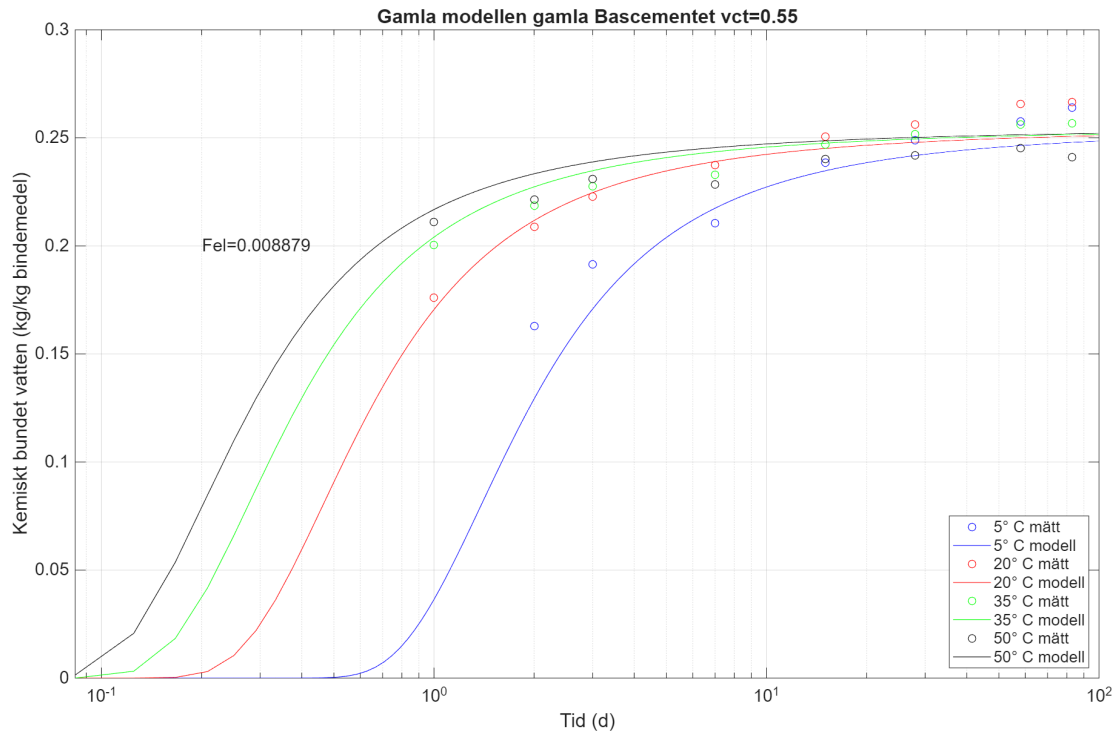
Figur 21. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



Figur 22. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

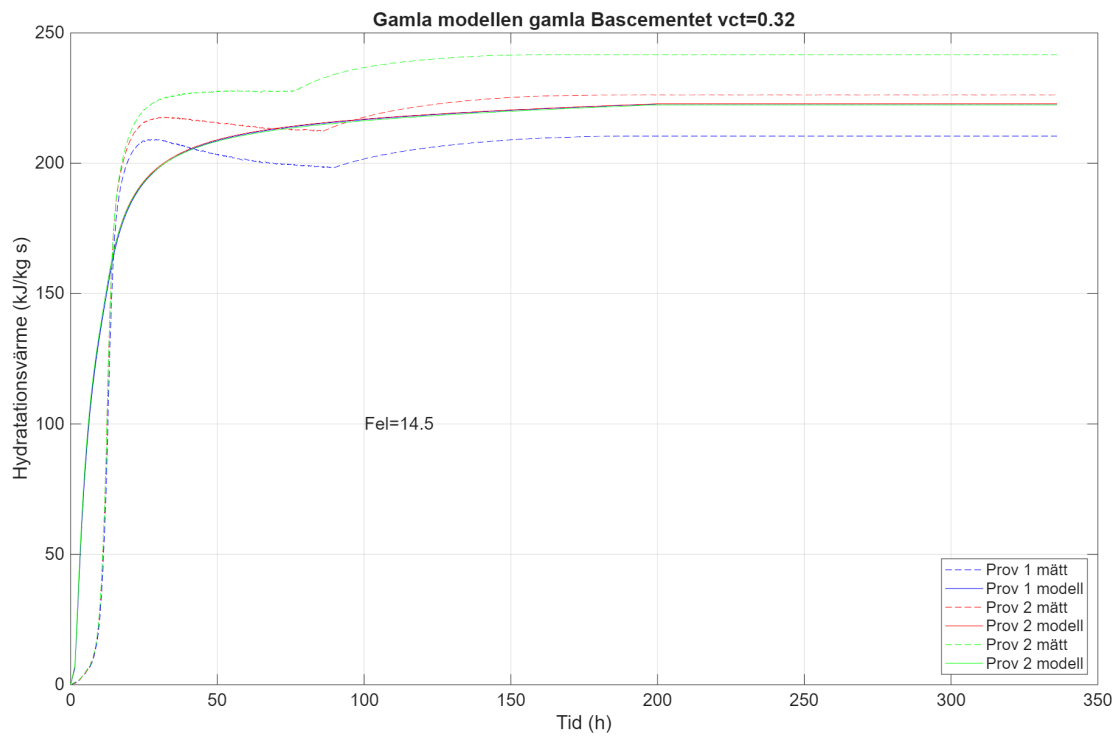


Figur 23. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

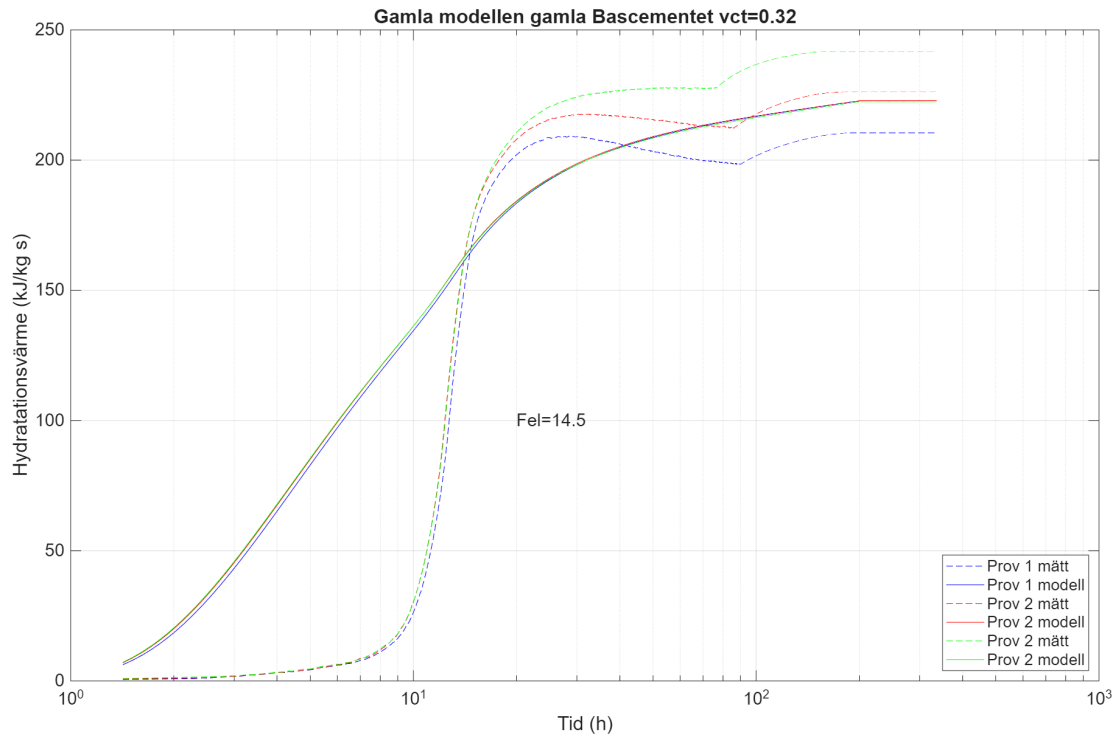


Figur 24. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

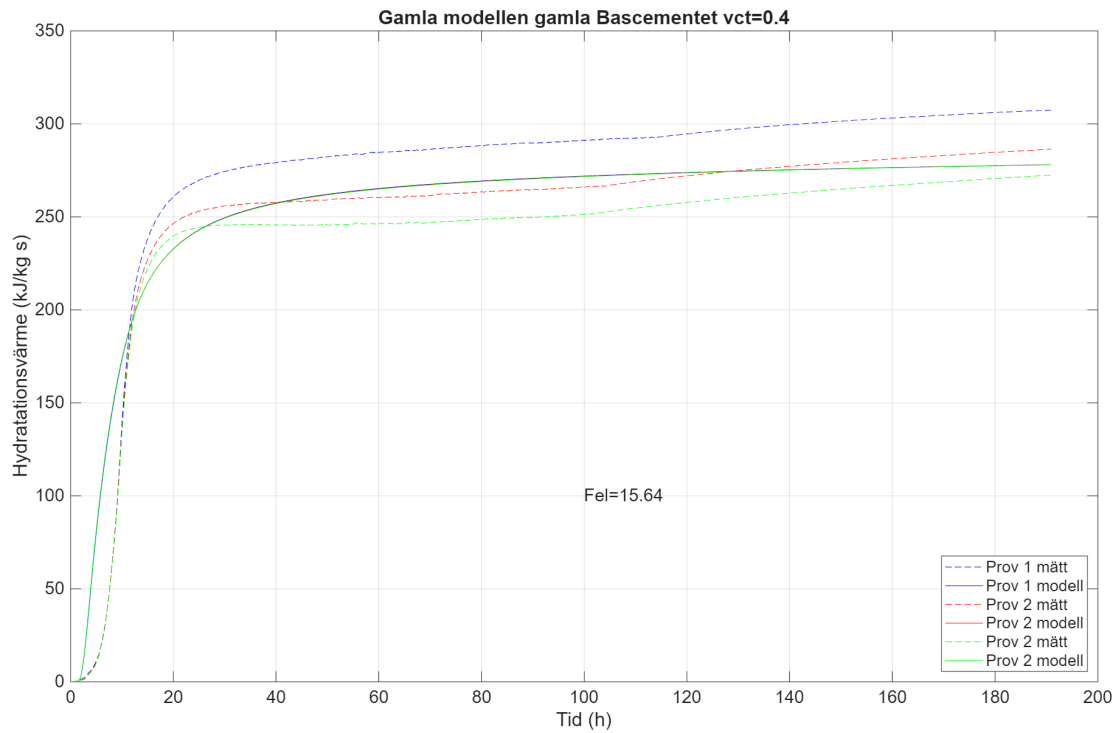
2.2 Värme



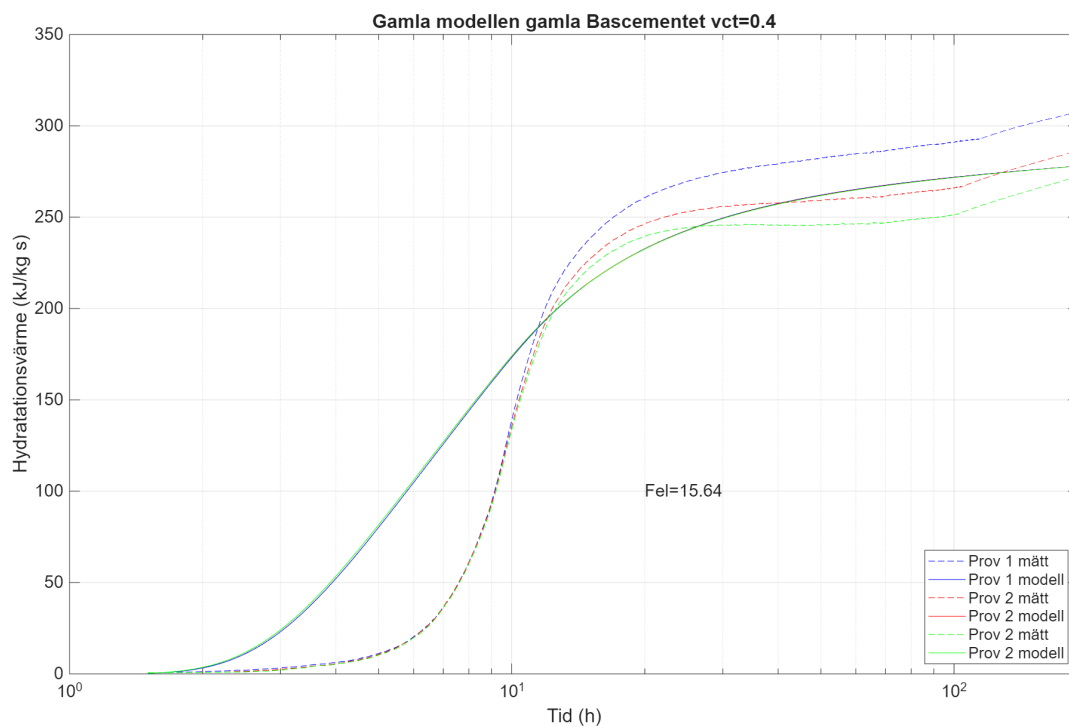
Figur 25. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



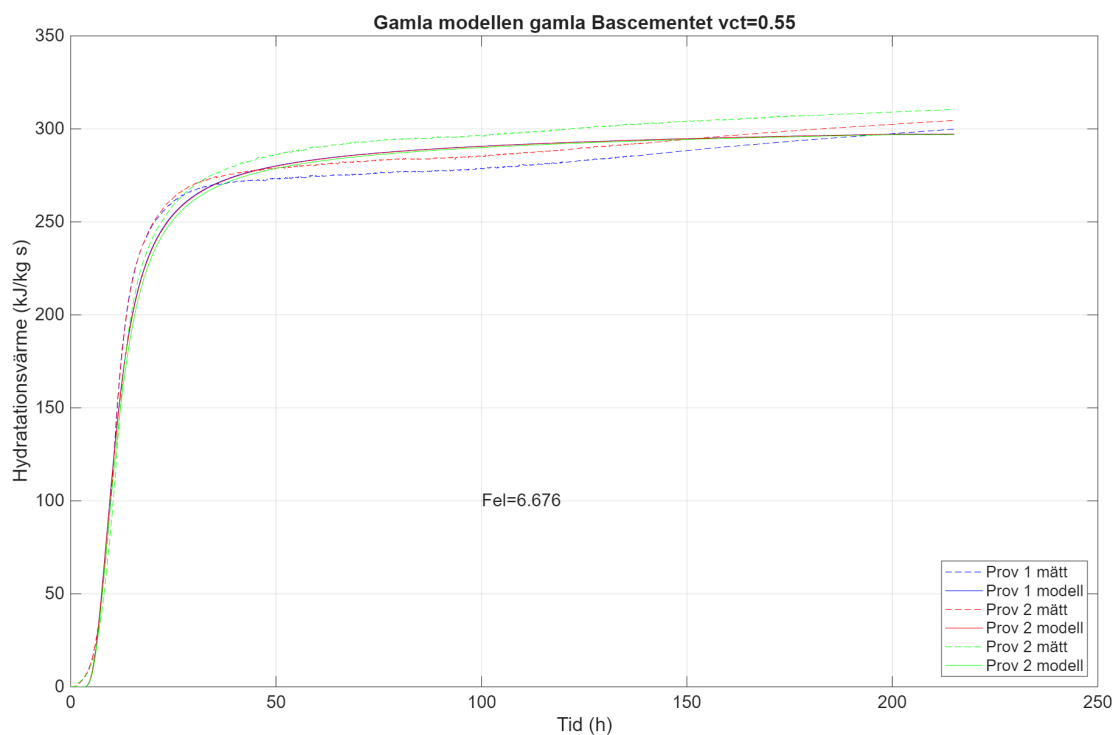
Figur 26. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



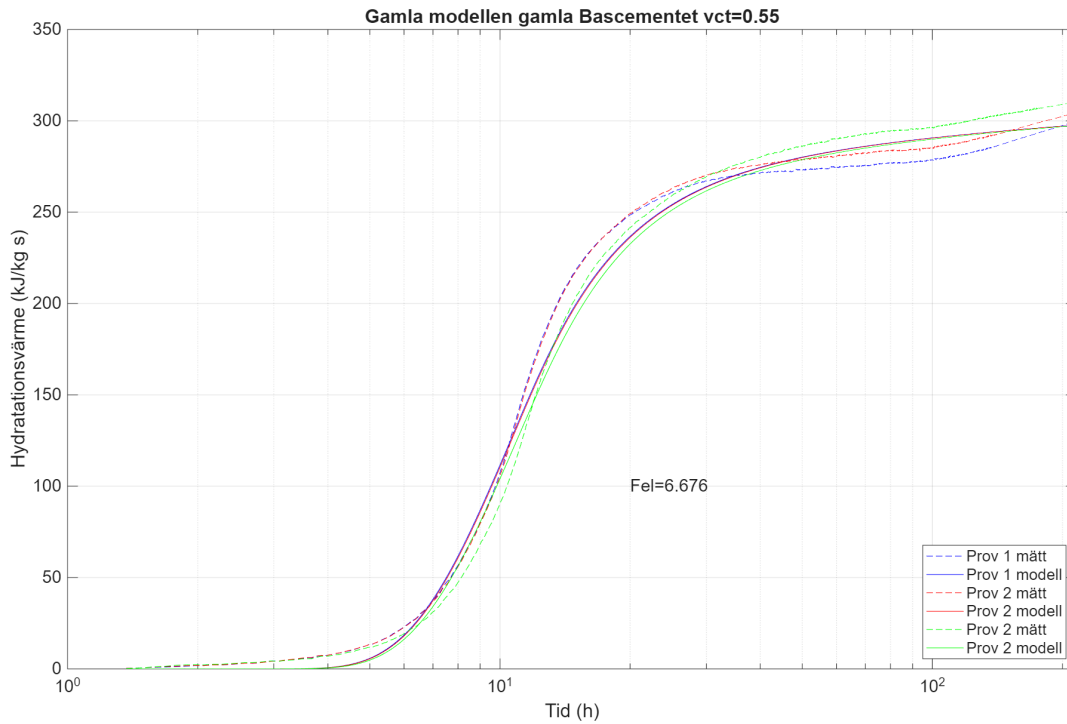
Figur 27. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



Figur 28. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

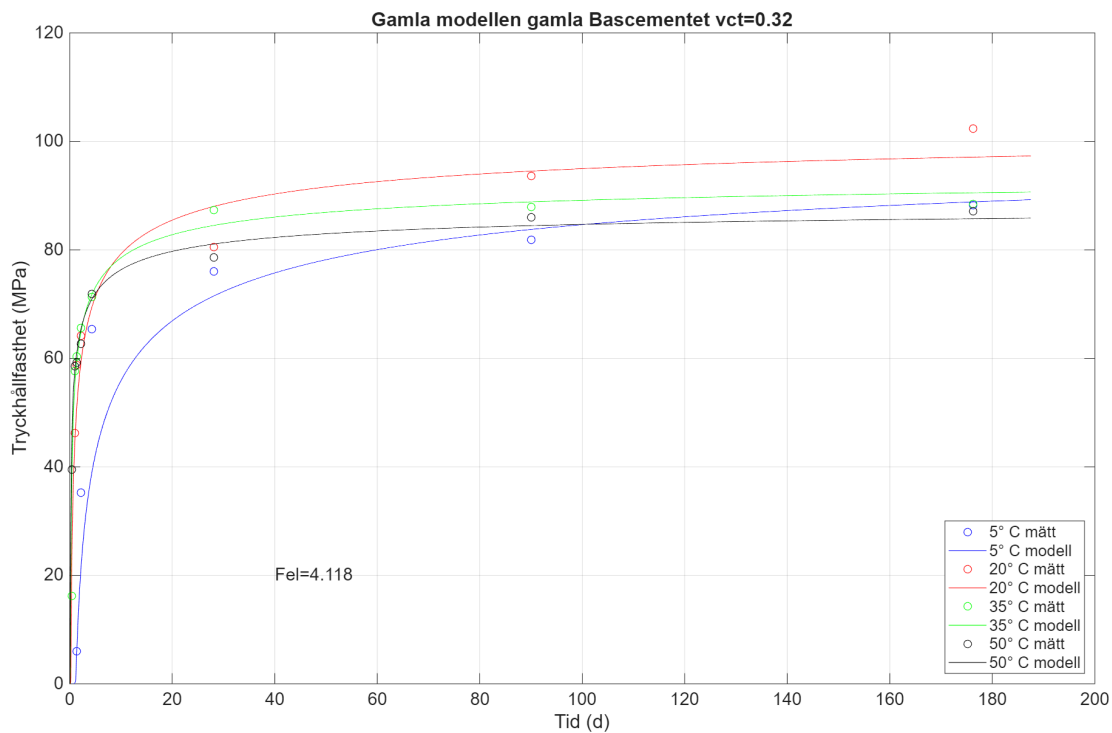


Figur 29. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

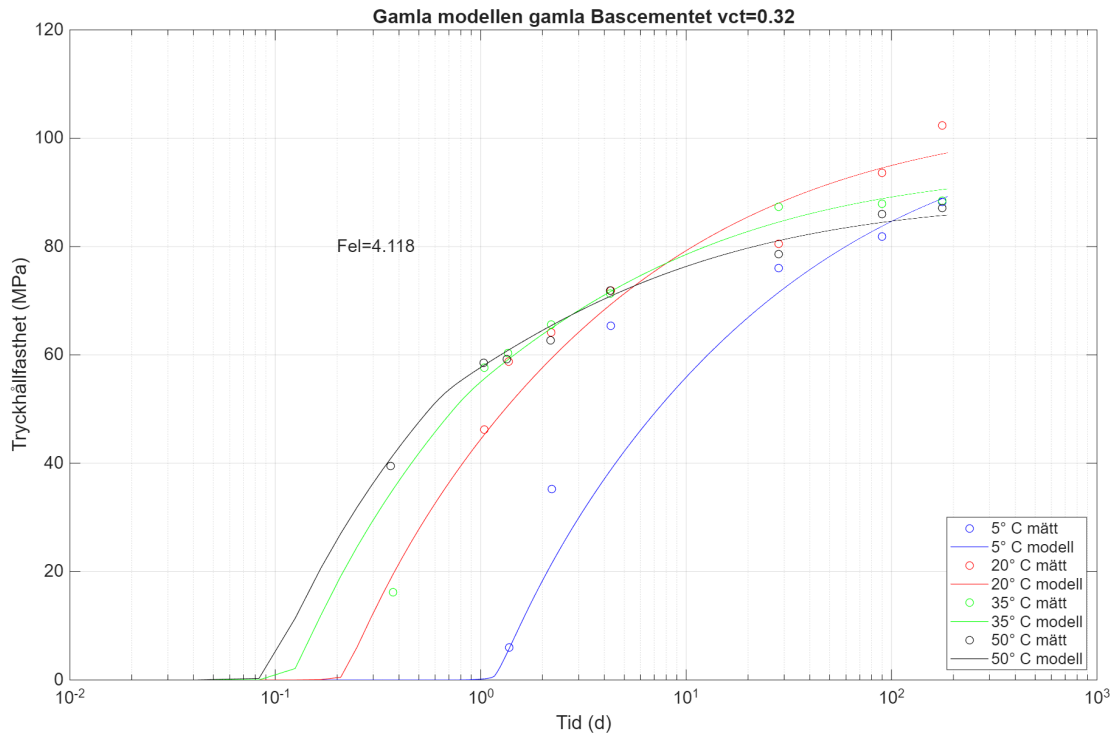


Figur 30. Anpassning av hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

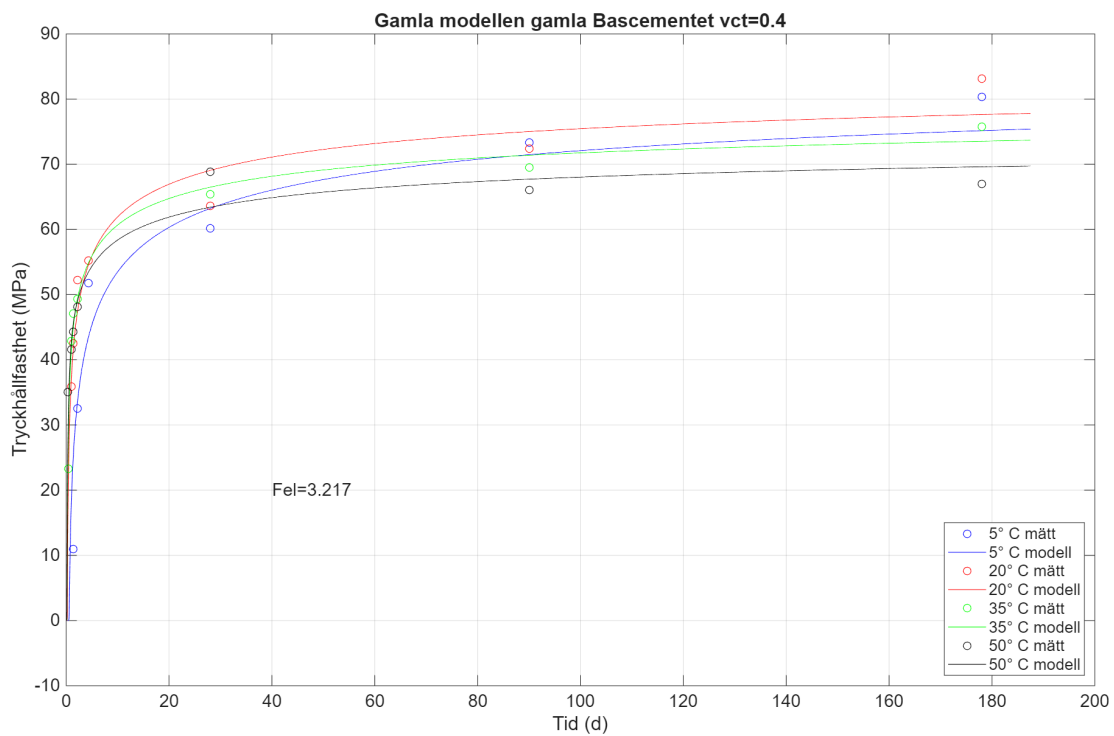
2.3 Hållfasthet



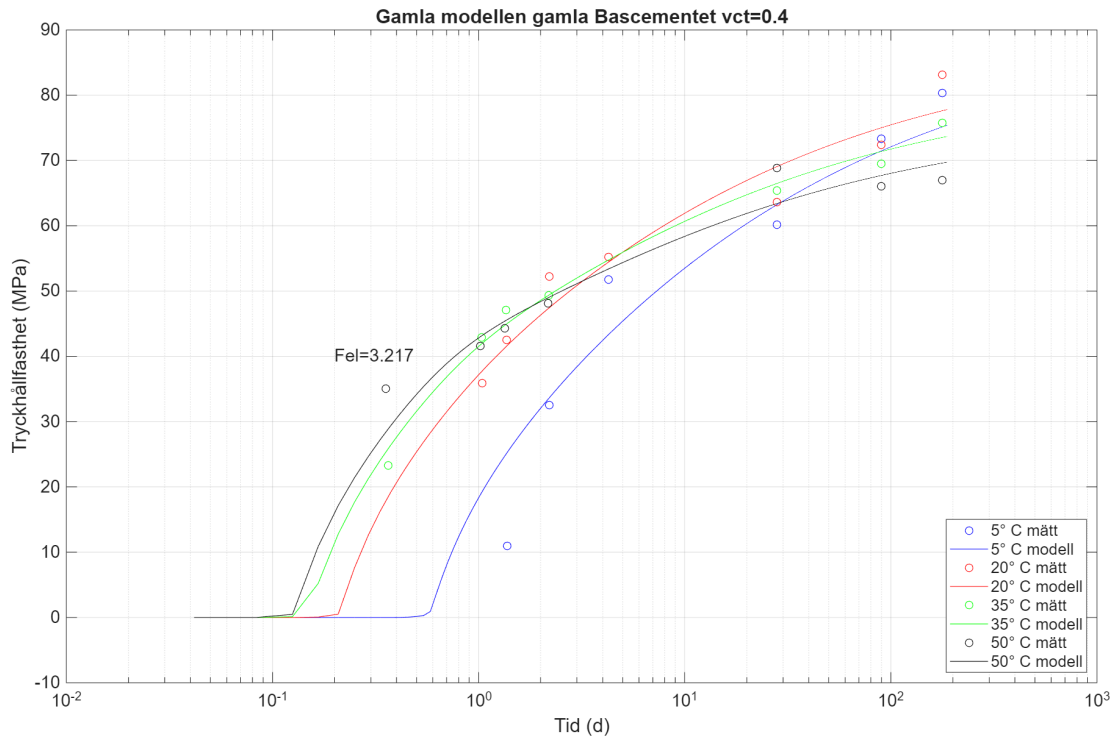
Figur 31. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



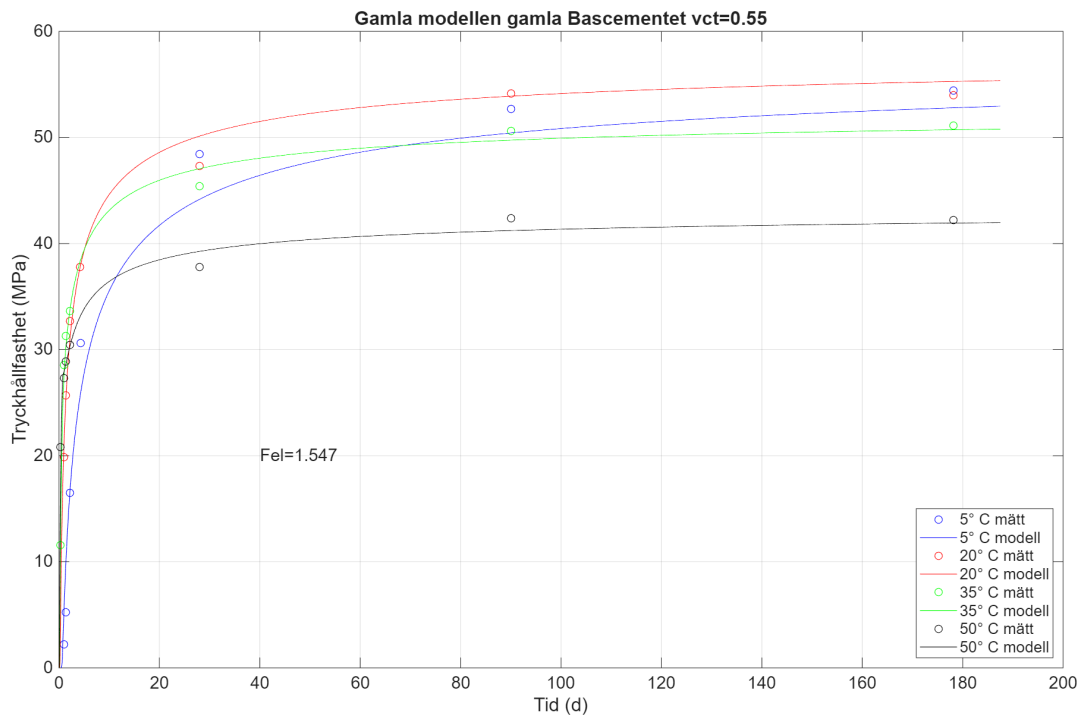
Figur 32. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



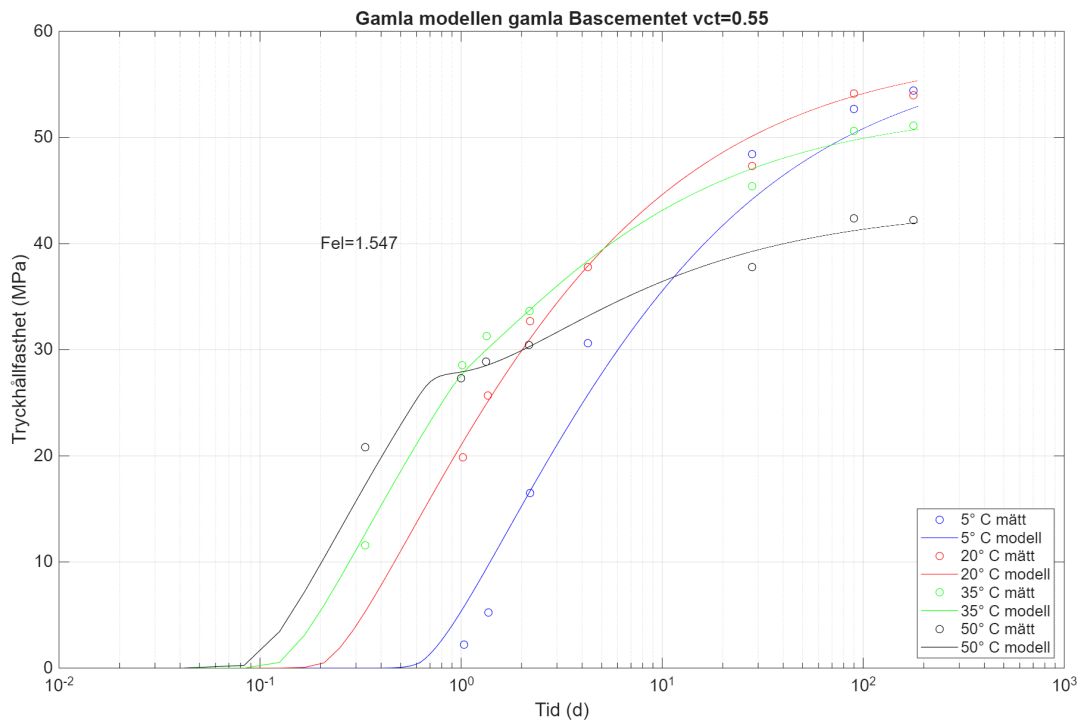
Figur 33. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



Figur 34. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



Figur 35. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten



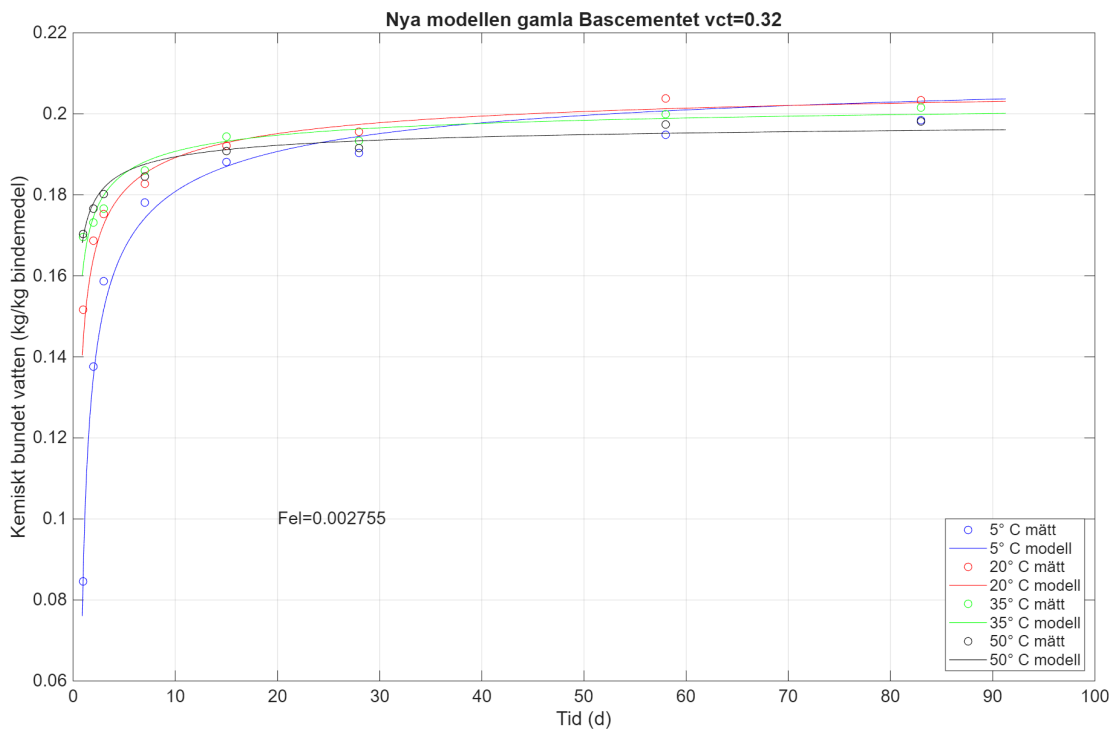
Figur 36. Anpassning av tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den gamla modellen där gemensamma parametrar för hydratationsgrad anpassats till mätdata för värme resp. vatten

3 Nya modellen - vatten, värme och hållfasthet, en term för värme

Anpassningsförfarandet är enligt:

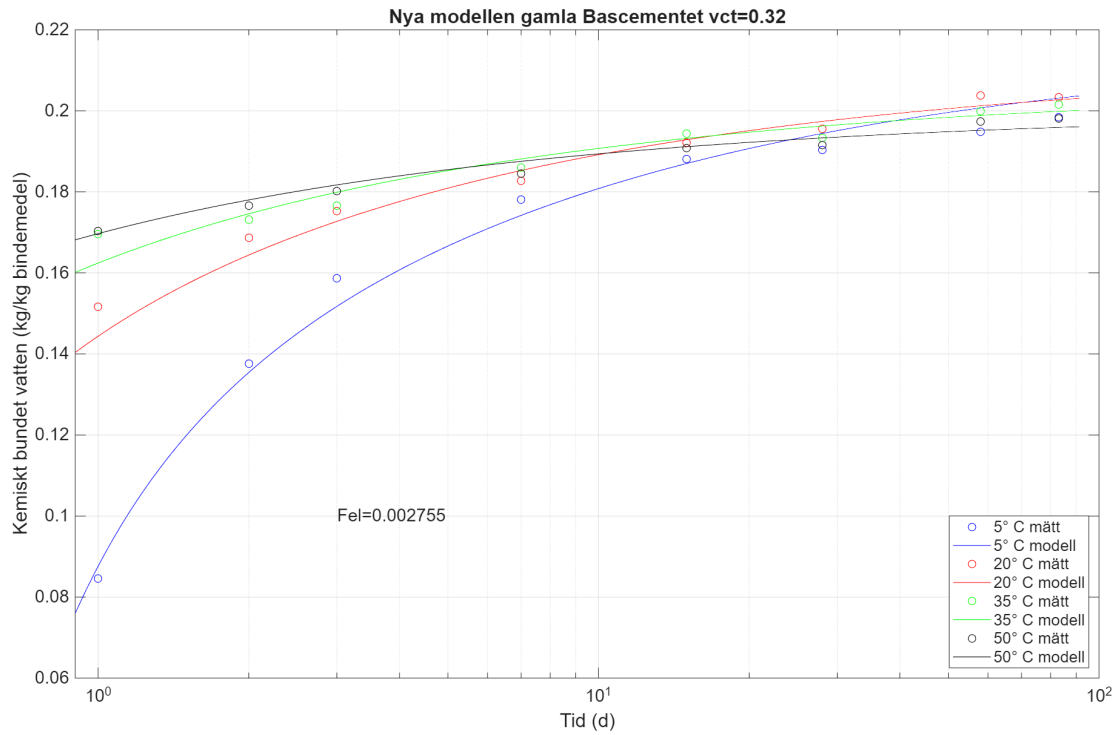
- Initial anpassning av kemiskt bundet vatten och hydratationsgrad till mätdata för kemiskt bundet vatten.
- Initial anpassning av hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hydratationsvärme. Parametrar för hydratationsgrad från kemiskt bundet vatten används som startvärden.
- Justeringsanpassning av kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme. Parametrar från tidigare anpassningar används som startvärden.
- Analysanpassning av hållfasthet vid konstant temperatur som linjär funktion av bindemedelsrelaterad hydratationsgrad, olika temperaturer var för sig samt olika temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.
- Analysanpassning av hållfasthet vid konstant temperatur som linjär funktion av vattenrelaterad hydratationsgrad, olika temperaturer var för sig samt olika temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.
- Anpassning av hållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad och vattenrelaterad hydratationsgrad, alla temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.

3.1 Initialt kemiskt bundet vatten

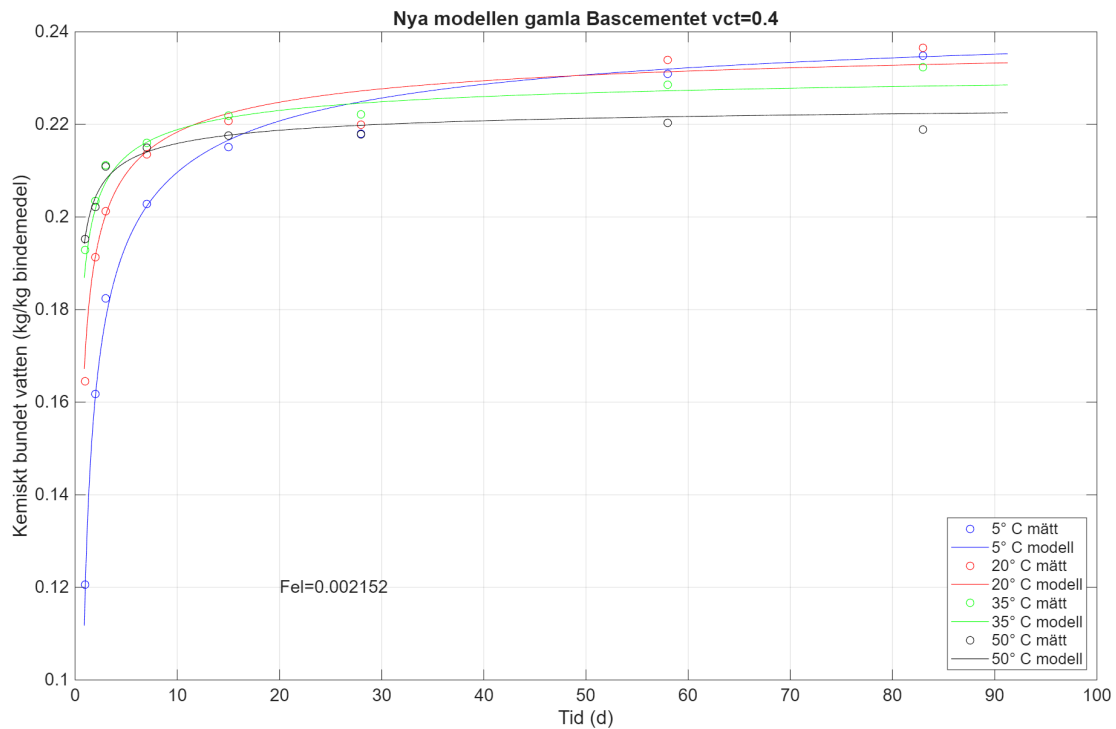


Figur 37. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

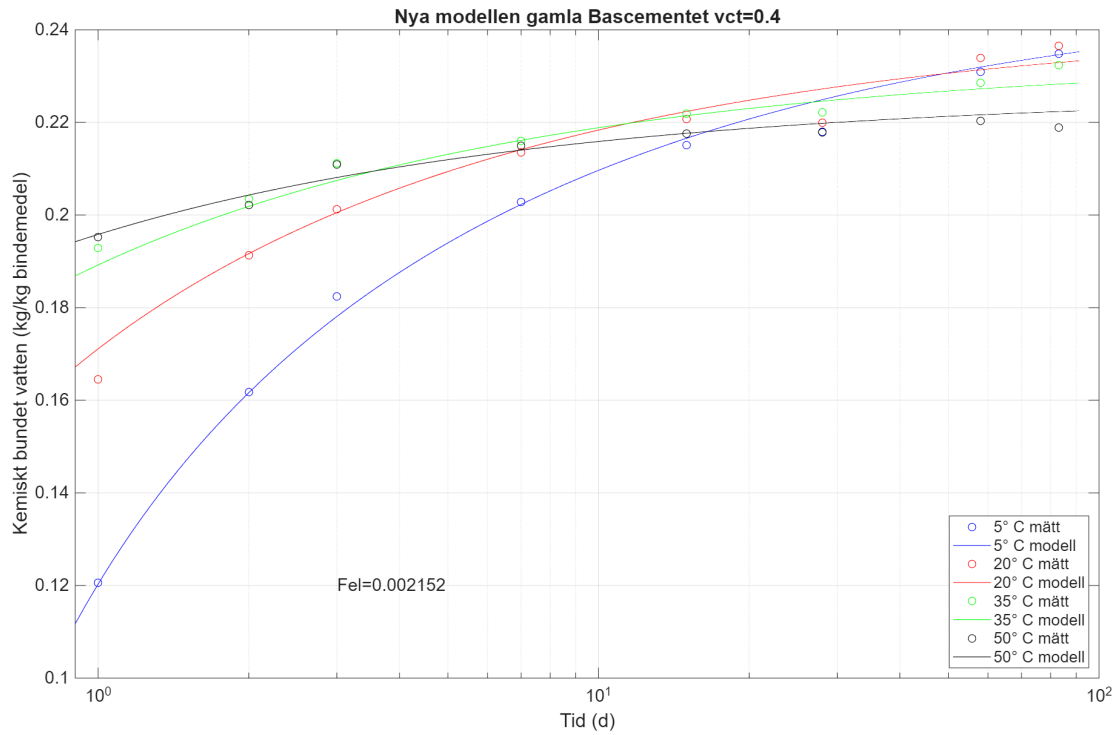


Figur 38. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

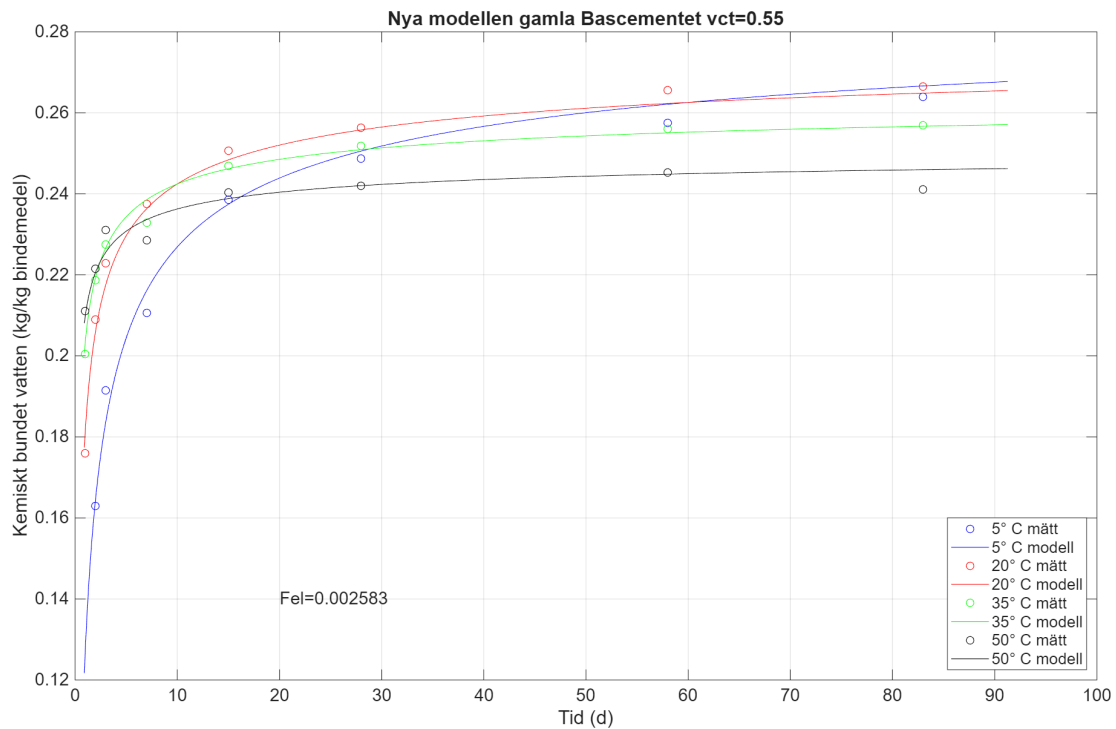


Figur 39. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

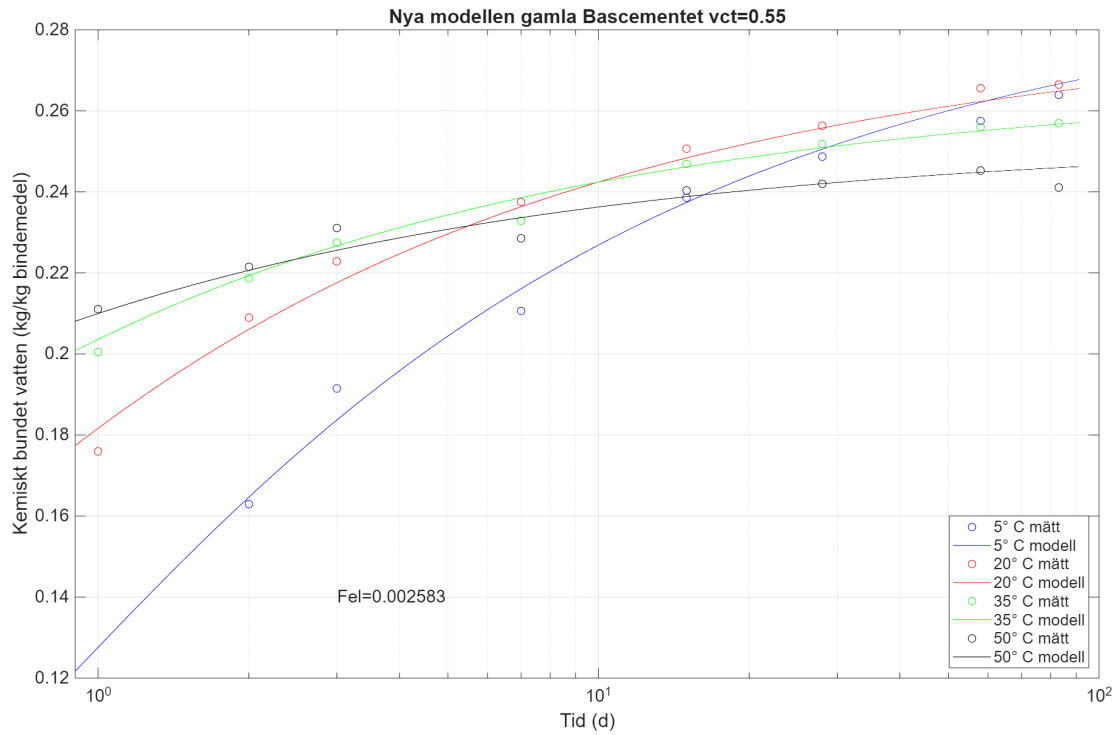
Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1



Figur 40. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

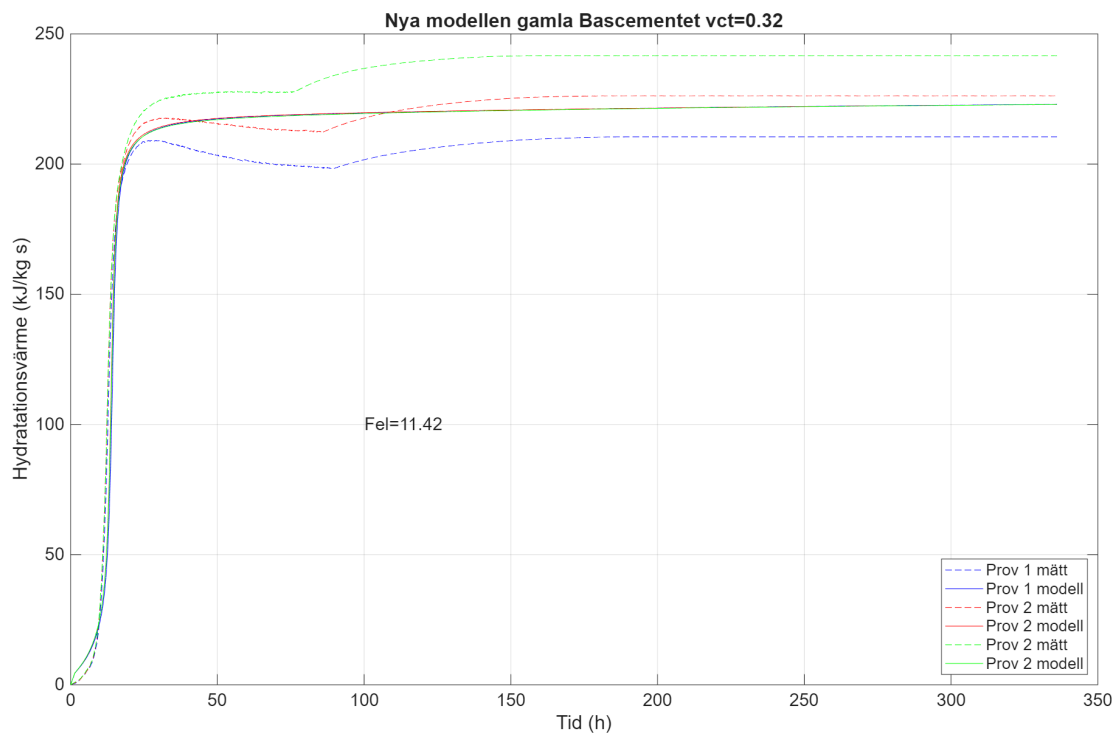


Figur 41. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

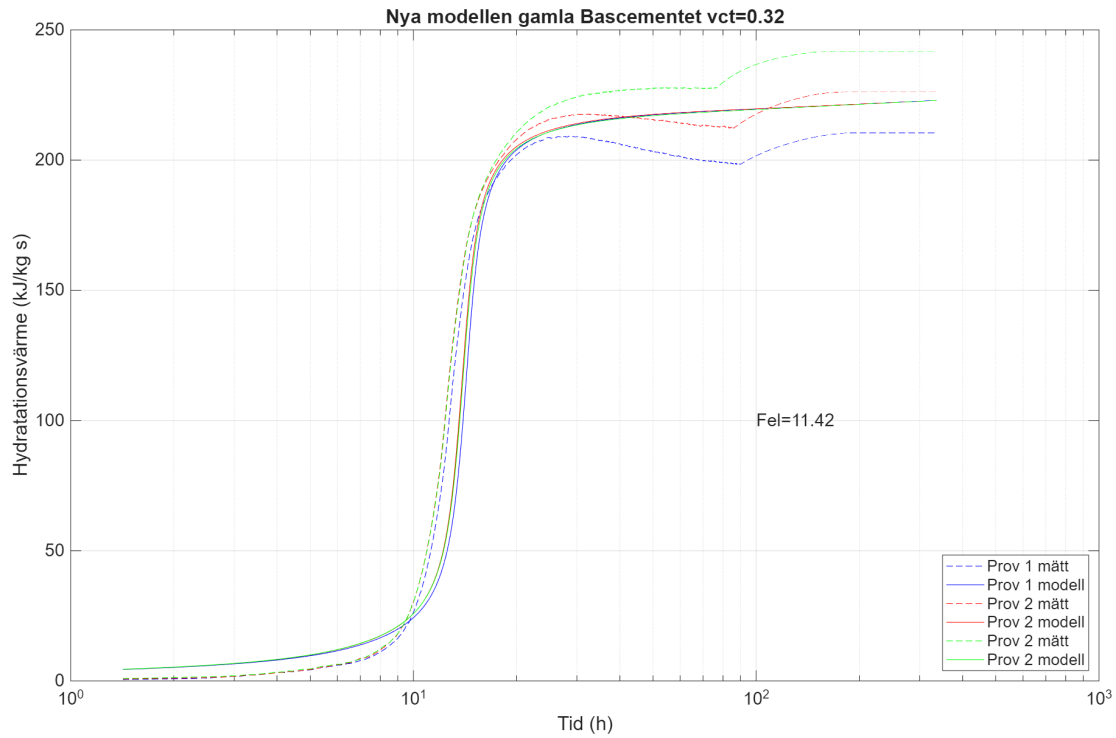


Figur 42. Anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen där anpassning utförts endast till mätdata för kemiskt bundet vatten

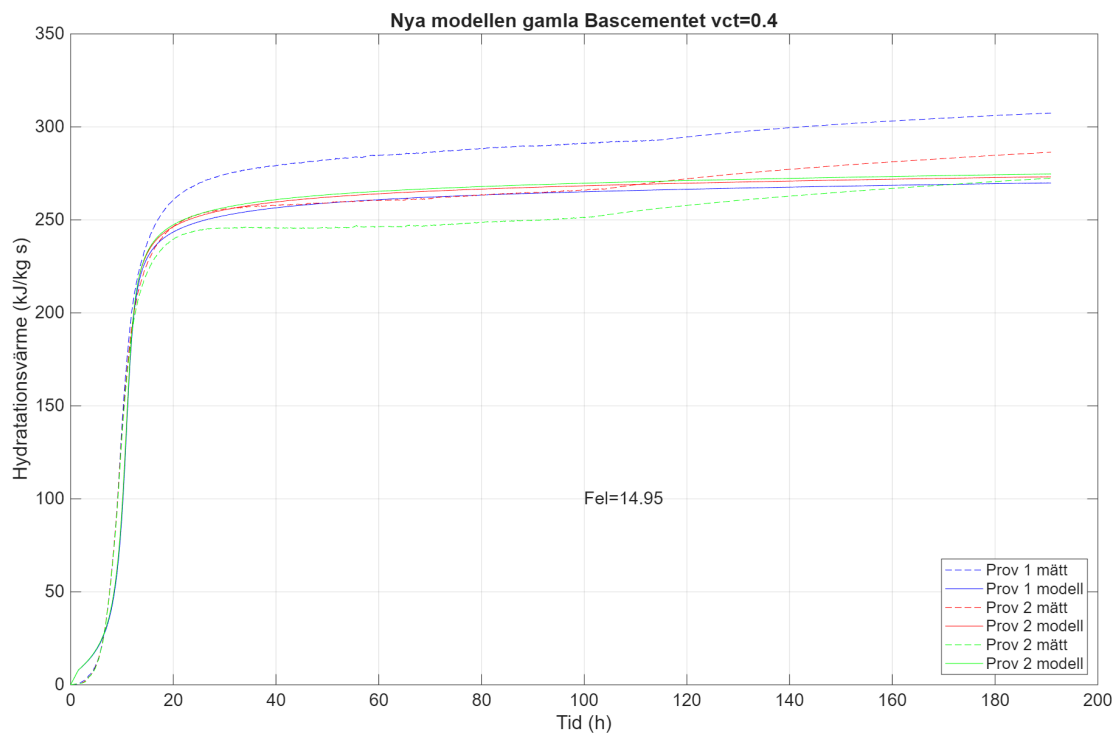
3.2 Initialt värme



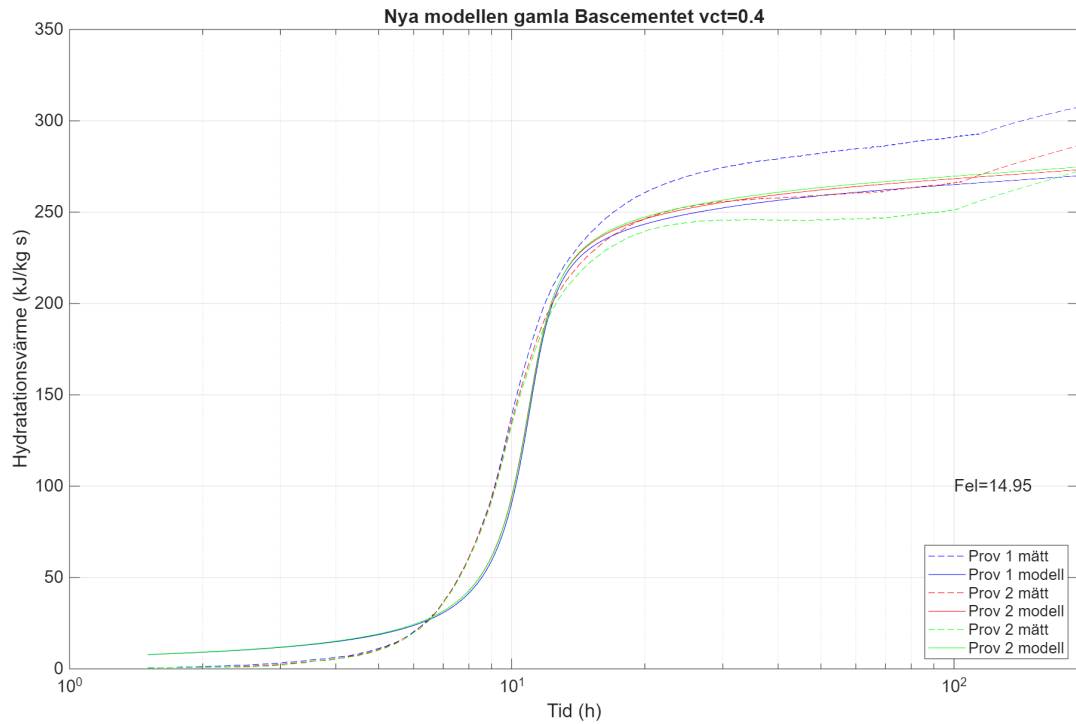
Figur 43. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme



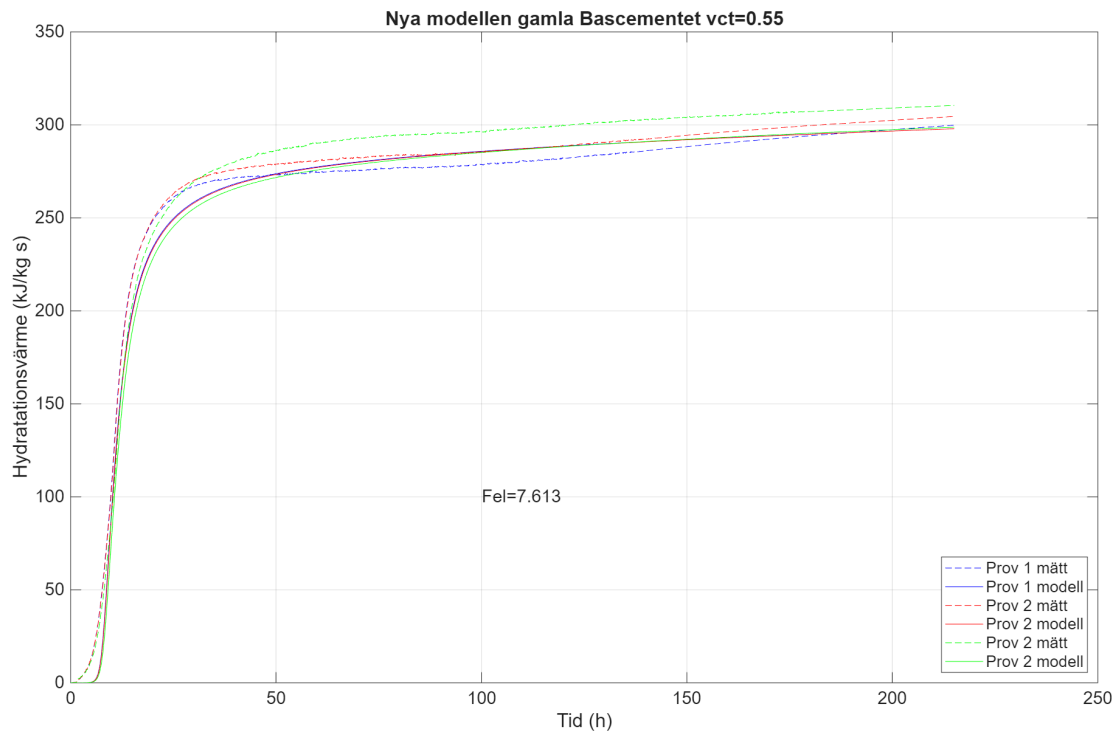
Figur 44. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme



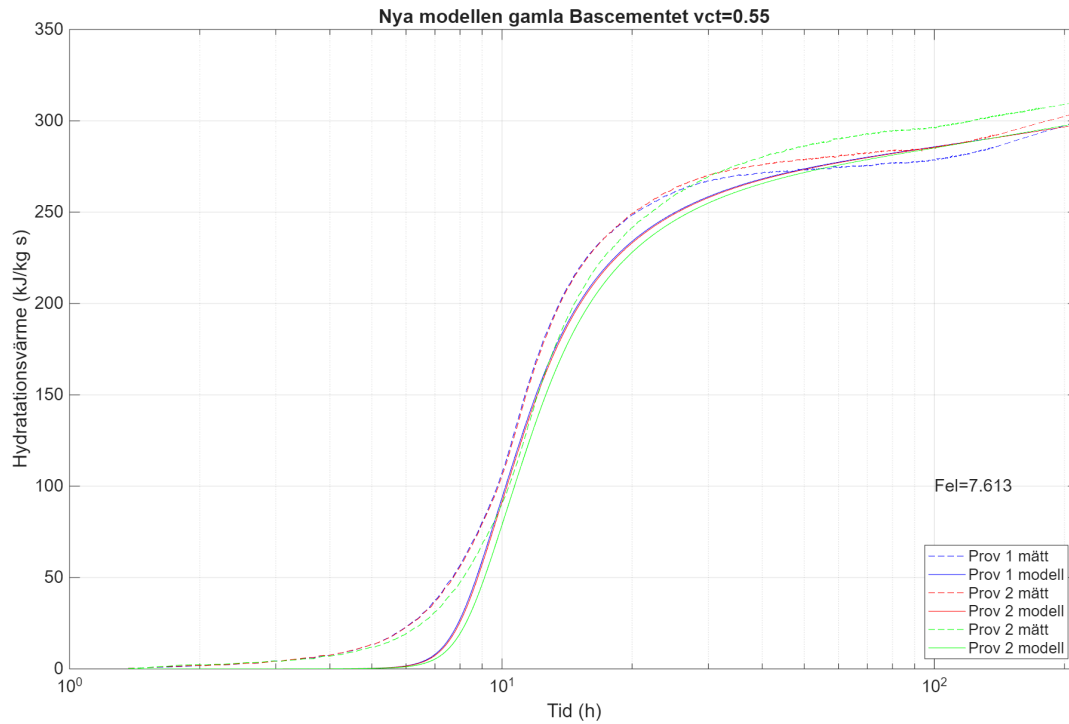
Figur 45. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme



Figur 46. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme

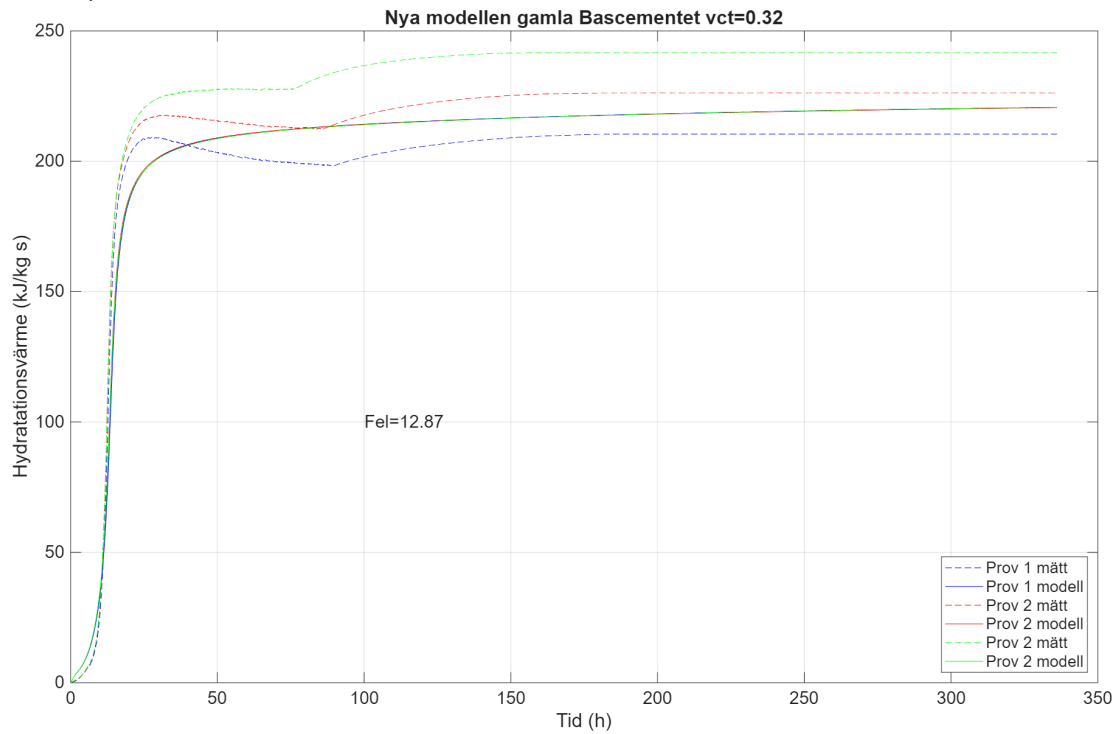


Figur 47. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term för ekvationen för värme



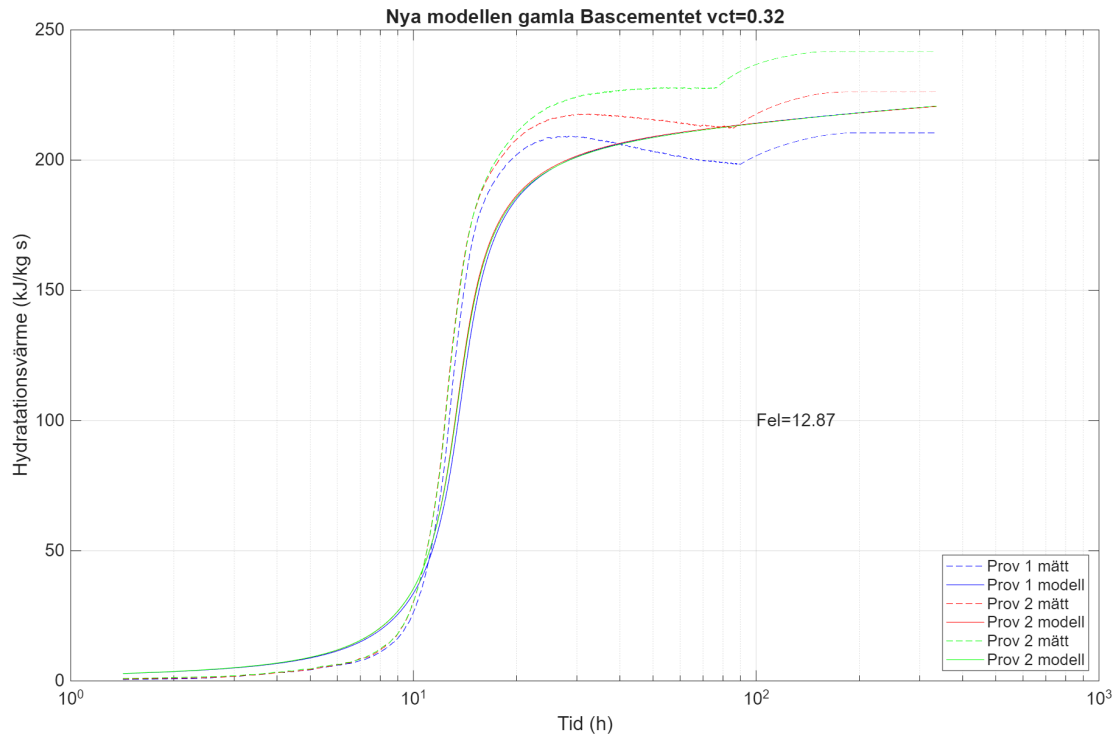
Figur 48. Initial anpassning av kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme

3.3 Justerat värme & kemiskt bundet vatten

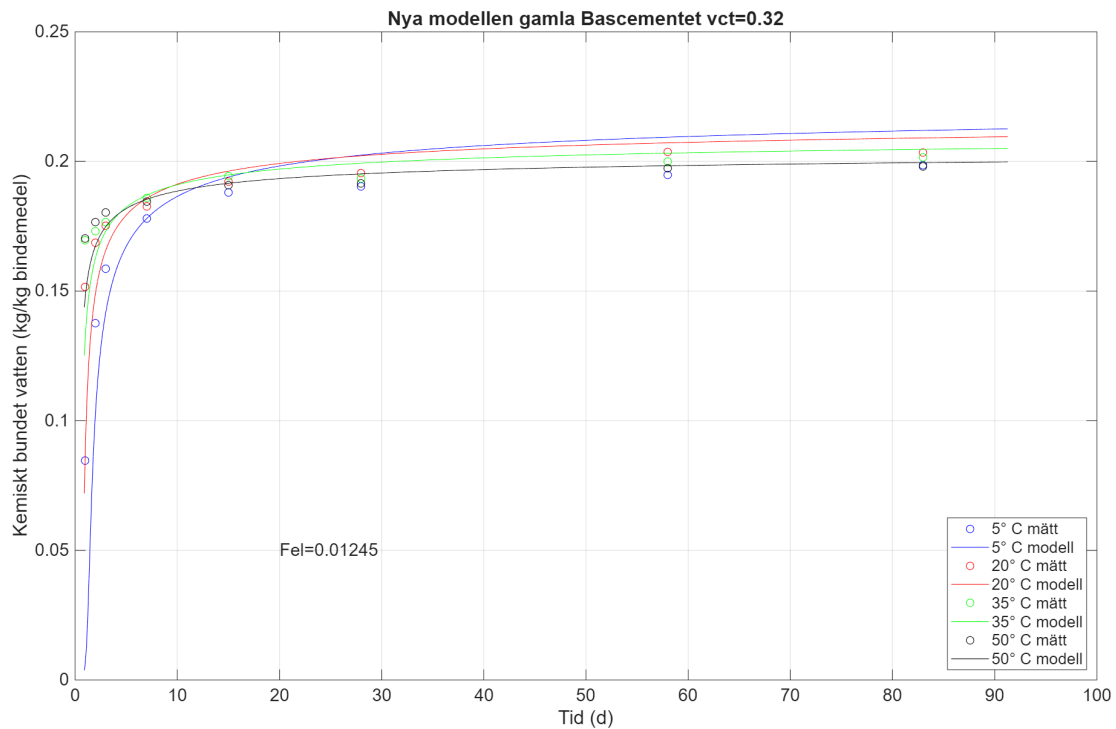


Figur 49. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydrationsvärme och kemiskt bundet vatten

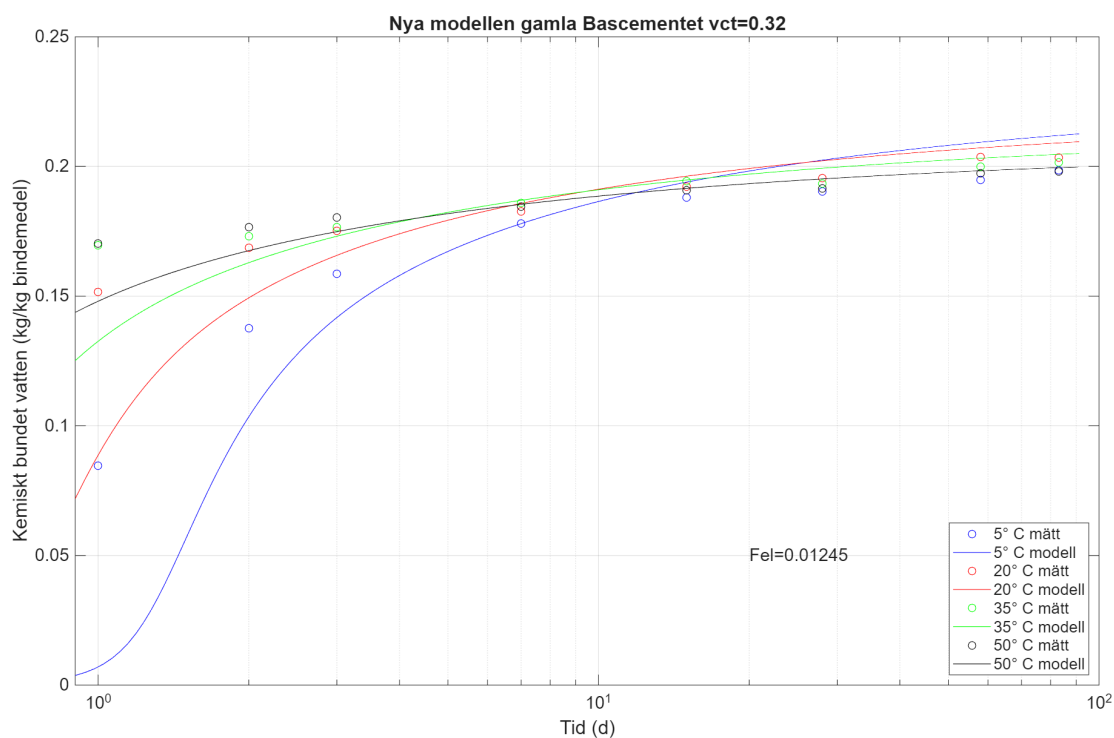
Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1



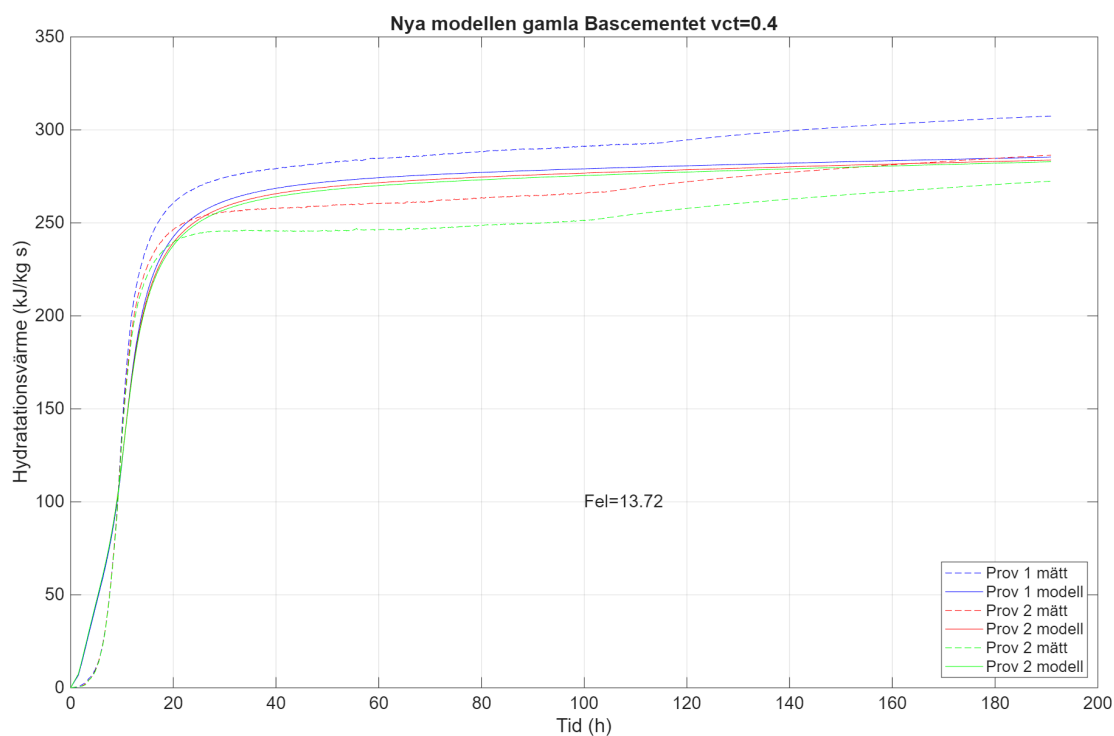
Figur 50. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



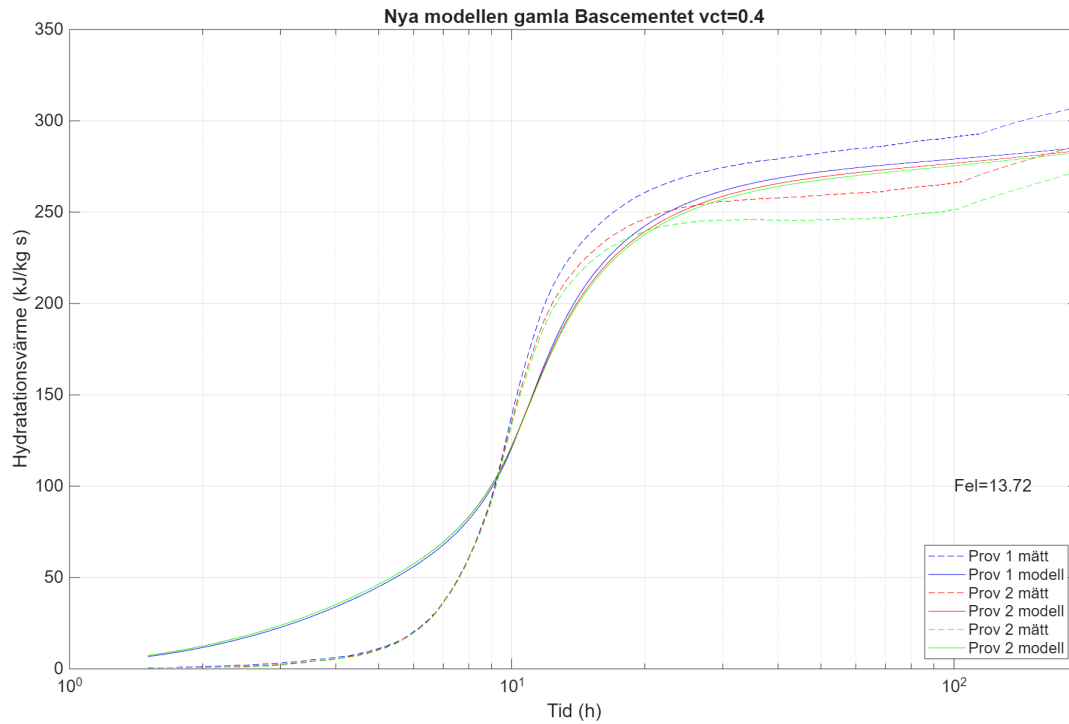
Figur 51. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



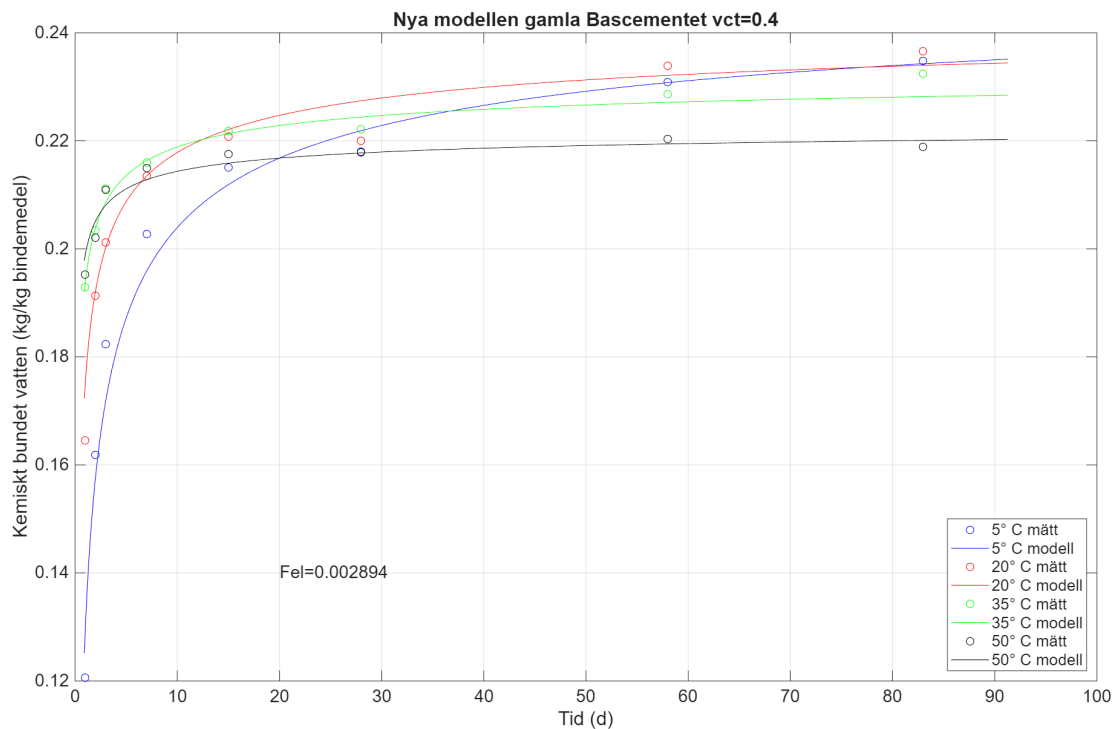
Figur 52. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



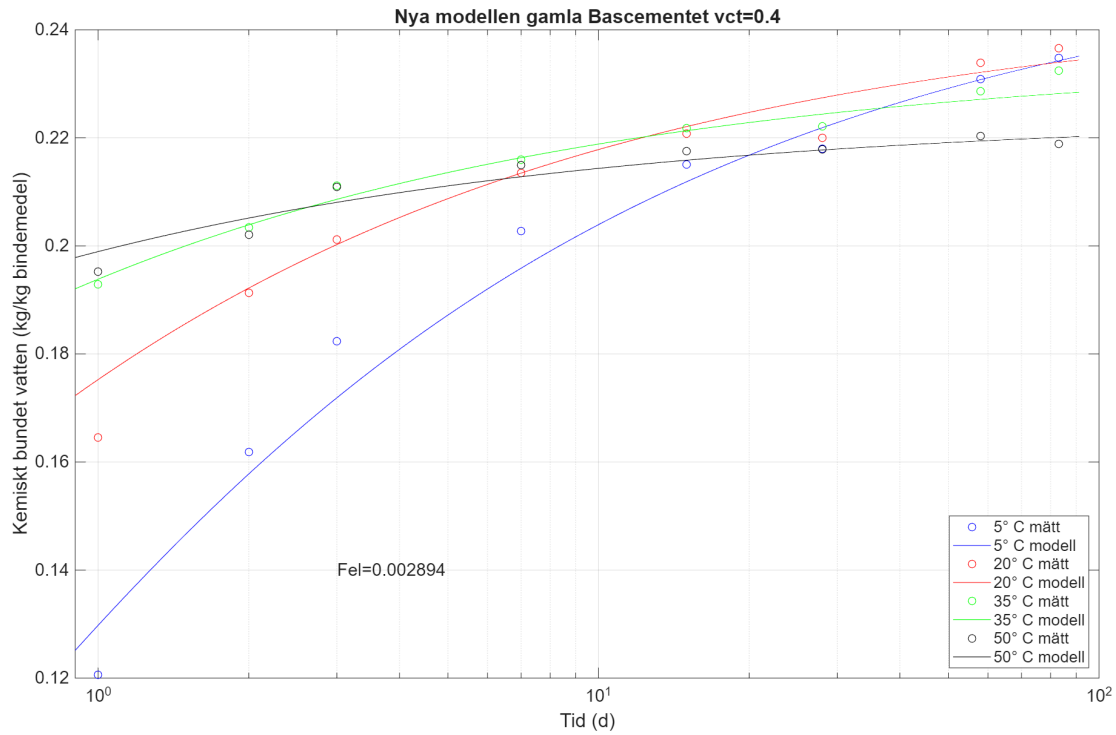
Figur 53. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



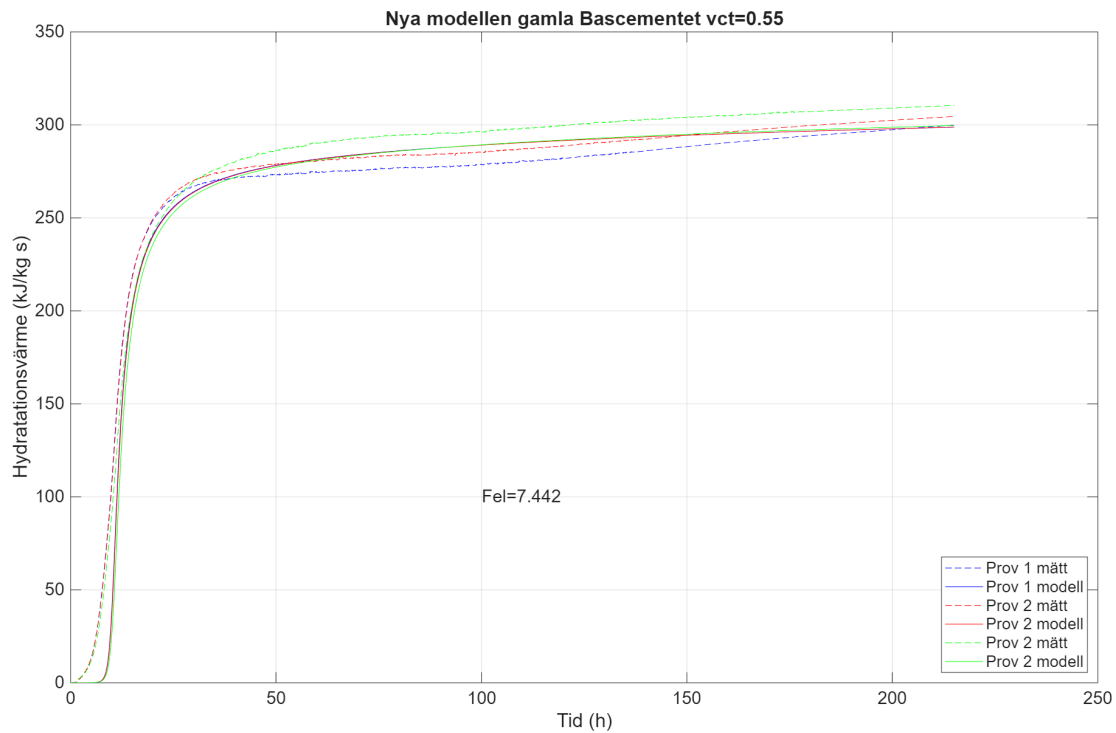
Figur 54. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Basementet vct 0,40 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



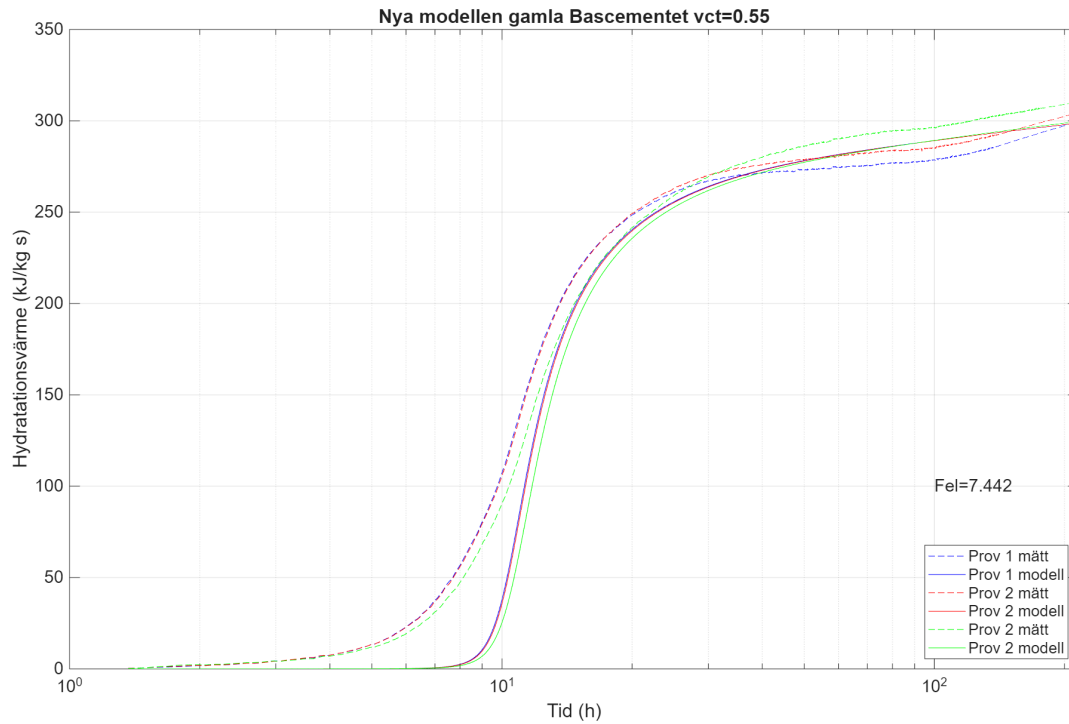
Figur 55. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Basementet vct 0,40 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



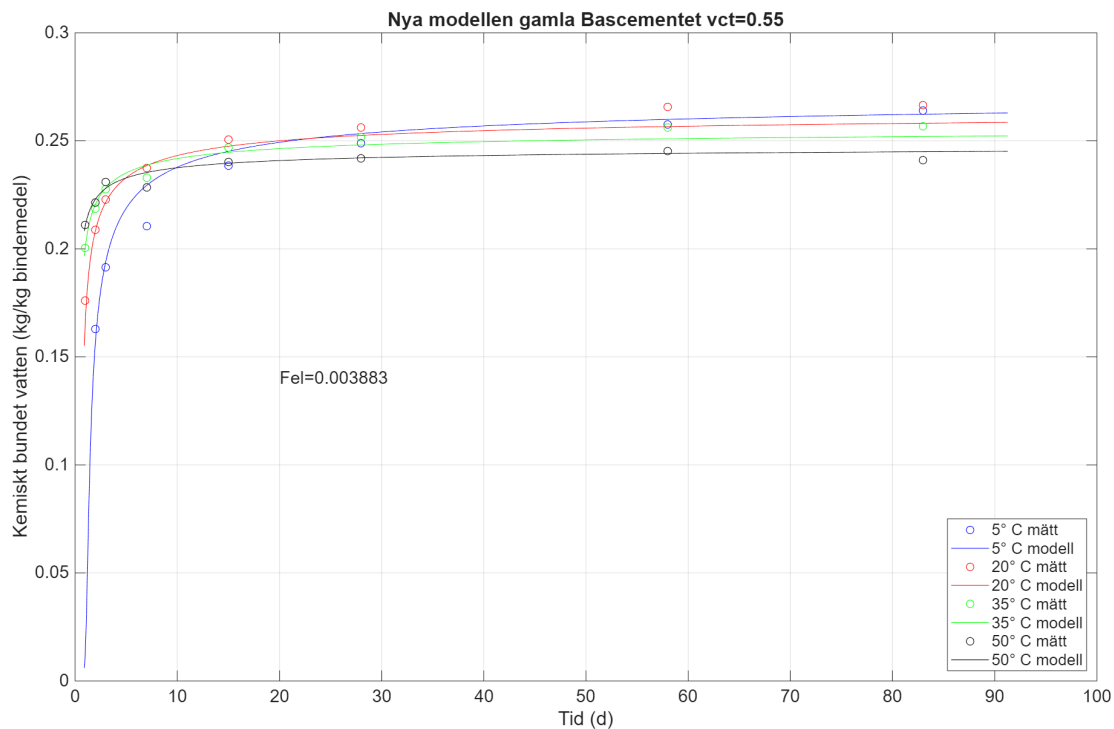
Figur 56. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydrationsvärme och kemiskt bundet vatten



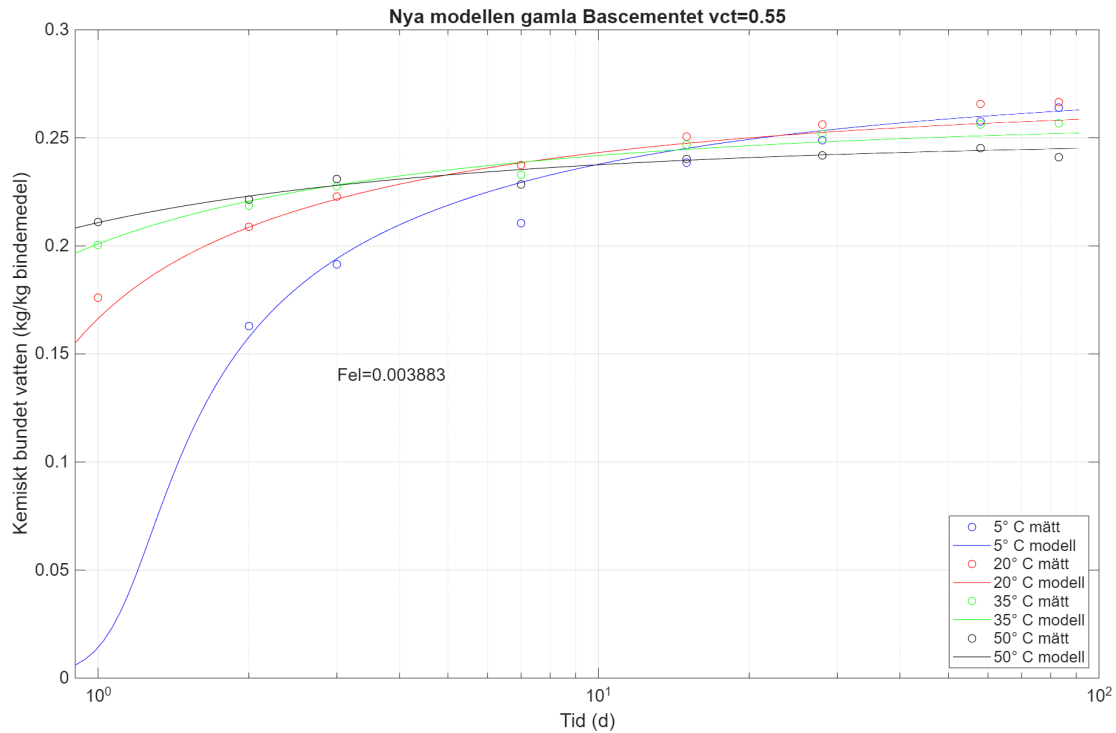
Figur 57. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydrationsvärme och kemiskt bundet vatten



Figur 58. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

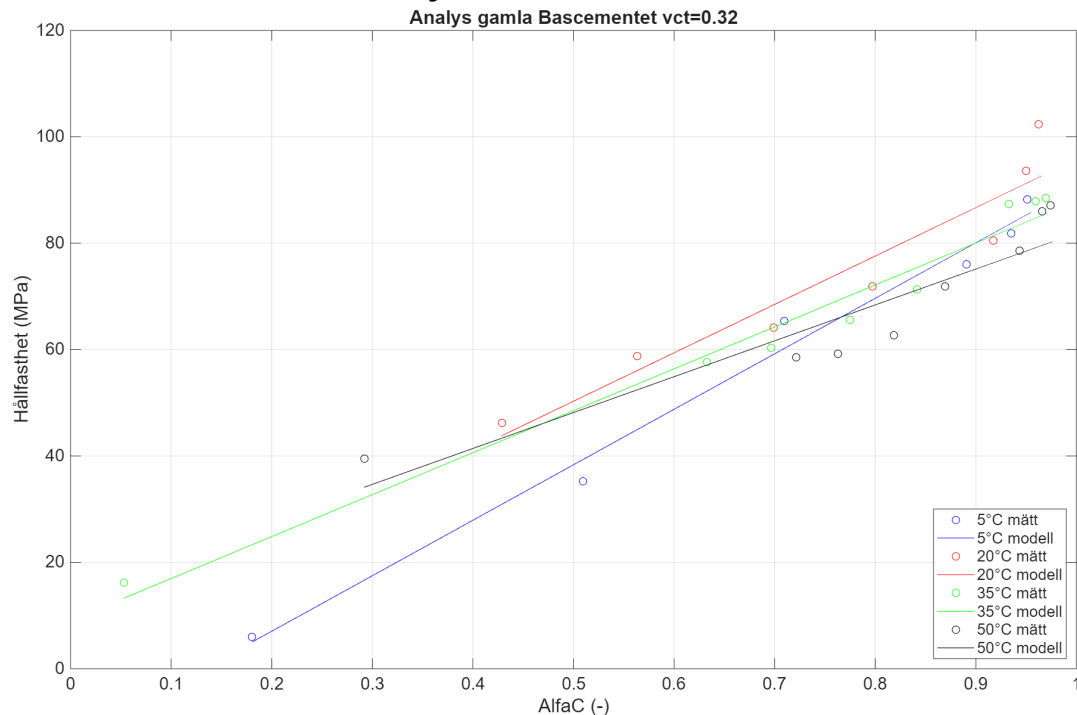


Figur 59. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

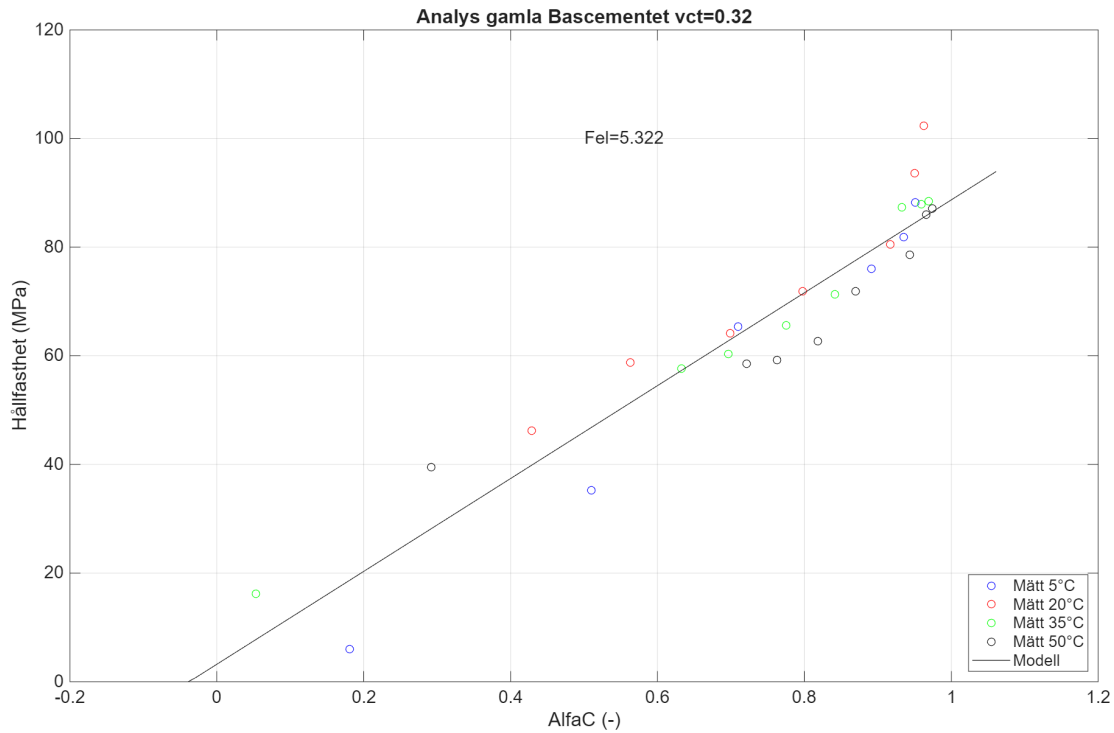


Figur 60. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med en term i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

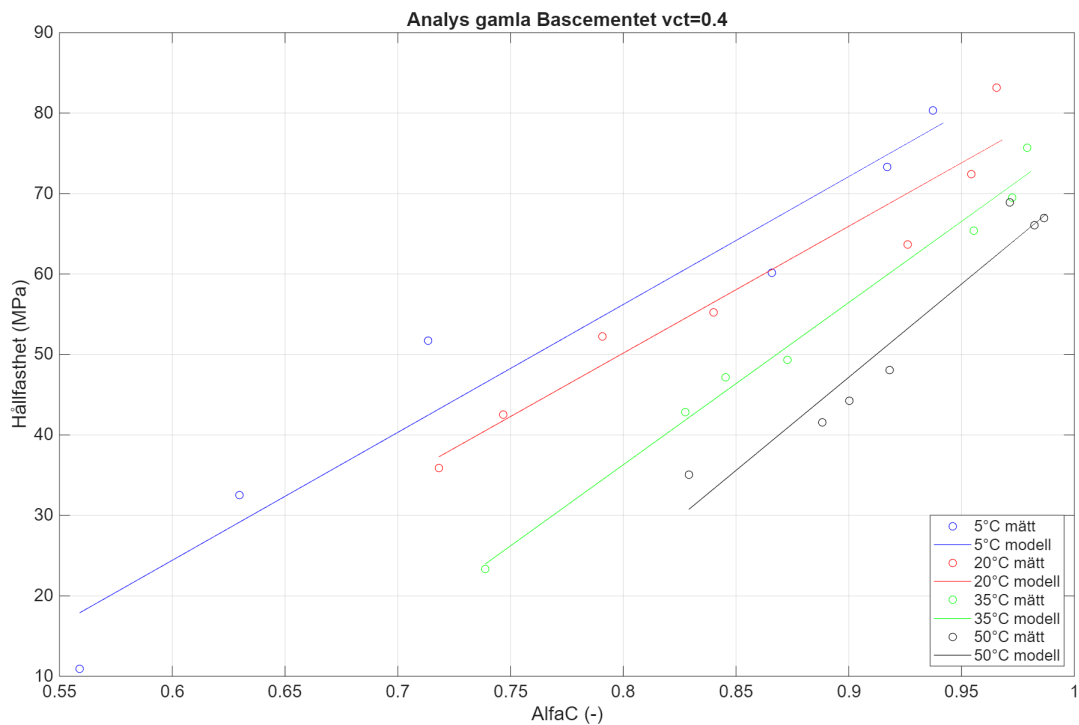
3.4 Hållfasthet – analys mot AlfaC



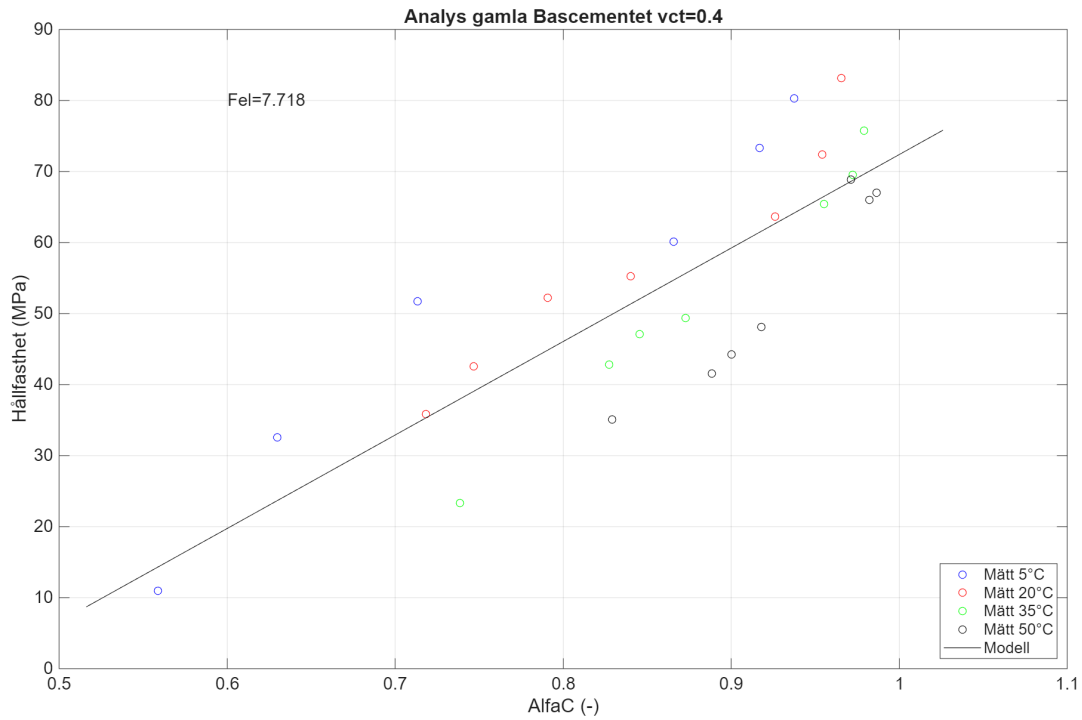
Figur 61. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



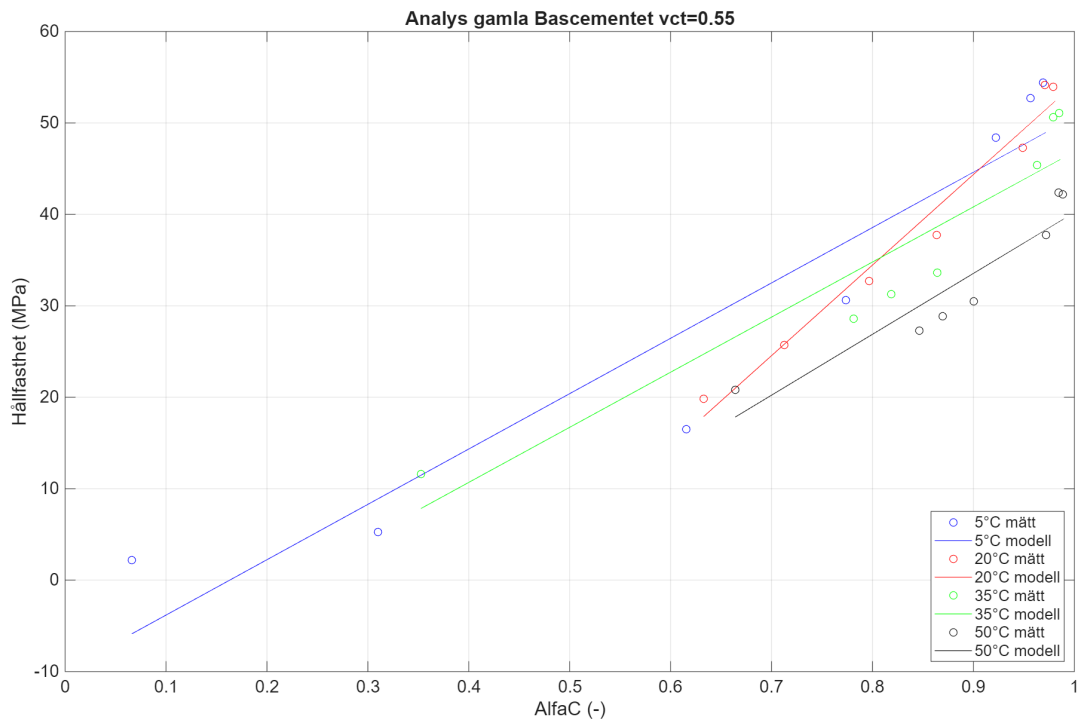
Figur 62. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer



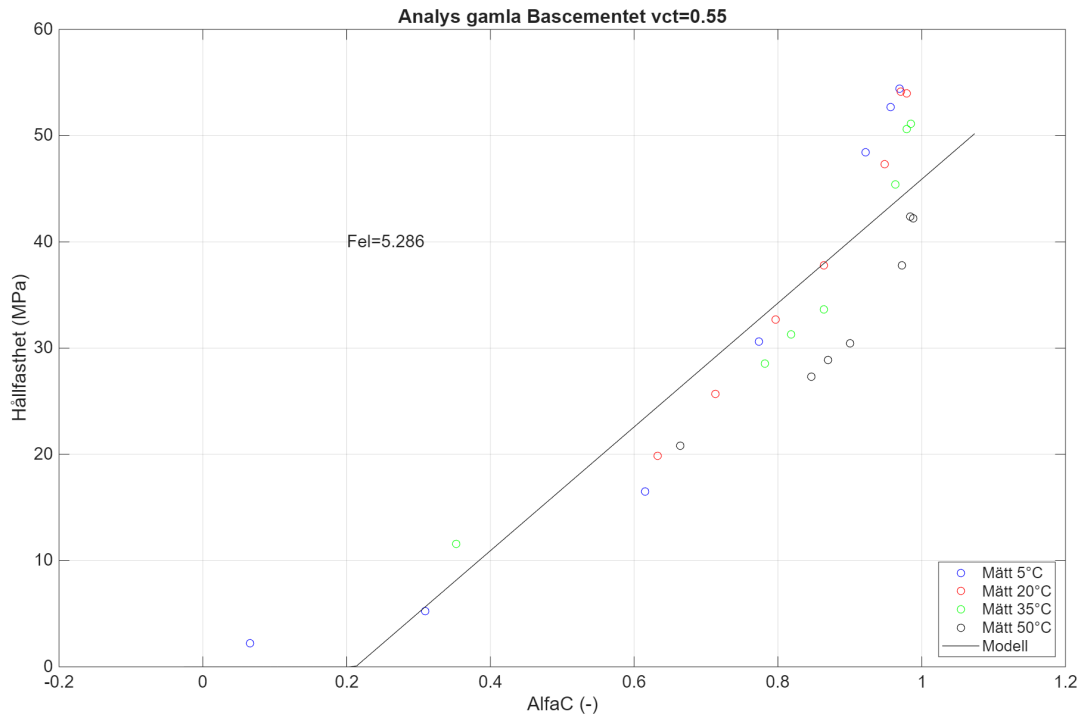
Figur 63. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



Figur 64. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

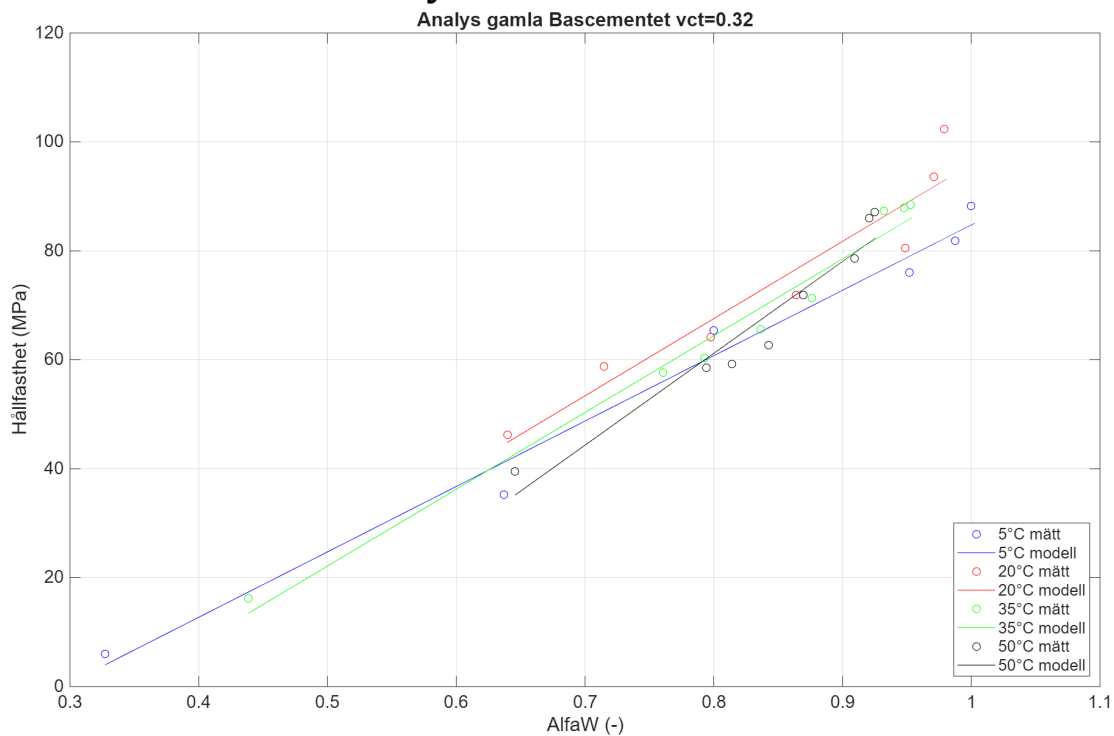


Figur 65. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur

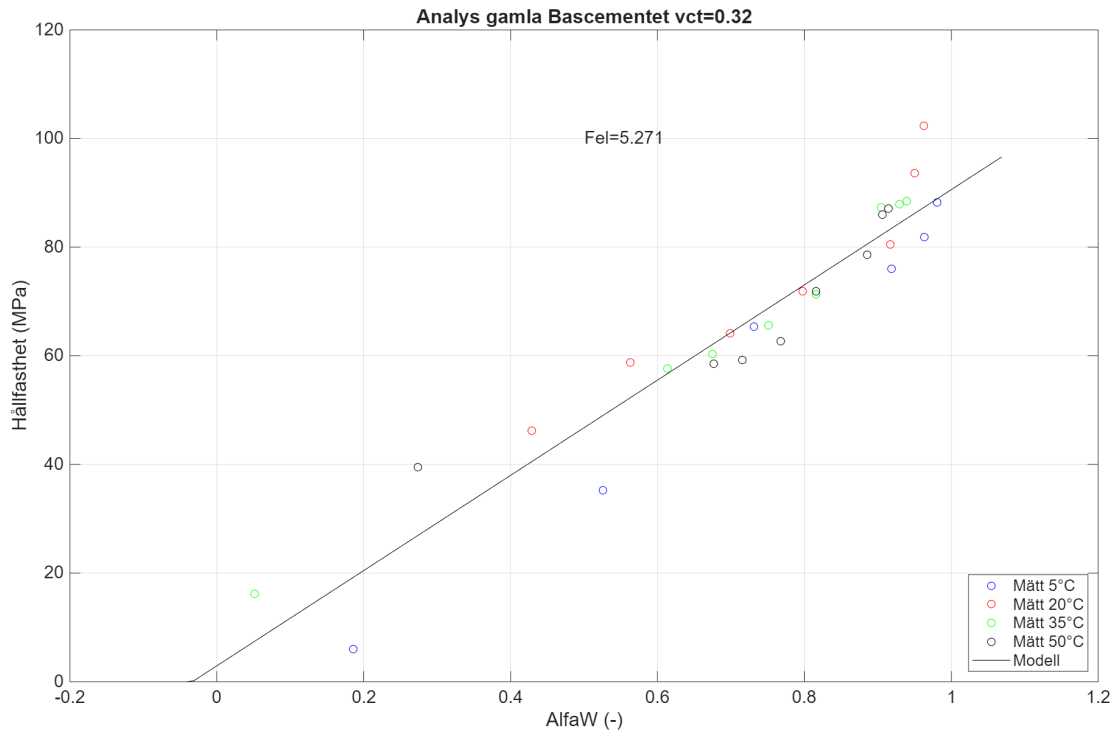


Figur 66. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

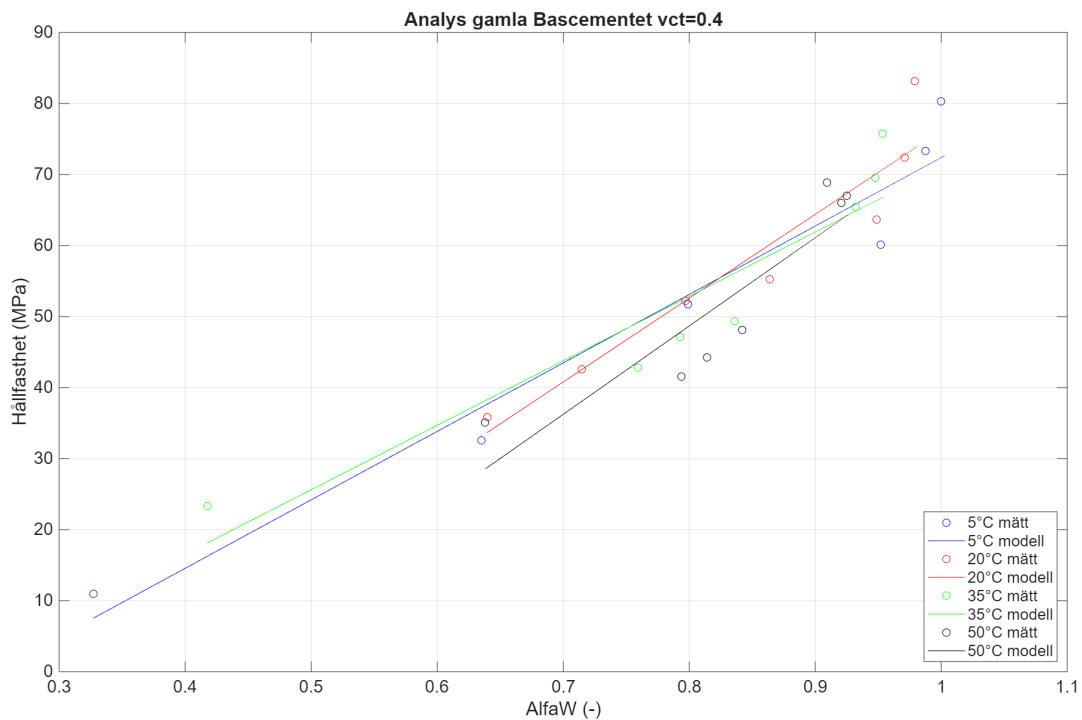
3.5 Hållfasthet – analys mot AlfaW



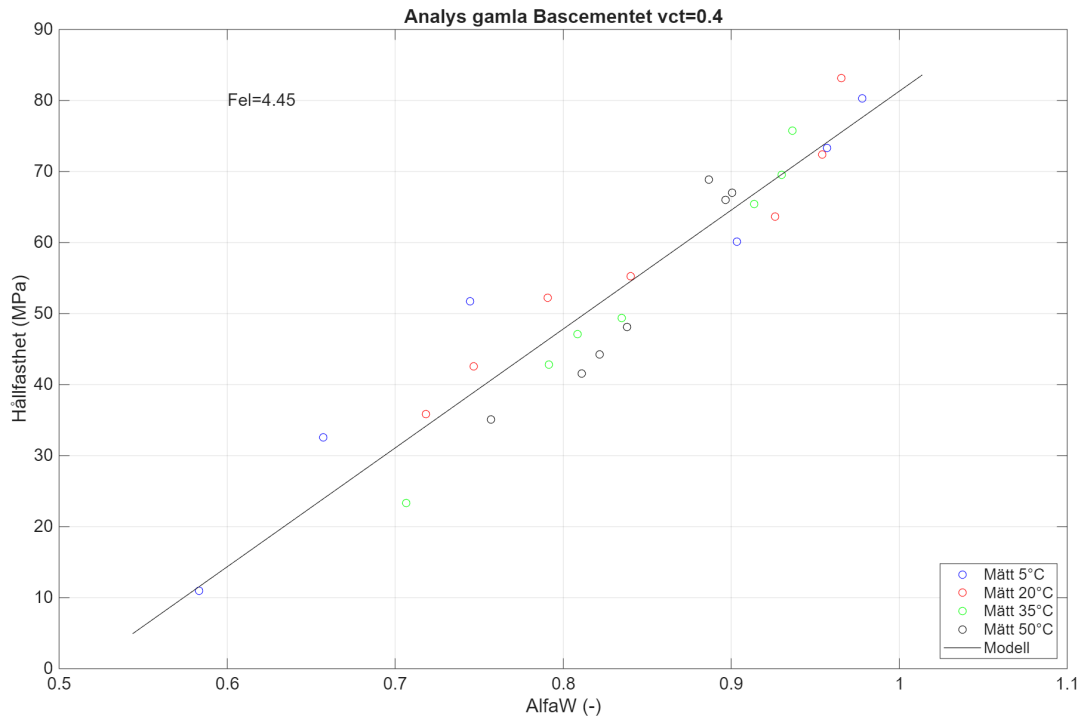
Figur 67. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



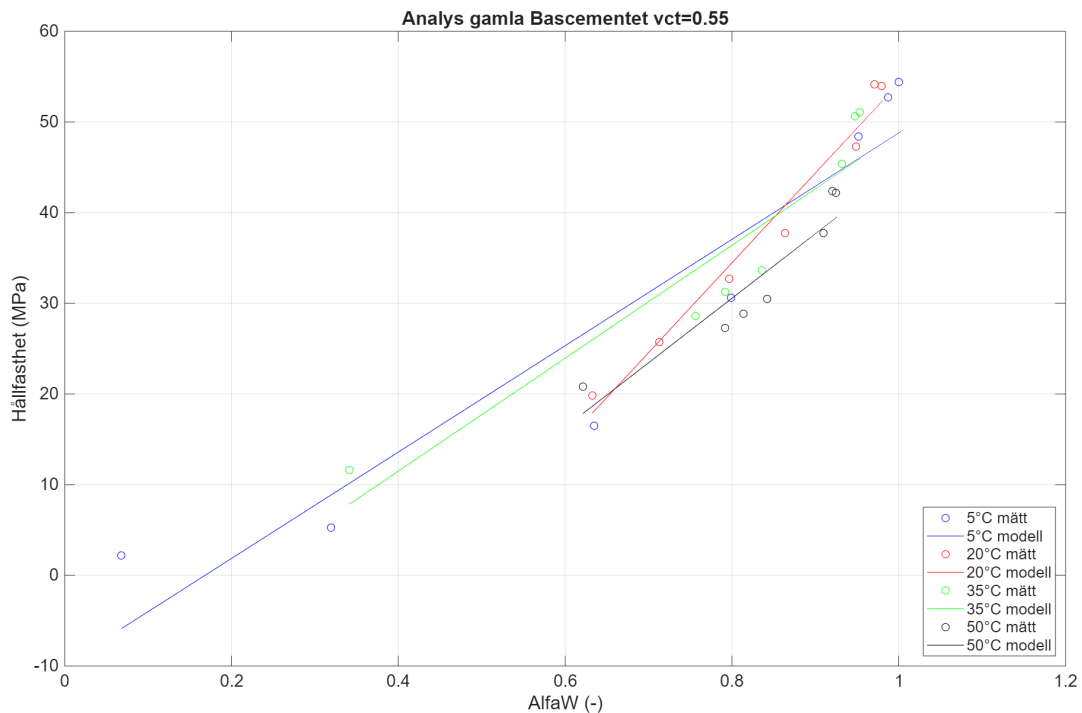
Figur 68. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer



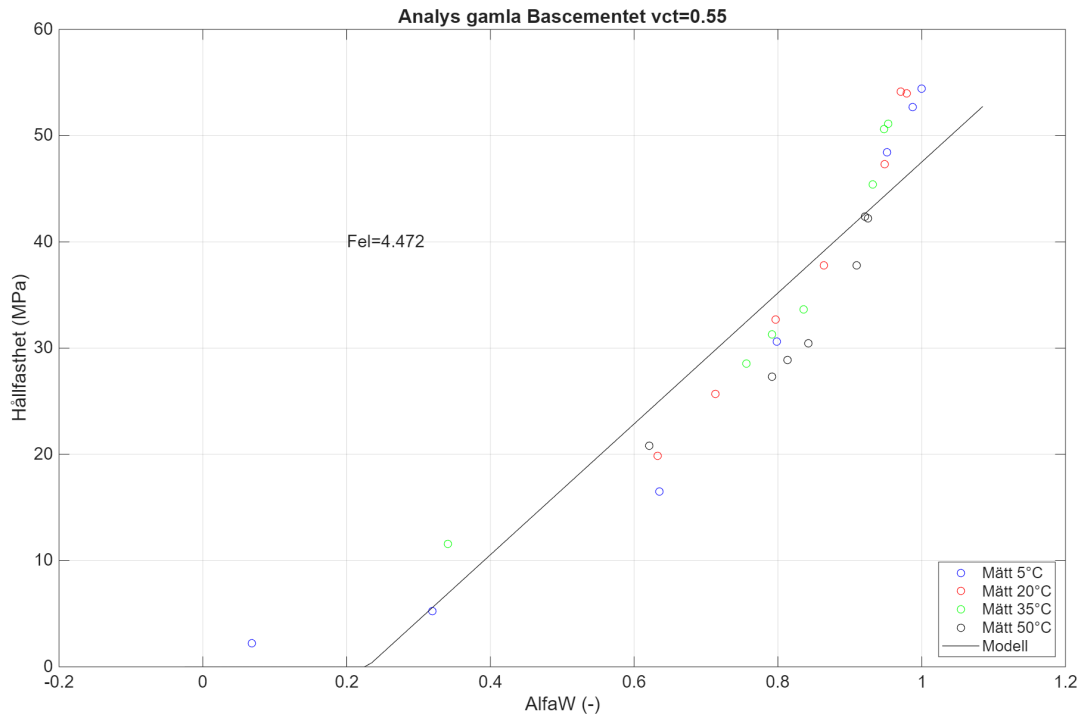
Figur 69. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



Figur 70. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40 där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer



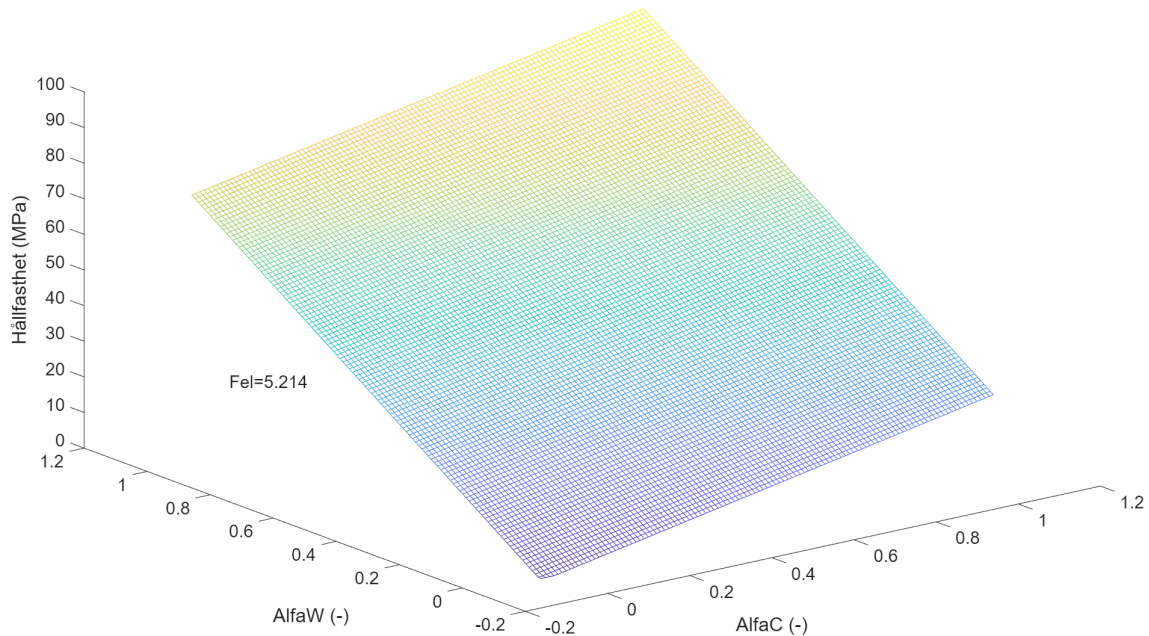
Figur 71. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



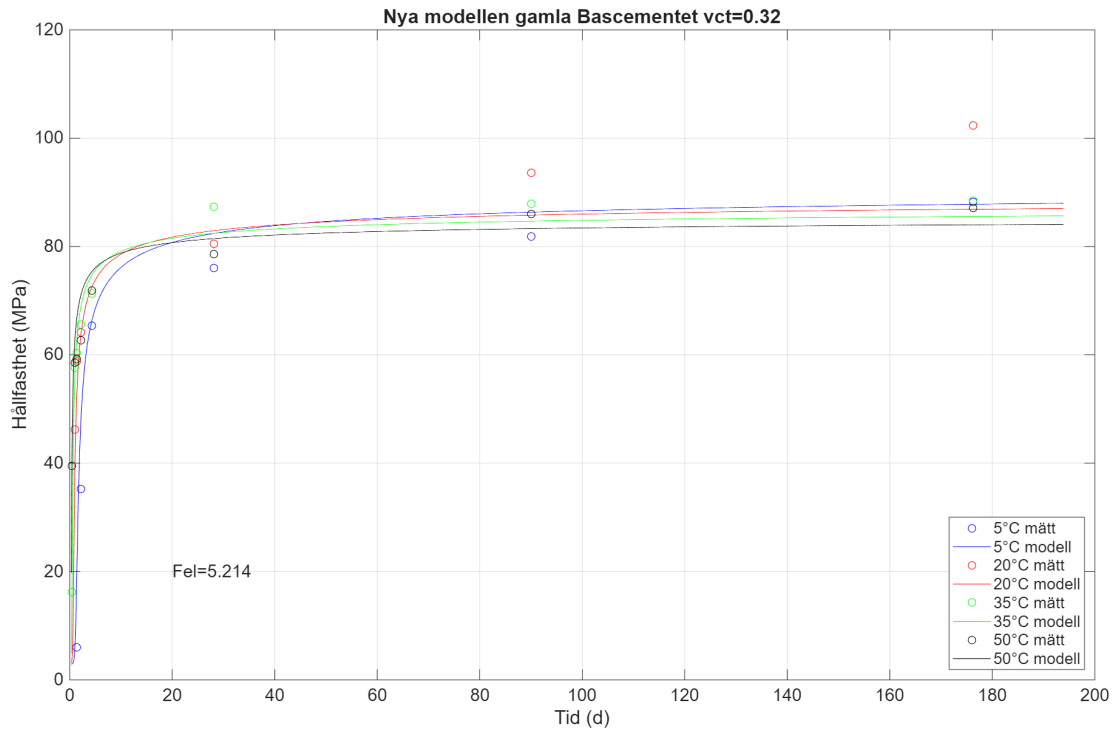
Figur 72. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

3.6 Hållfasthet – analys mot AlfaC och AlfaW

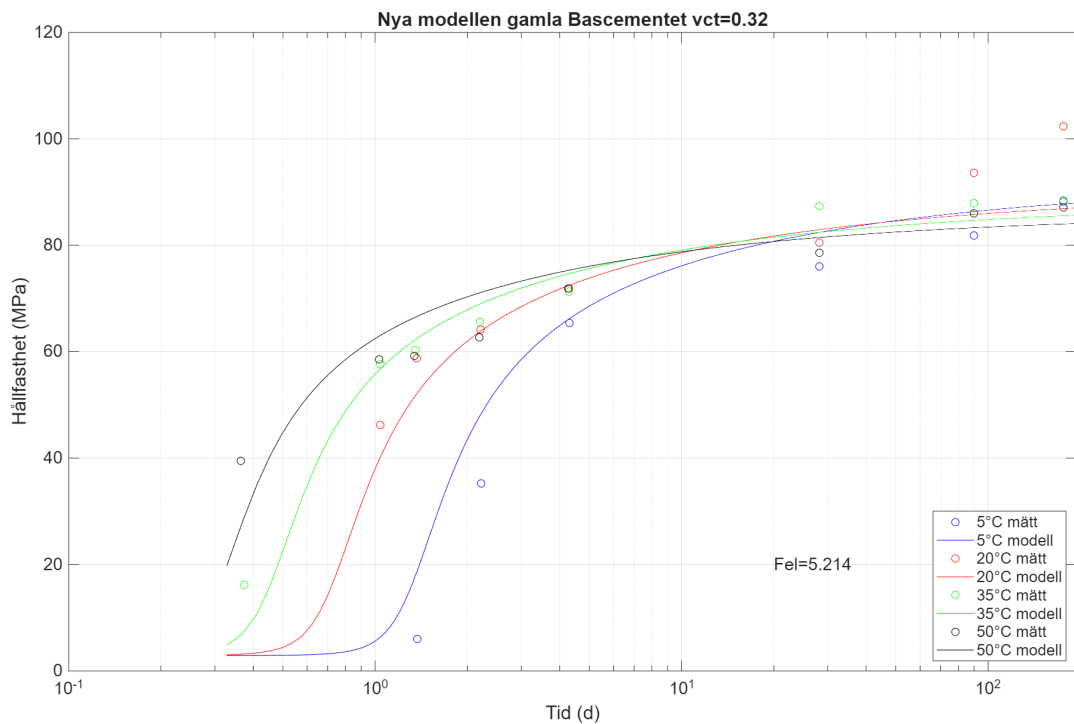
Nya modellen gamla Bascementet vct=0.32



Figur 73. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32

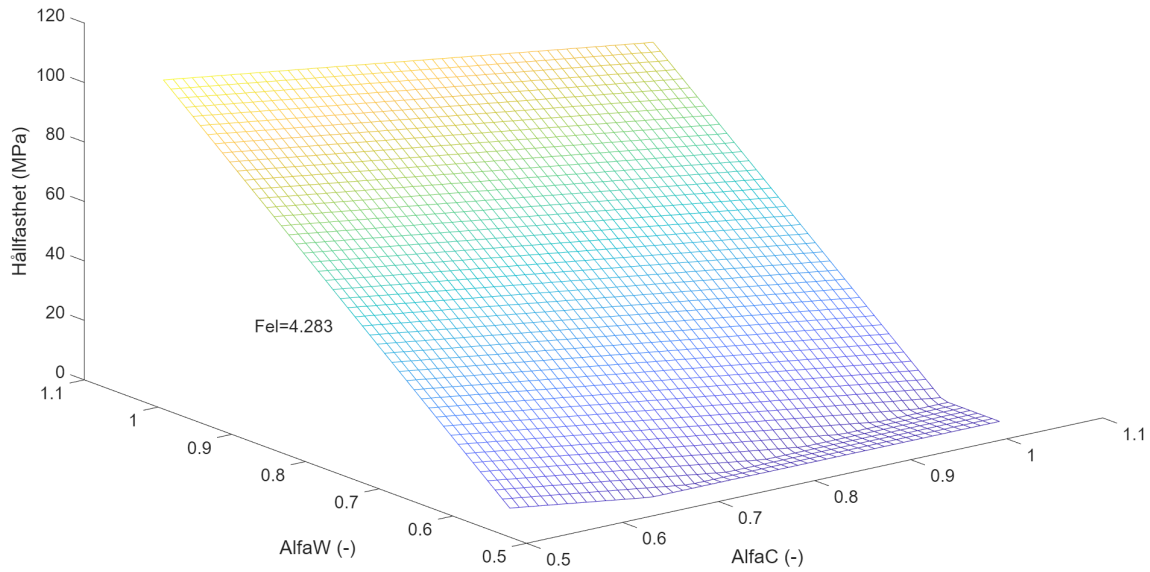


Figur 74. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme

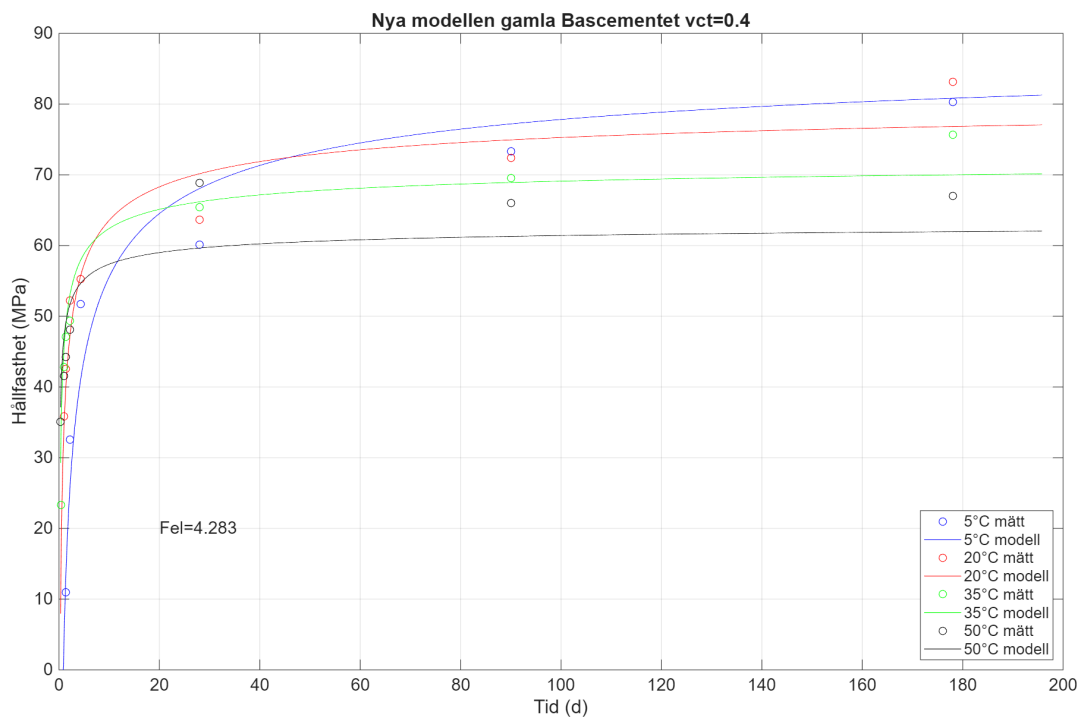


Figur 75. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme

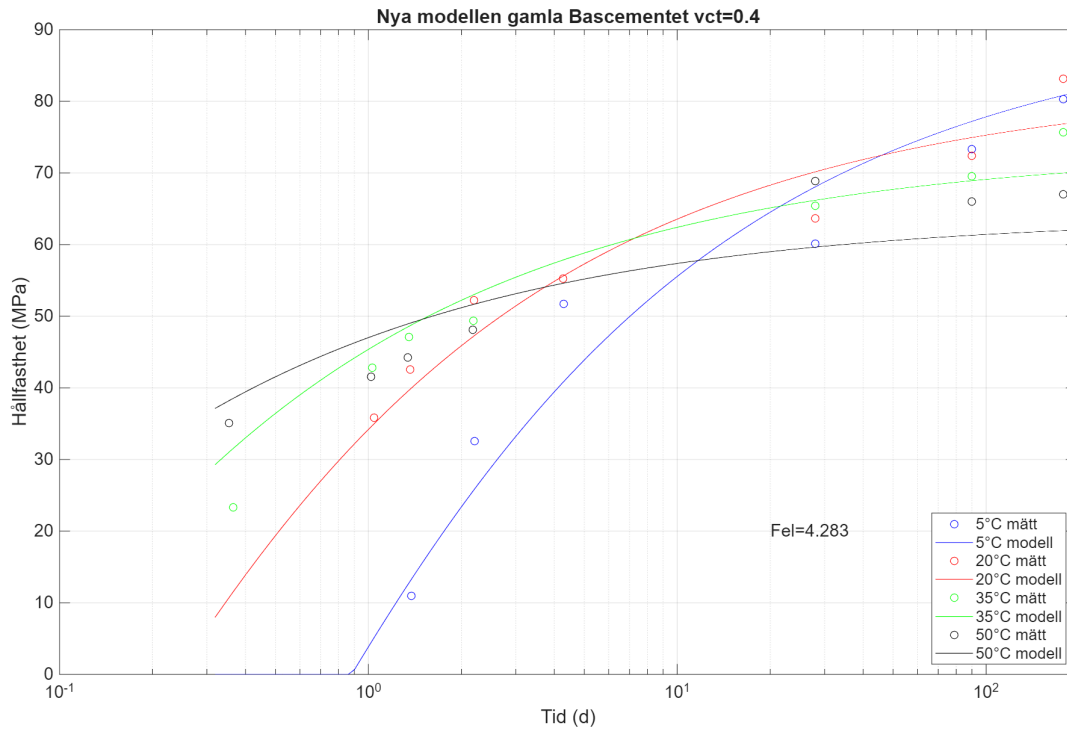
Nya modellen gamla Bascementet vct=0.4



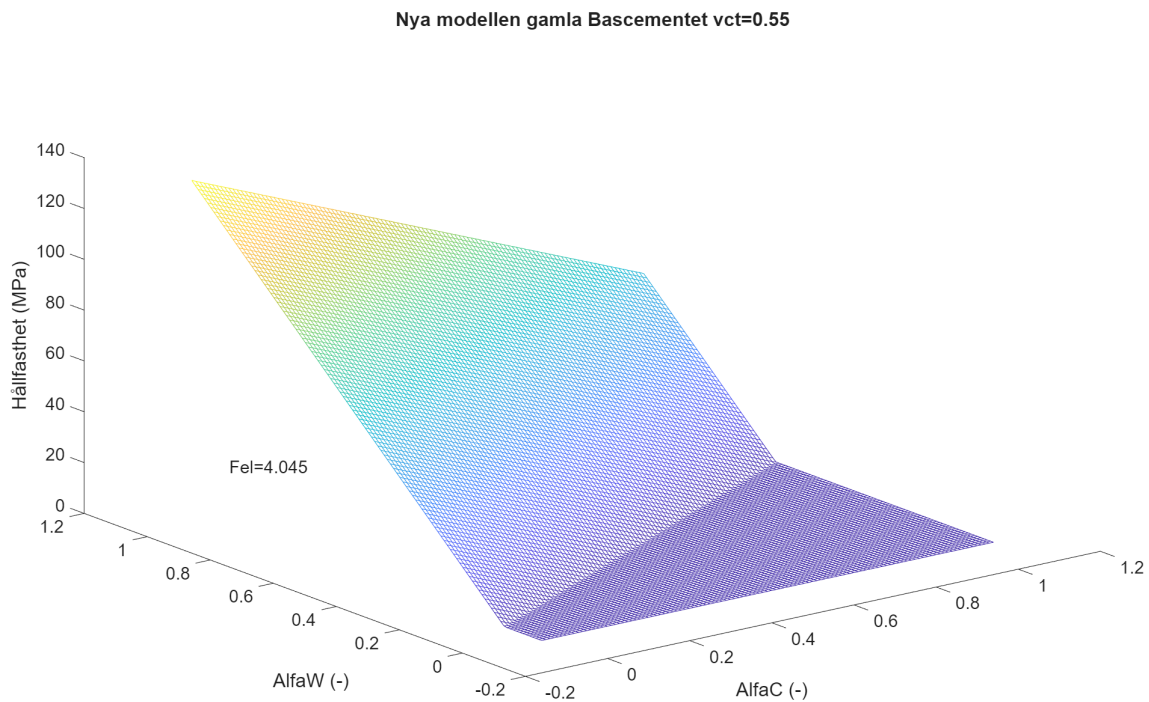
Figur 76. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40



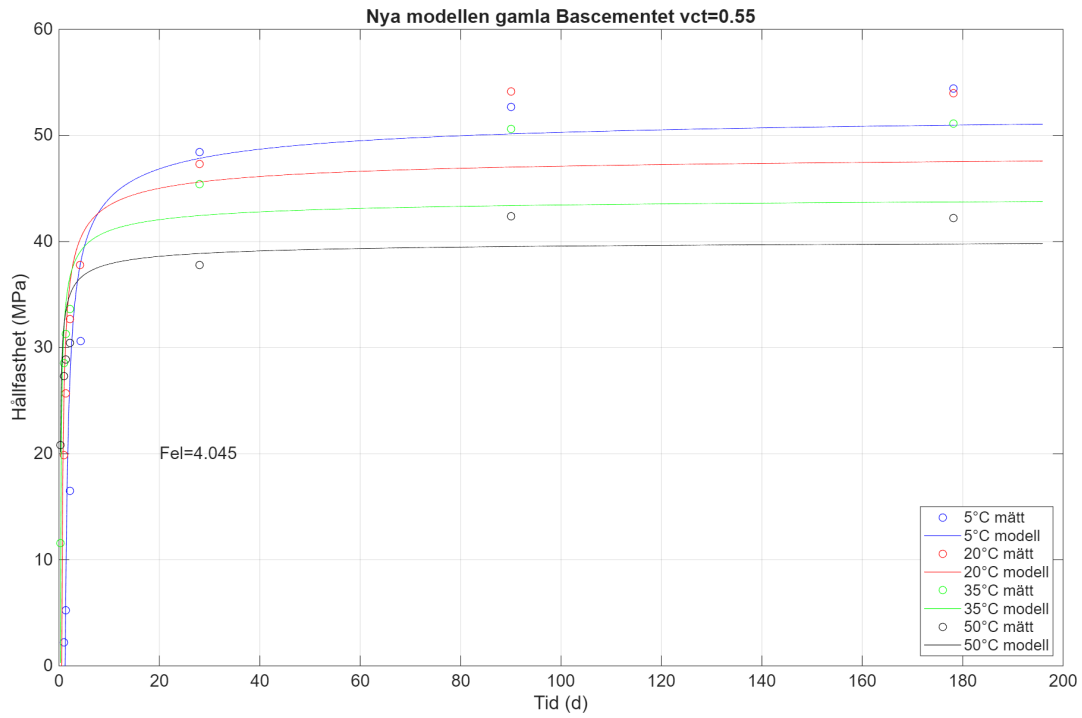
Figur 77. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme



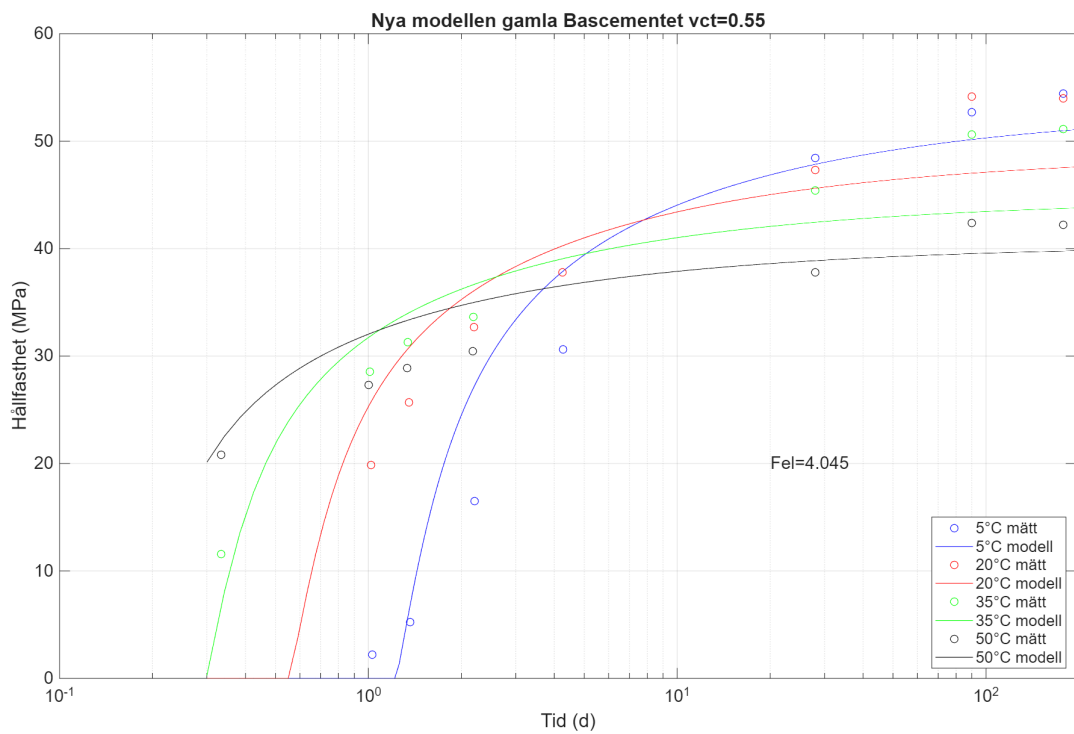
Figur 78. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme



Figur 79. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med en term i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55



Figur 80. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme



Figur 81. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 055, och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med en term i ekvationen för värme

4 Nya modellen - vatten, värme och hållfasthet, två termer för värme

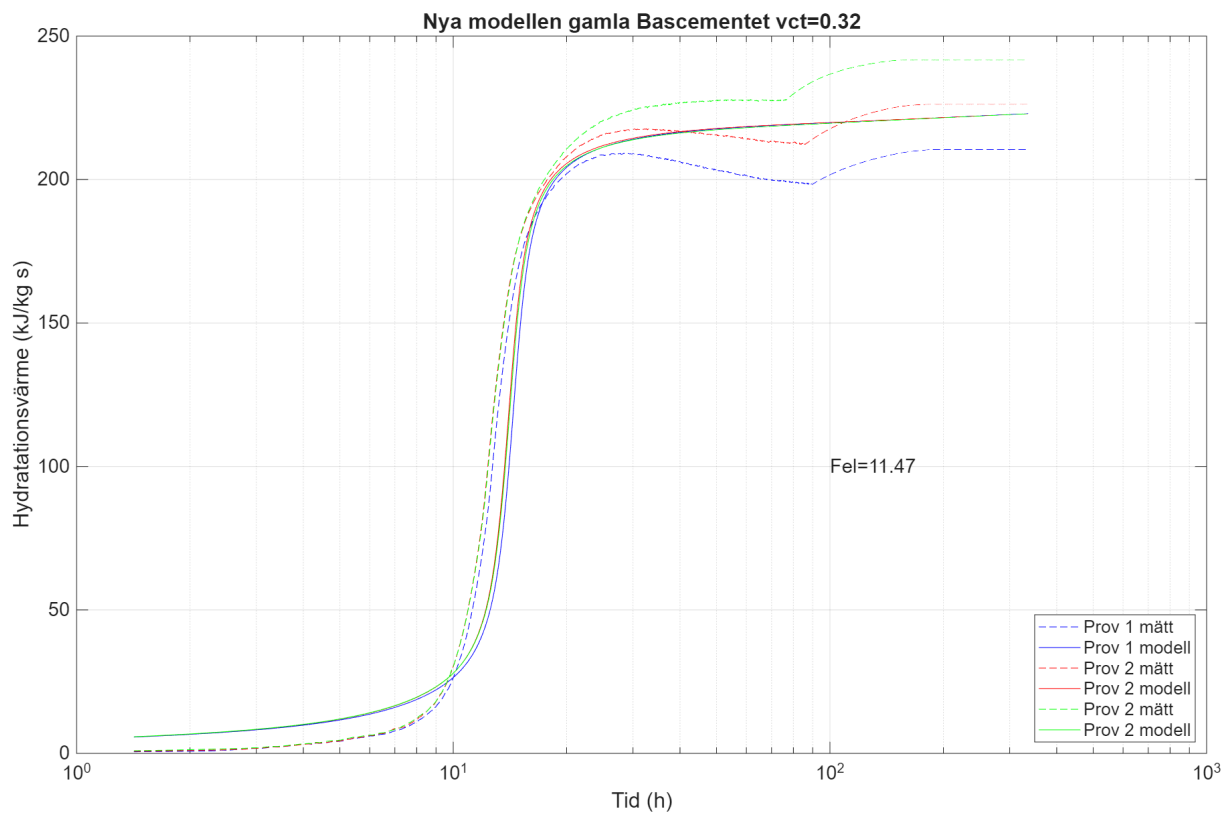
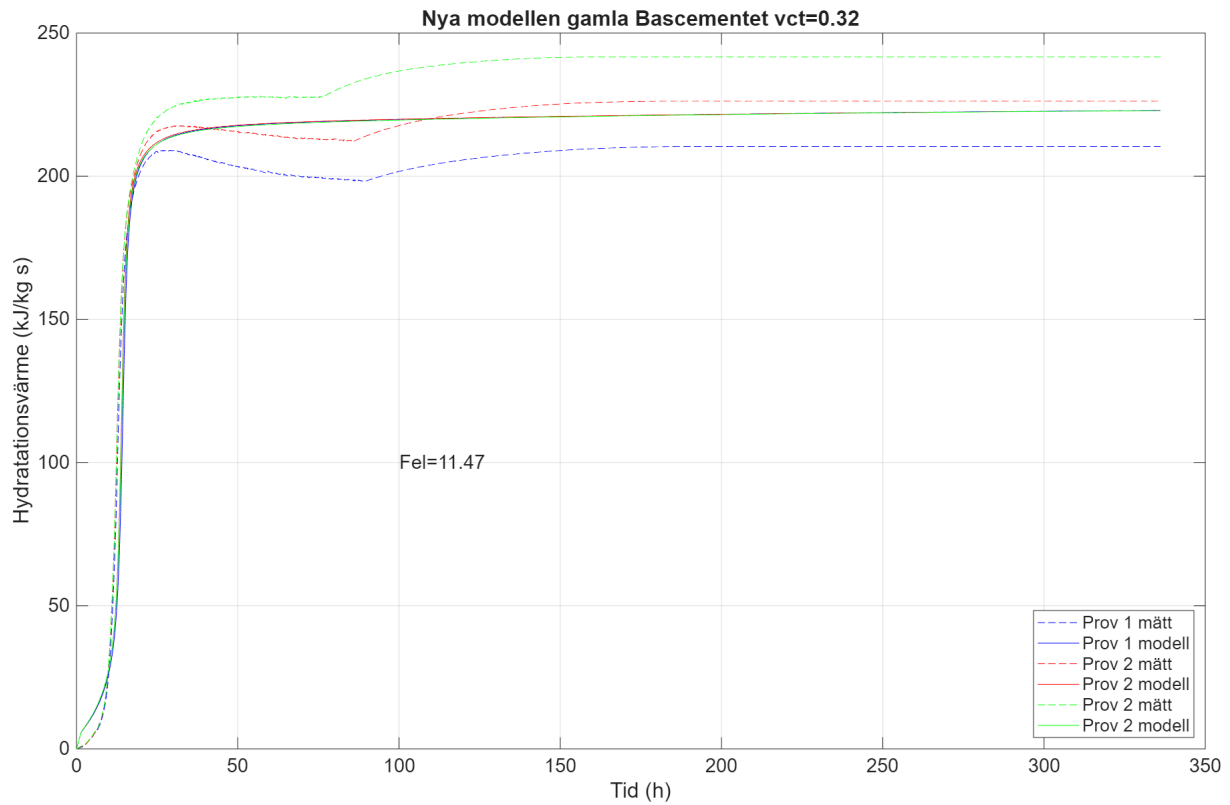
Anpassningsförfarandet är enligt:

- Initial anpassning av kemiskt bundet vatten och hydratationsgrad till mätdata för kemiskt bundet vatten.
- Initial anpassning av hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hydratationsvärme. Parametrar för hydratationsgrad från kemiskt bundet vatten används som startvärden.
- Justeringsanpassning av kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för kemiskt bundet vatten och hydratationsvärme. Parametrar från tidigare anpassningar används som startvärden.
- Analysanpassning av hållfasthet vid konstant temperatur som linjär funktion av bindemedelsrelaterad hydratationsgrad, olika temperaturer var för sig samt olika temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.
- Analysanpassning av hållfasthet vid konstant temperatur som linjär funktion av vattenrelaterad hydratationsgrad, olika temperaturer var för sig samt olika temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.
- Anpassning av hållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad och vattenrelaterad hydratationsgrad, alla temperaturer samtidigt. Parametrar för hydratationsgrad från tidigare återanvänds.

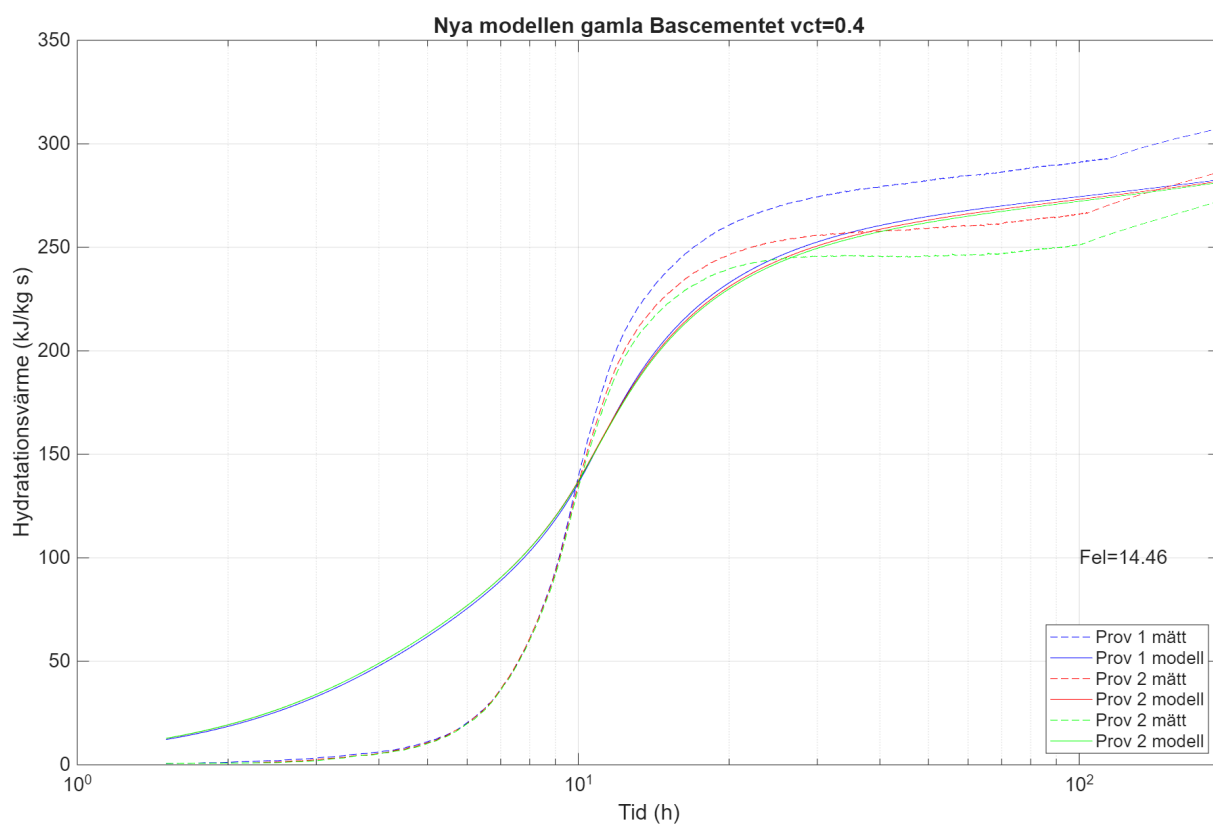
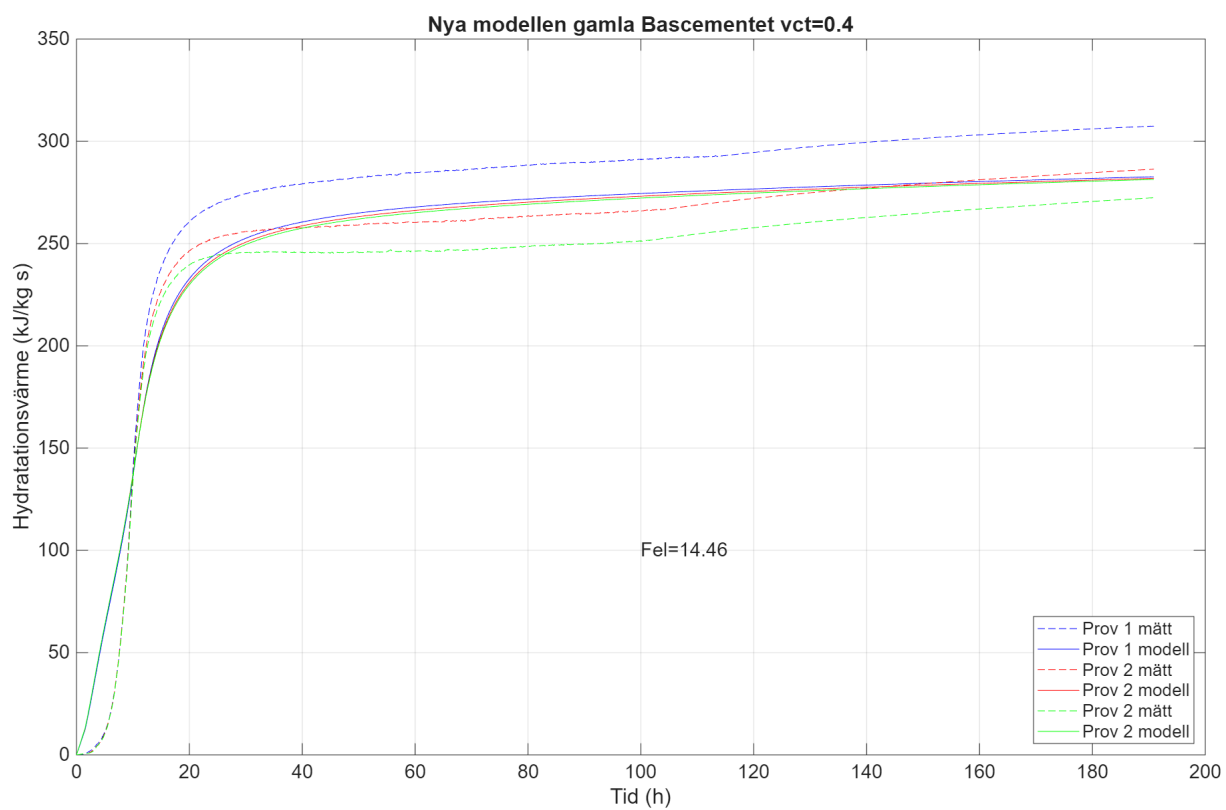
4.1 Initialt kemiskt bundet vatten

Samma som för en term för värme, se 3.1.

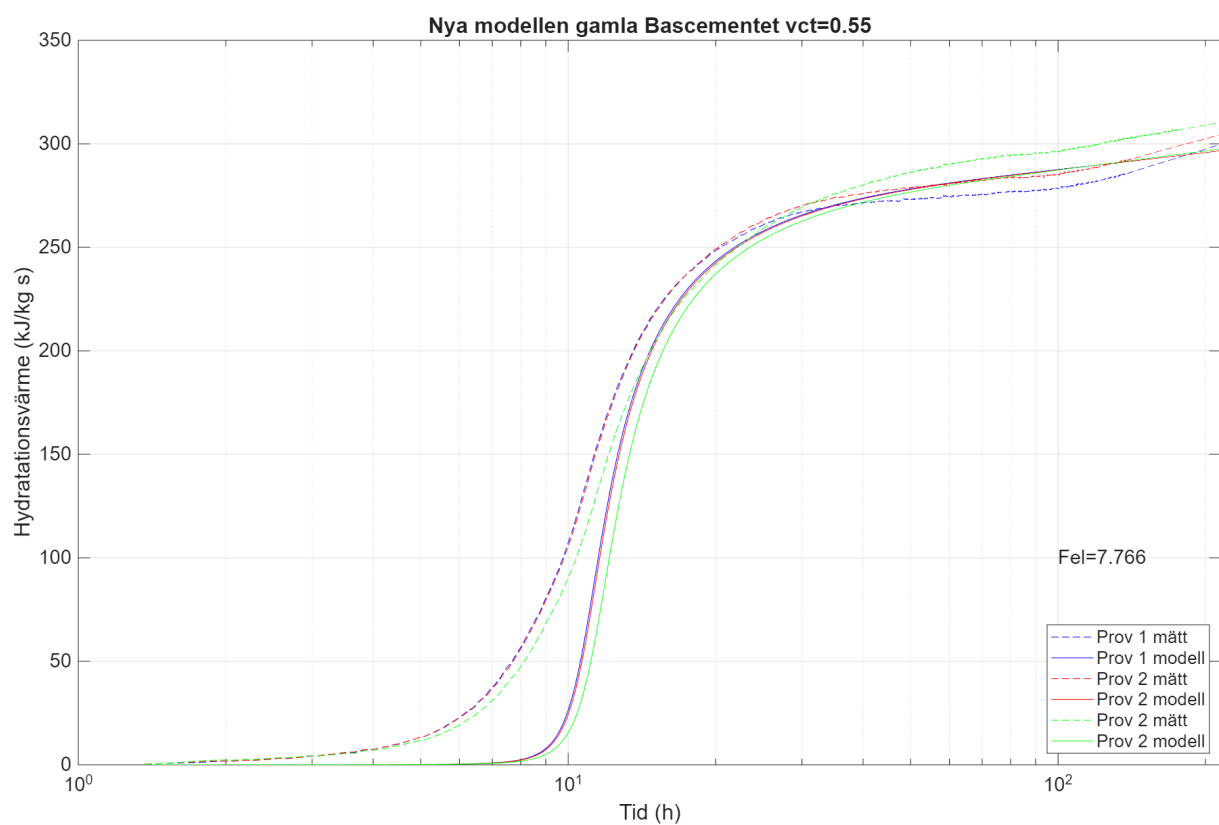
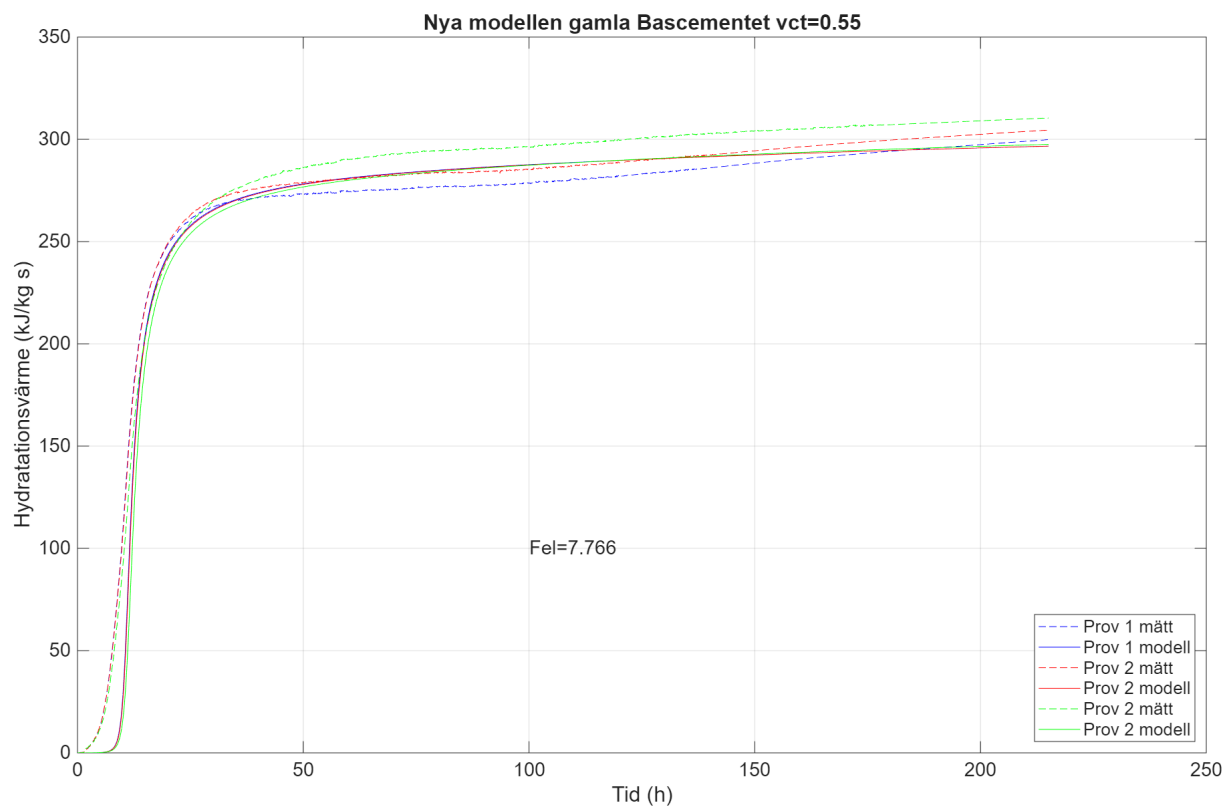
4.2 Initialt värme



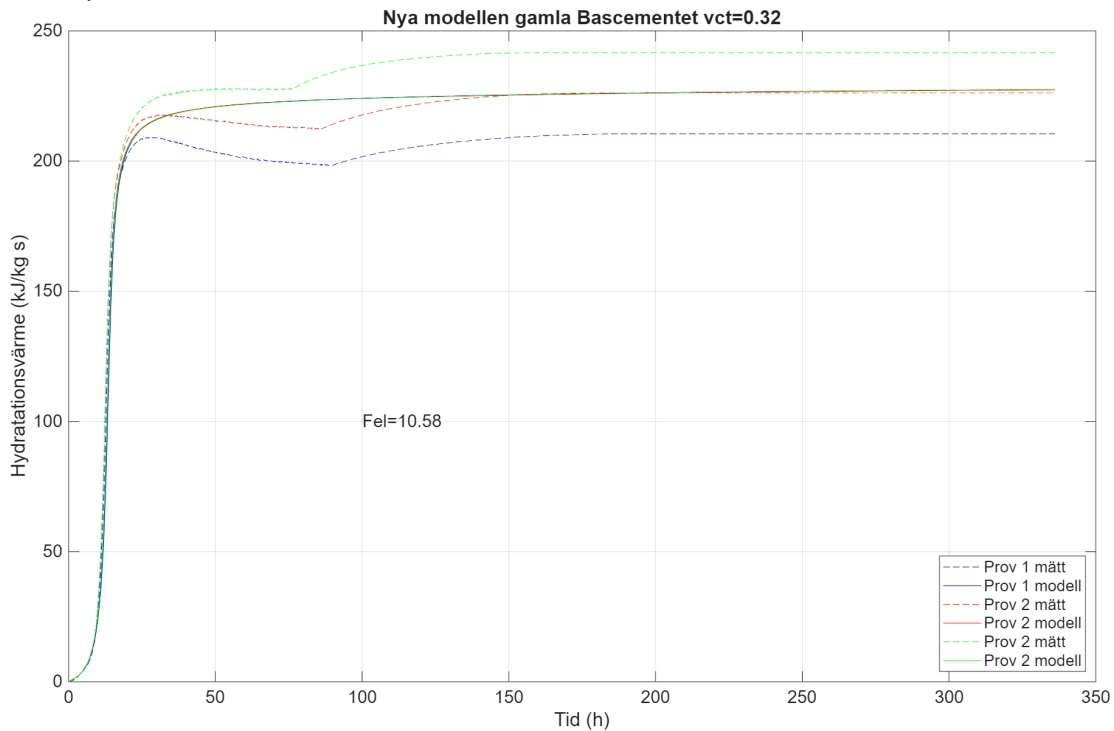
Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1



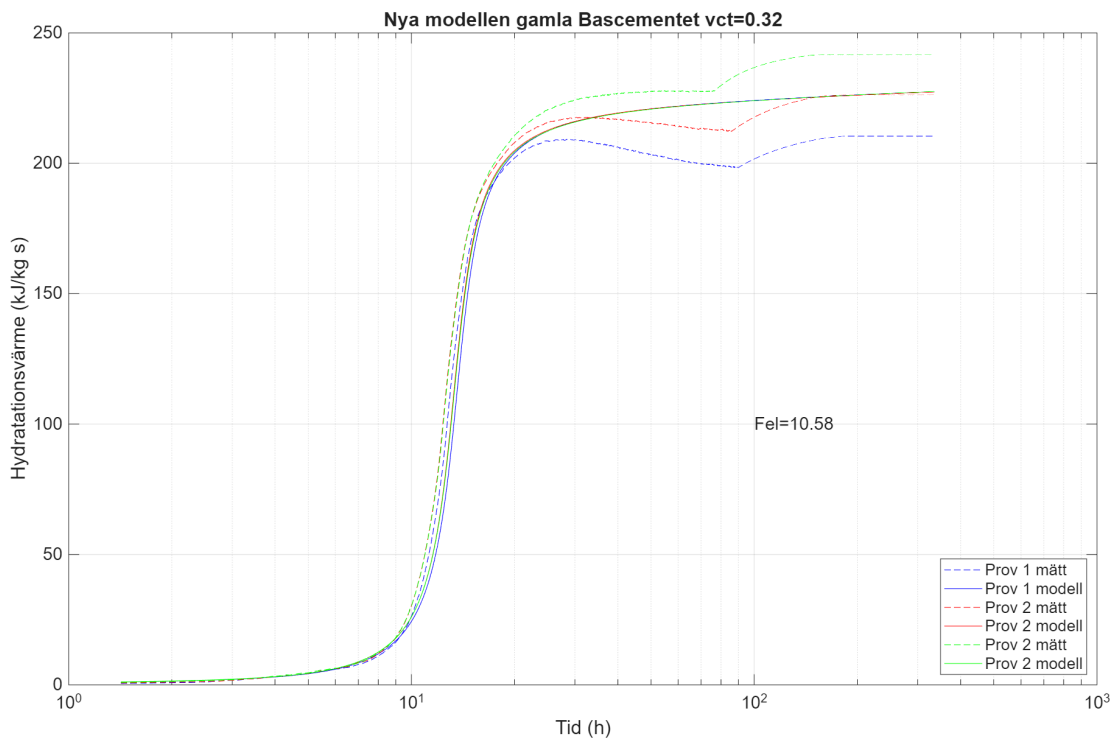
Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1



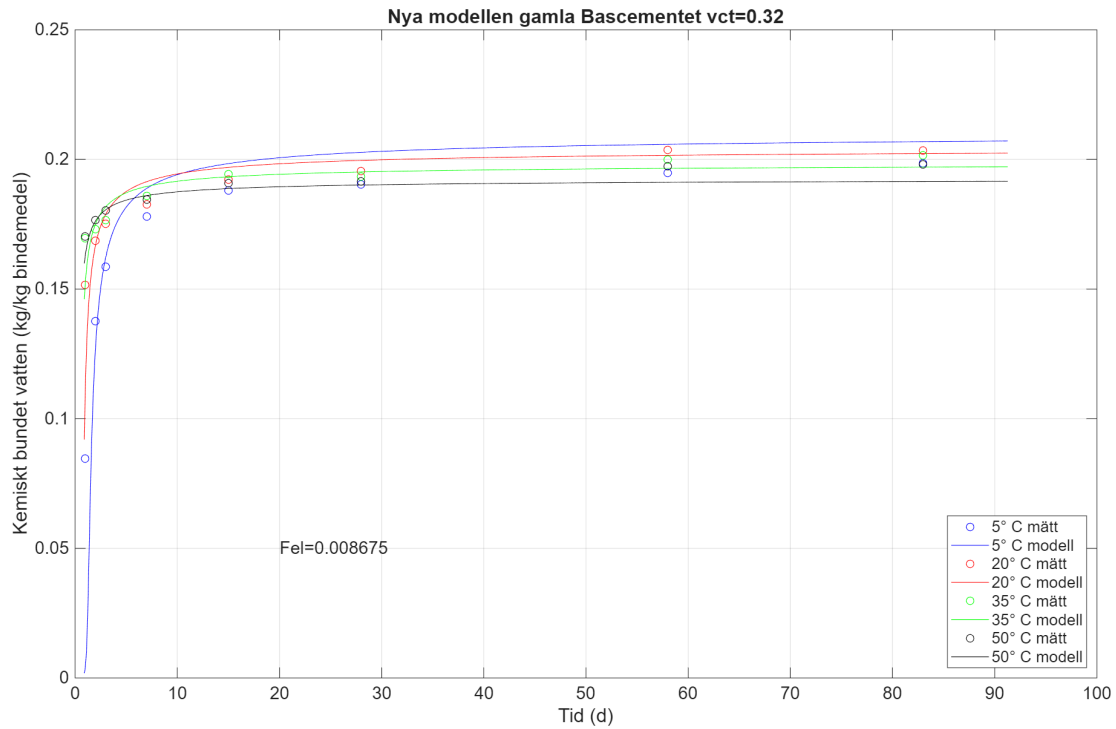
4.3 Justerat värme & kemiskt bundet vatten



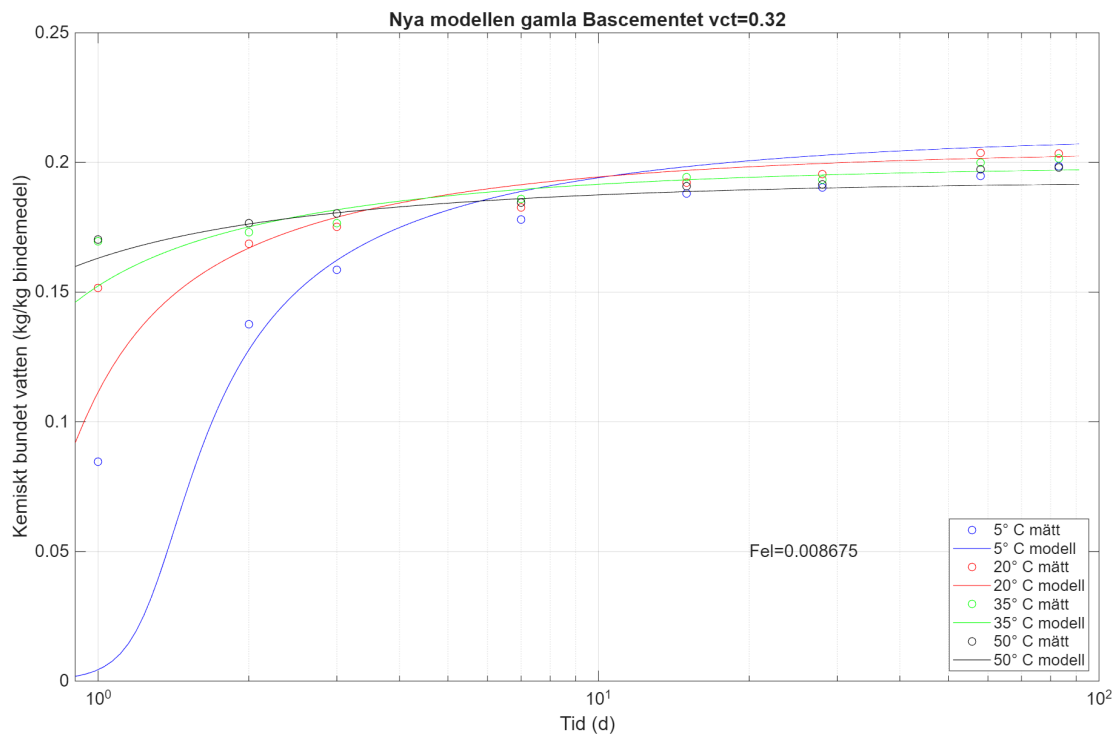
Figur 82. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydrationsvärme och kemiskt bundet vatten



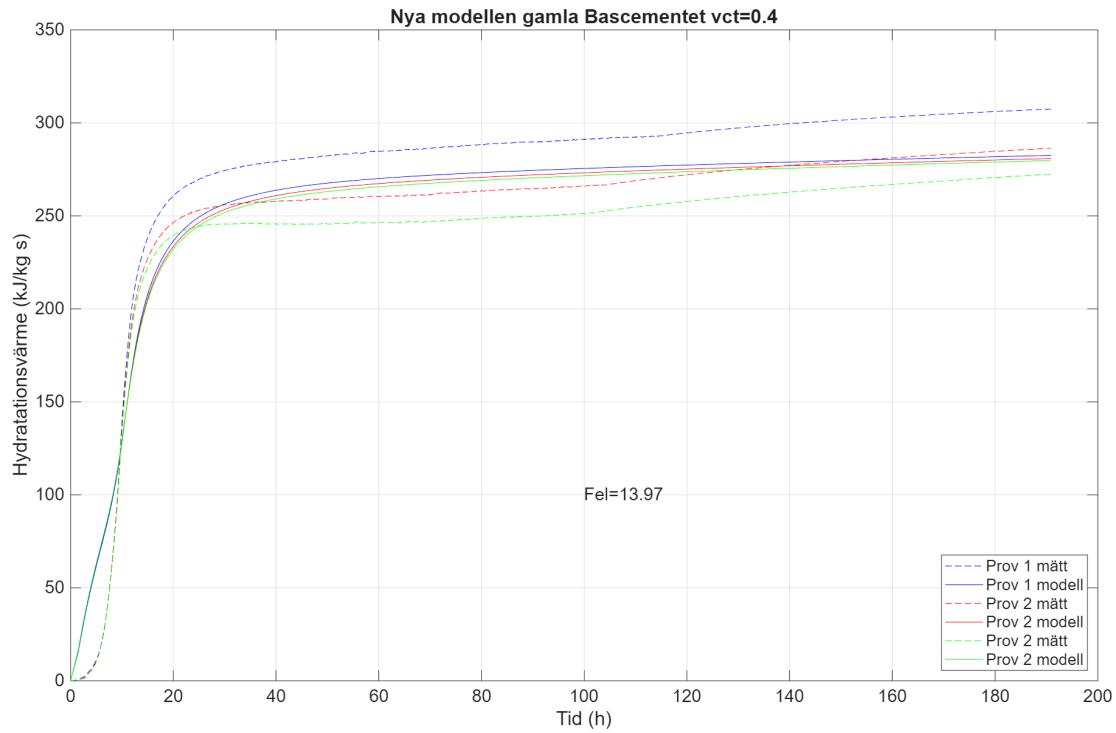
Figur 83. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydrationsvärme och kemiskt bundet vatten



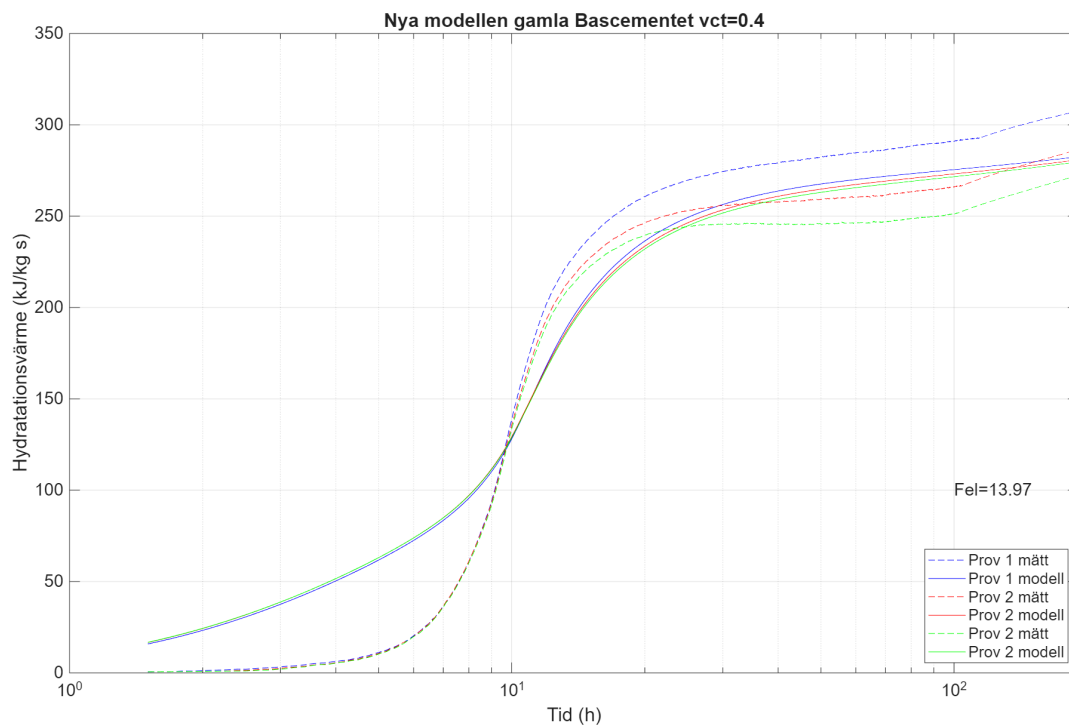
Figur 84. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten



Figur 85. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

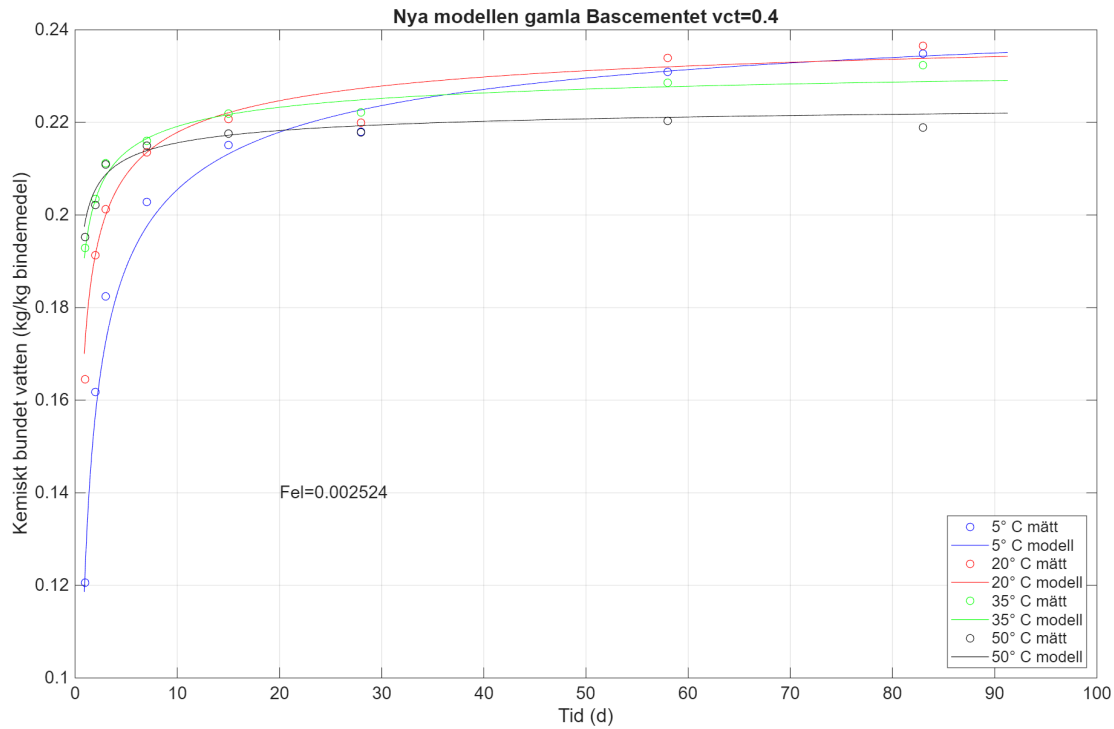


Figur 86. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

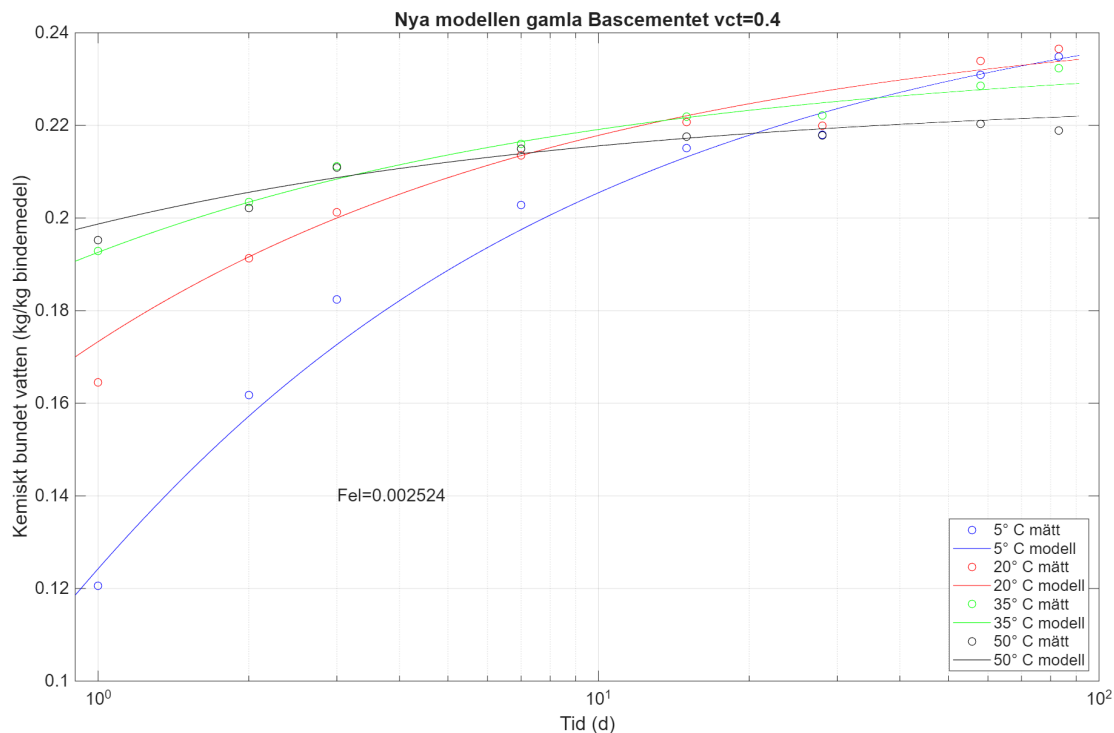


Figur 87. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

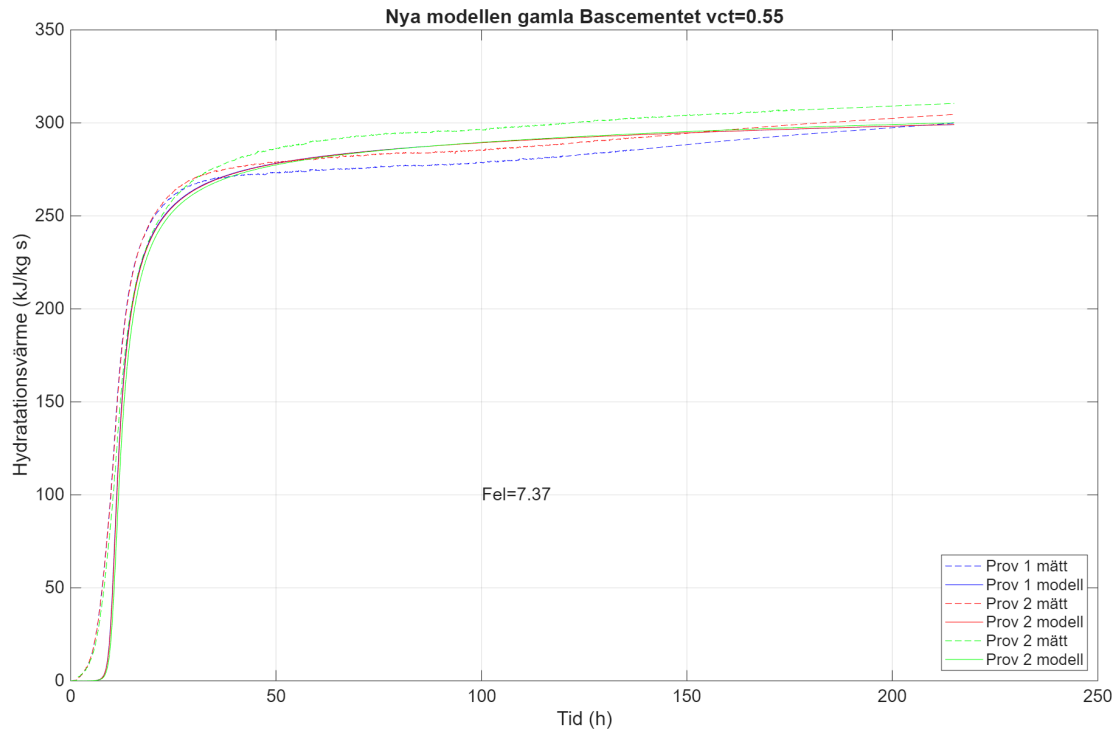


Figur 88. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

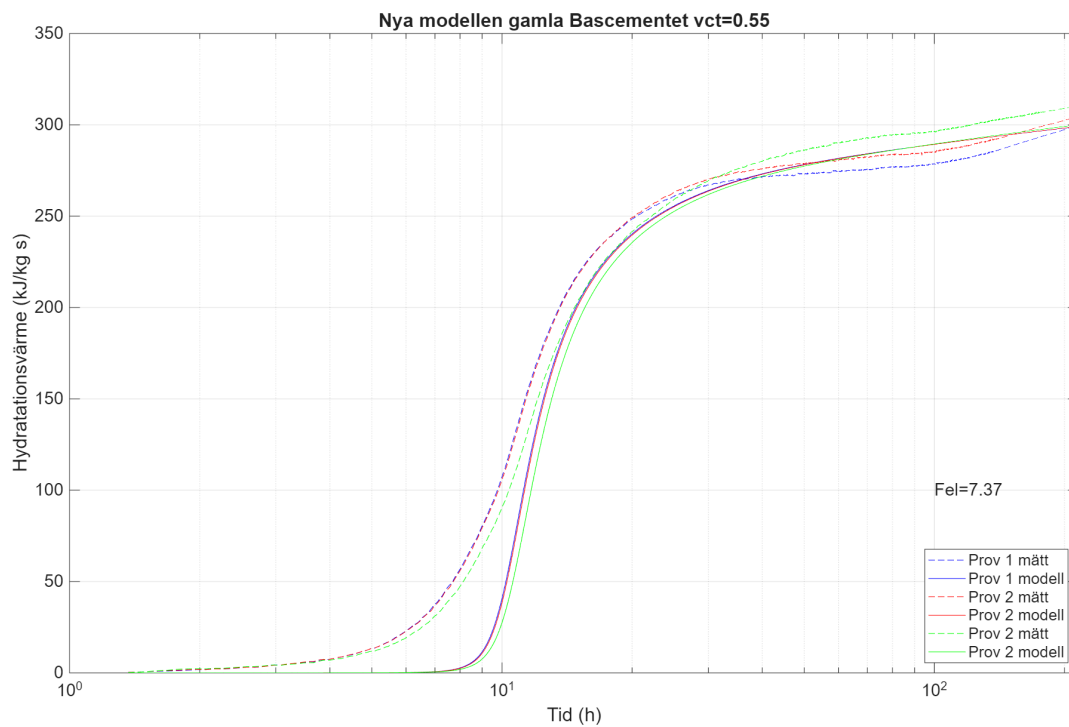


Figur 89. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

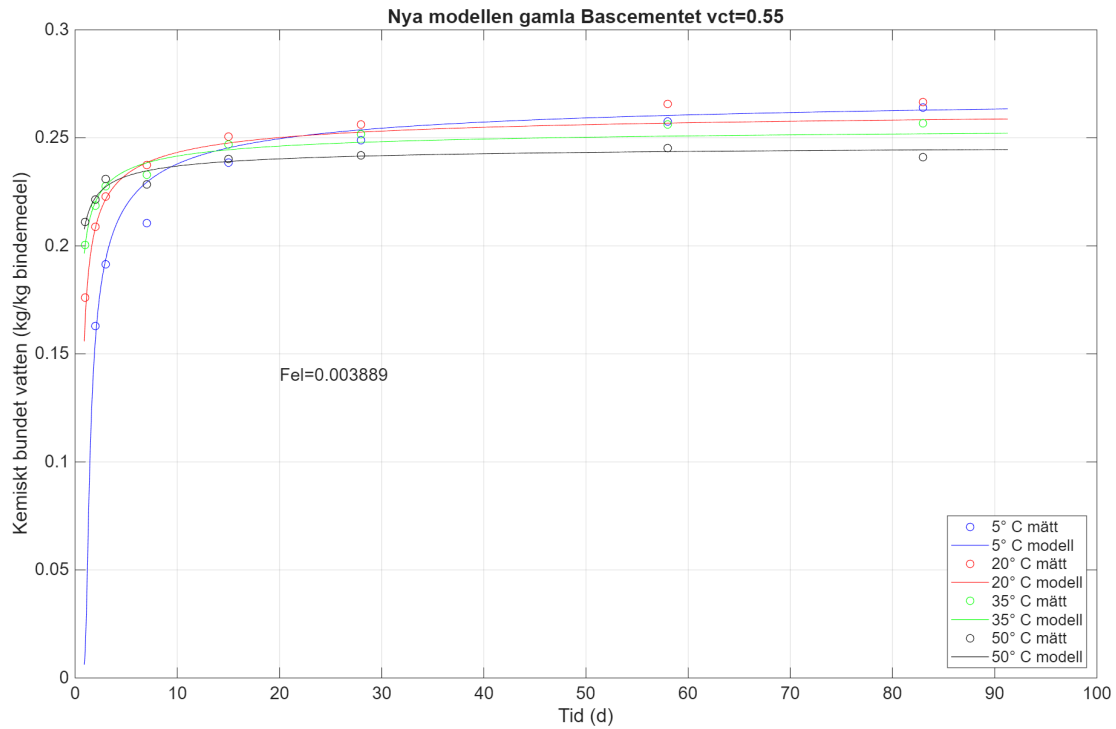


Figur 90. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

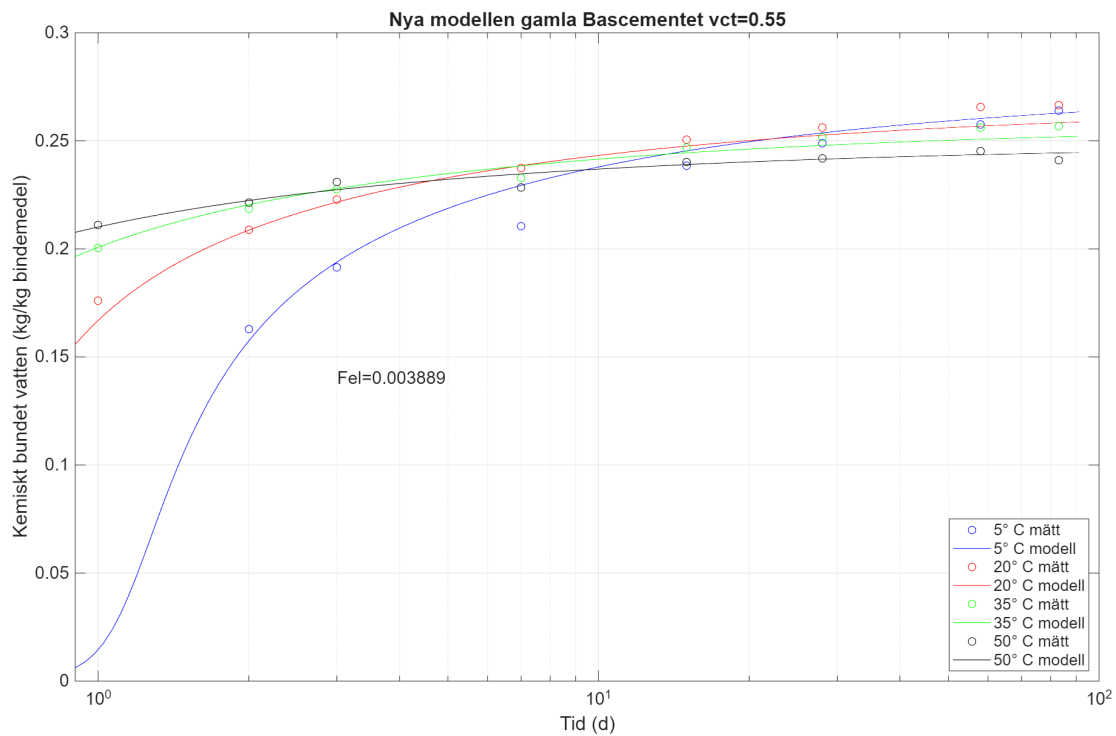


Figur 91. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

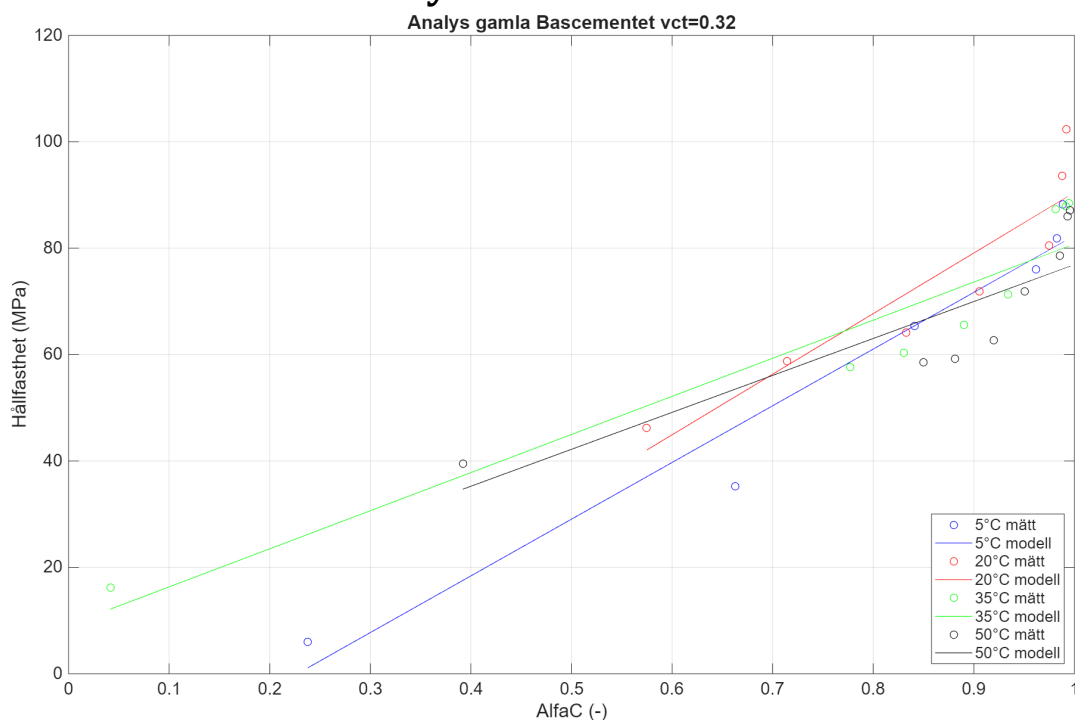


Figur 92. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

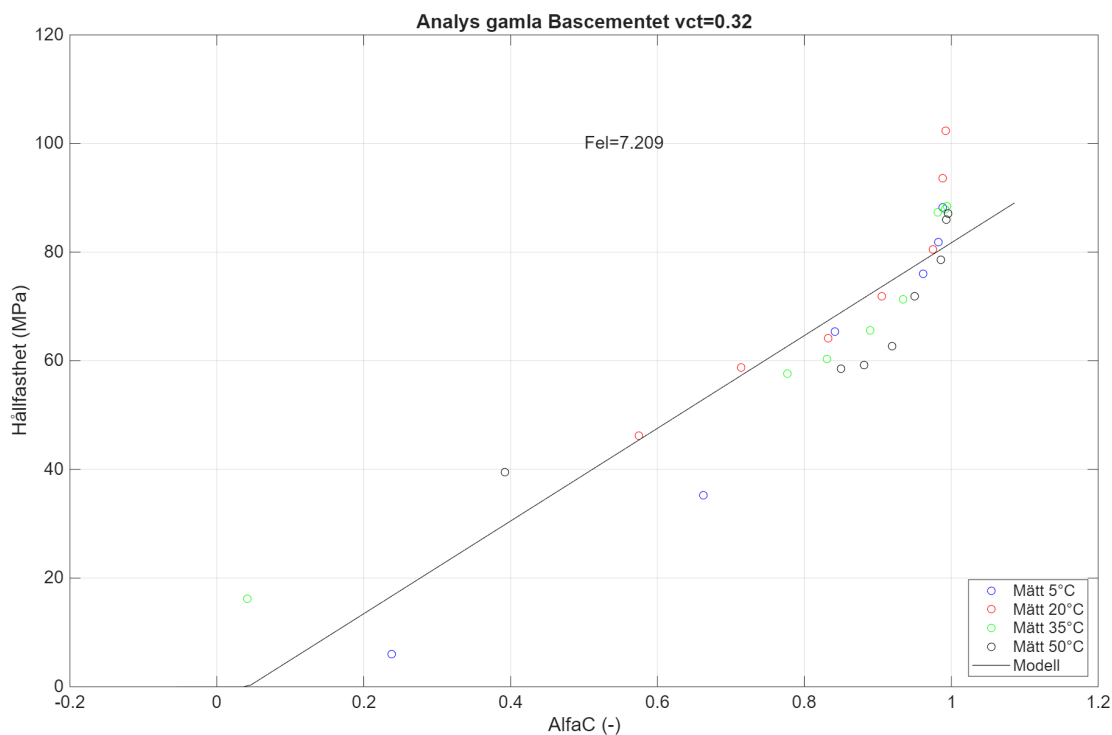


Figur 93. Justeringsanpassning för kemiskt bundet vatten för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, där Anpassning utförts mot mätdata för både hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten

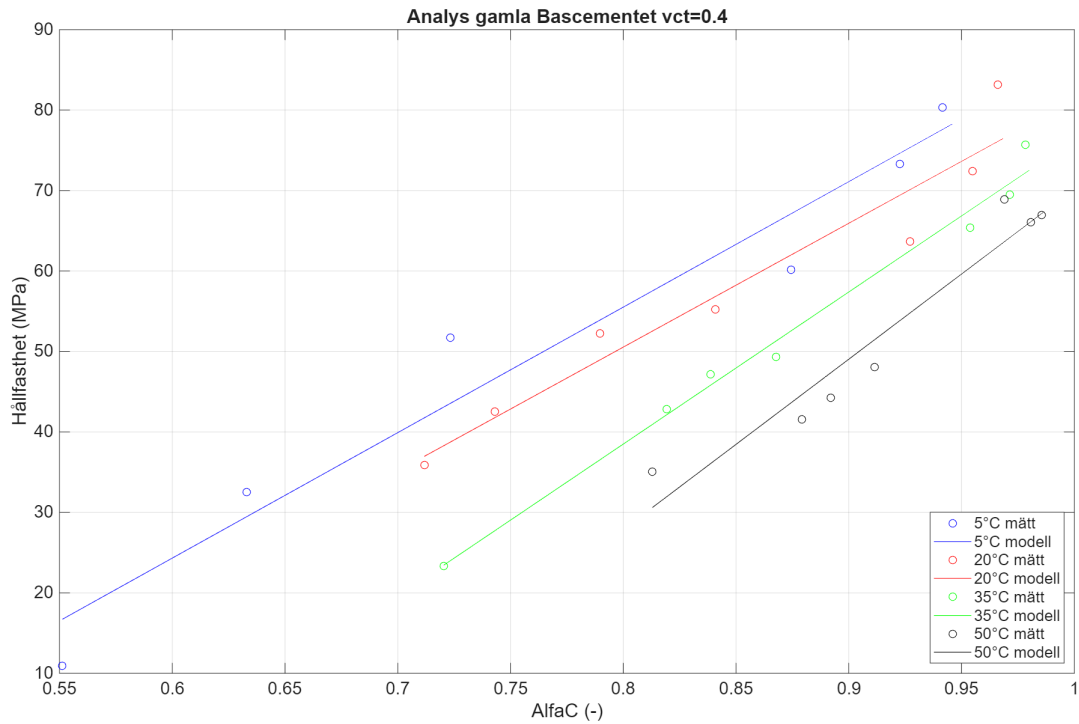
4.4 Hållfasthet – analys mot AlfaC



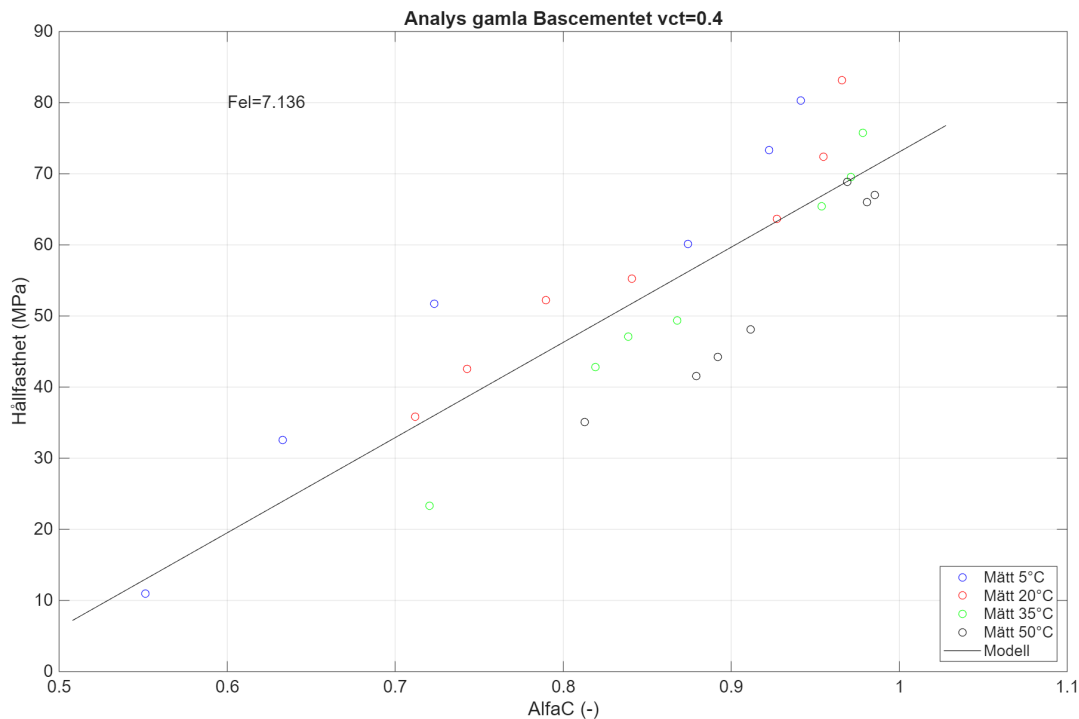
Figur 94. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



Figur 95. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

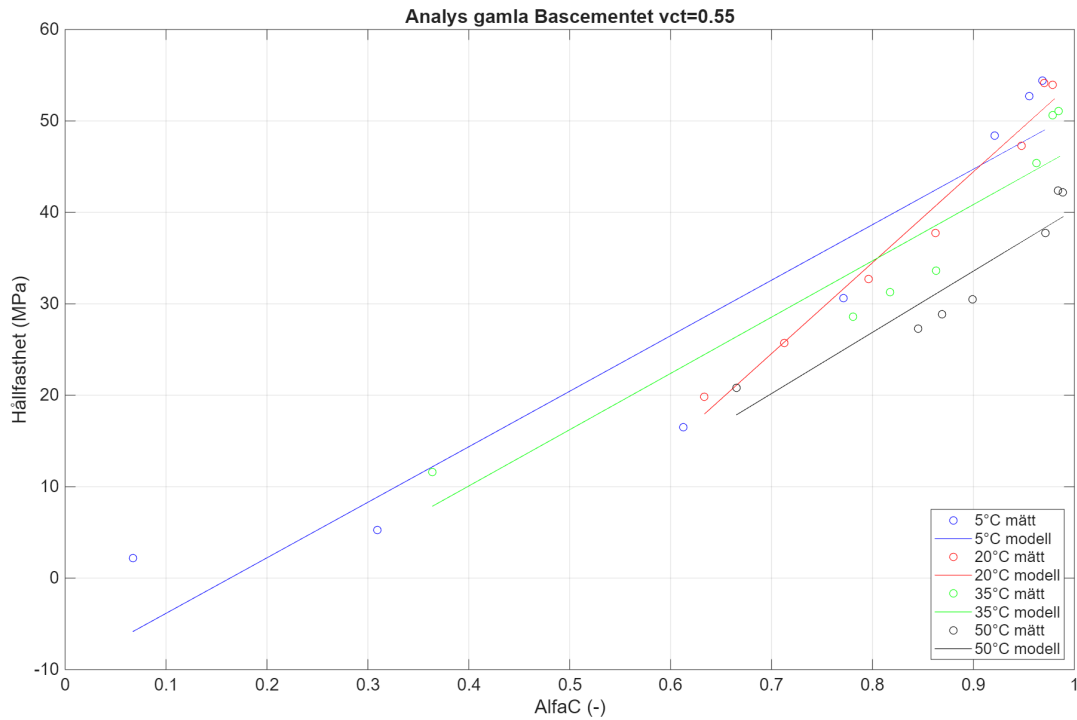


Figur 96. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur

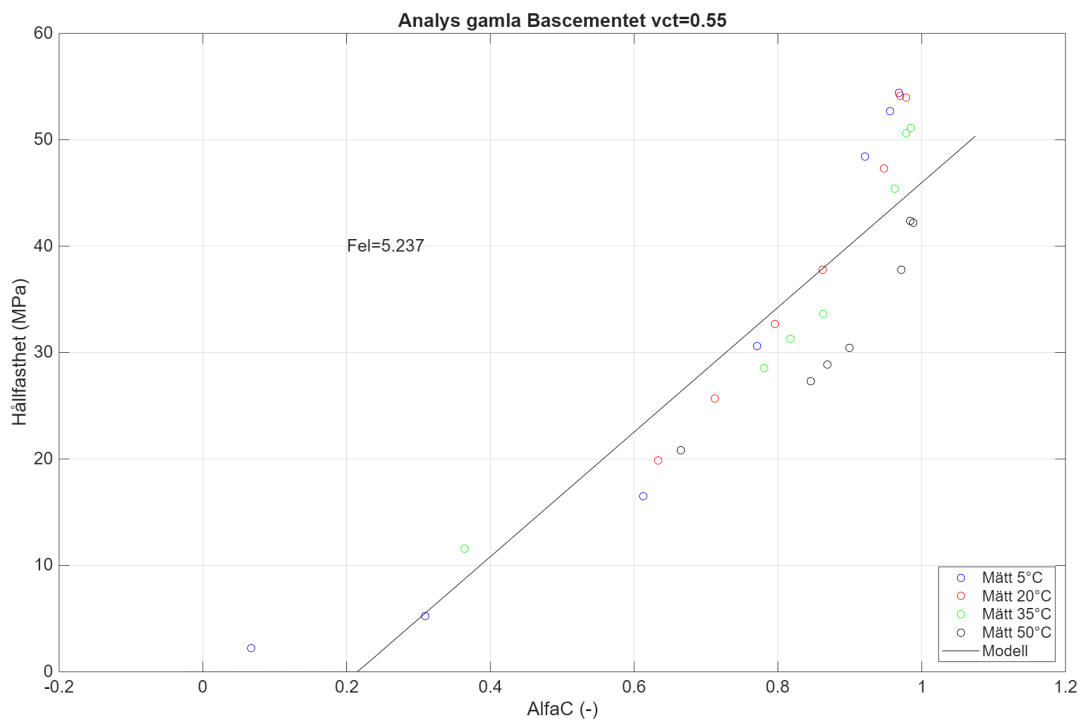


Figur 97. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

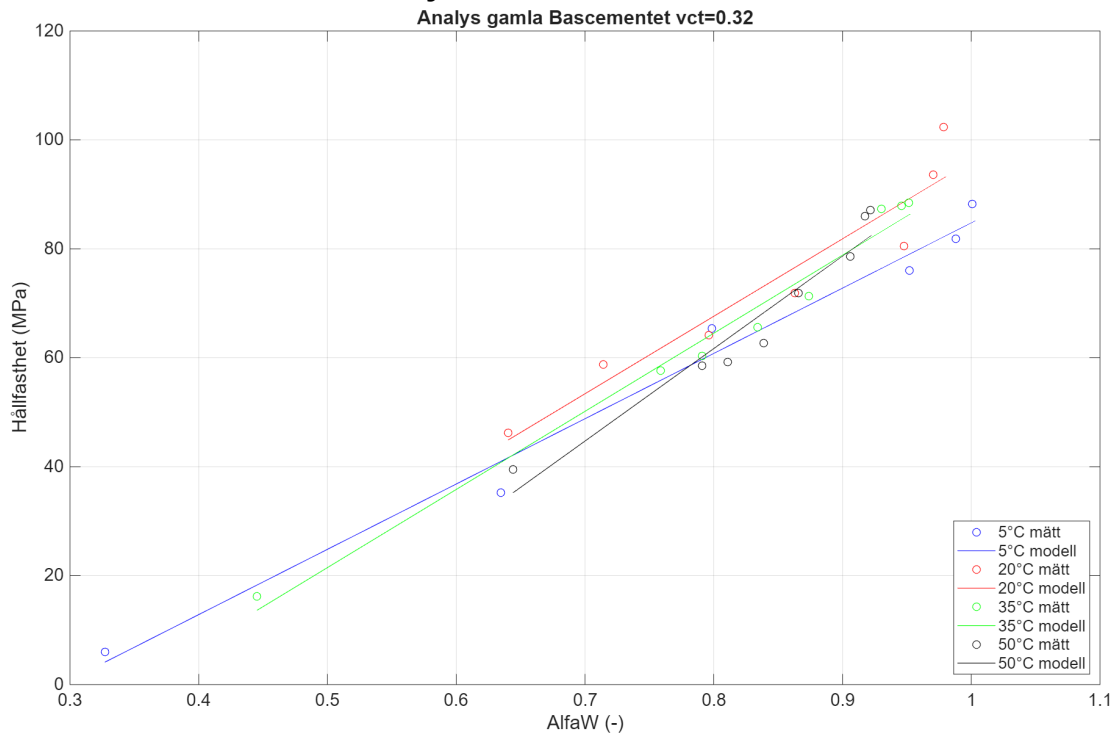


Figur 98. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur

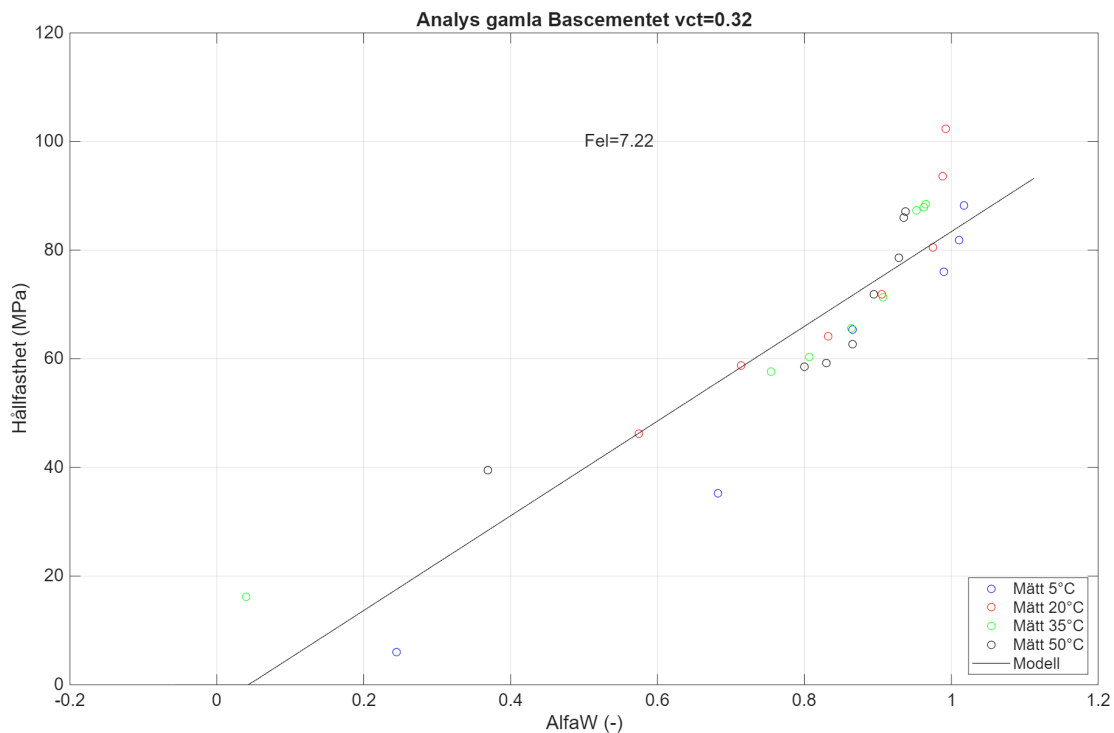


Figur 99. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

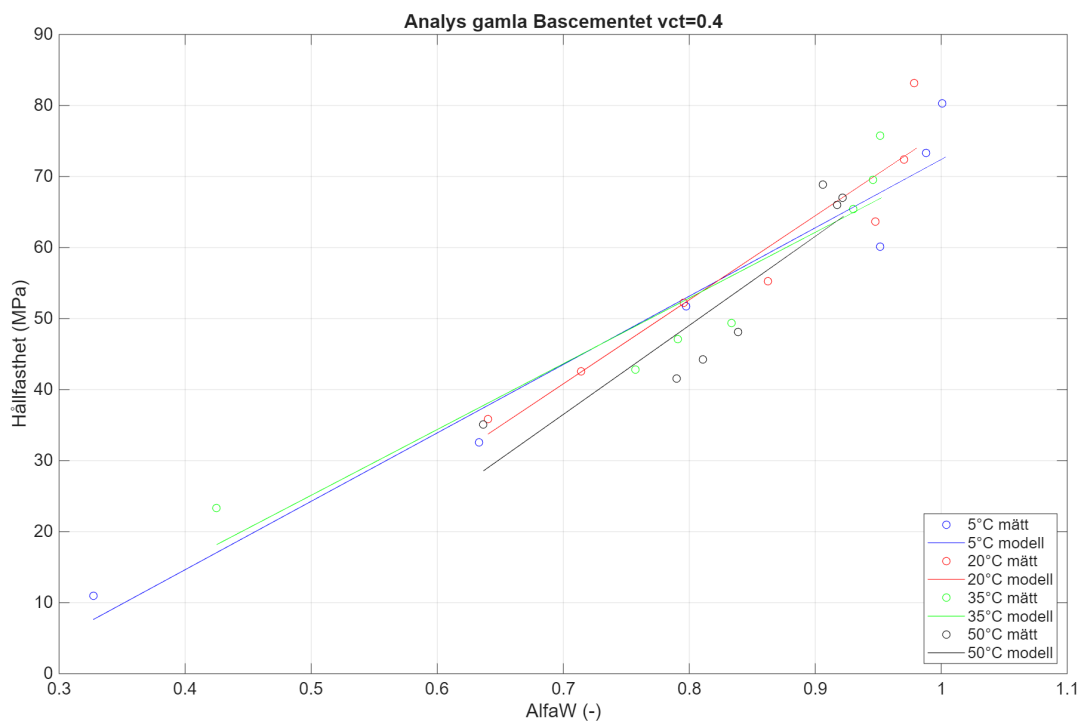
4.5 Hållfasthet – analys mot AlfaW



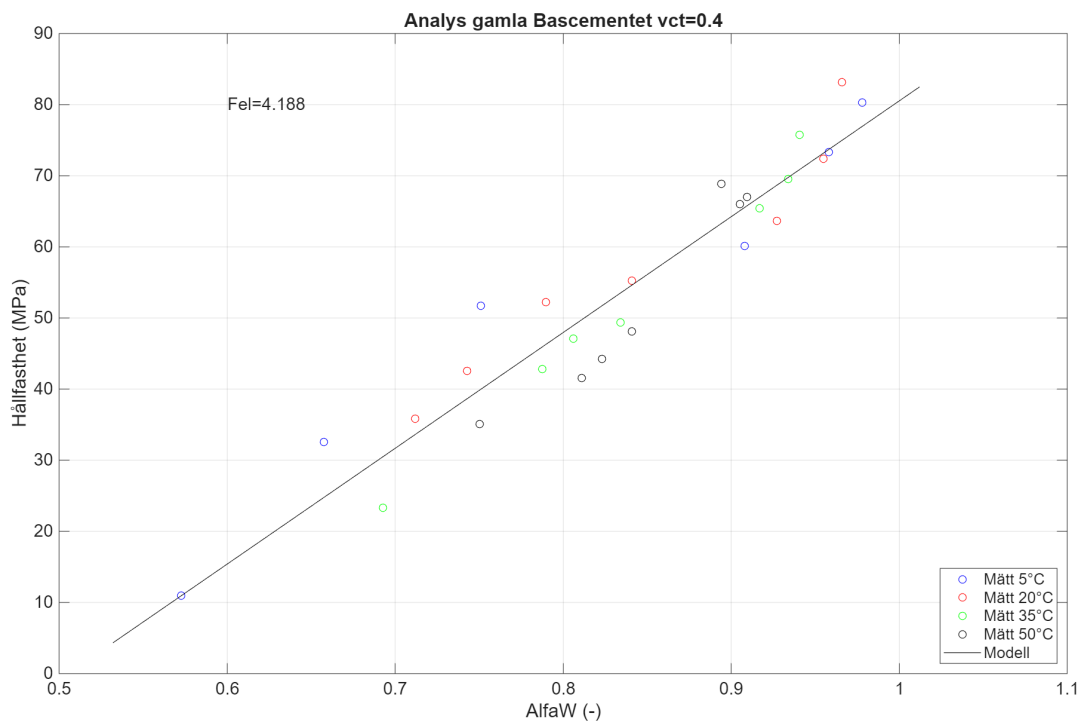
Figur 100. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



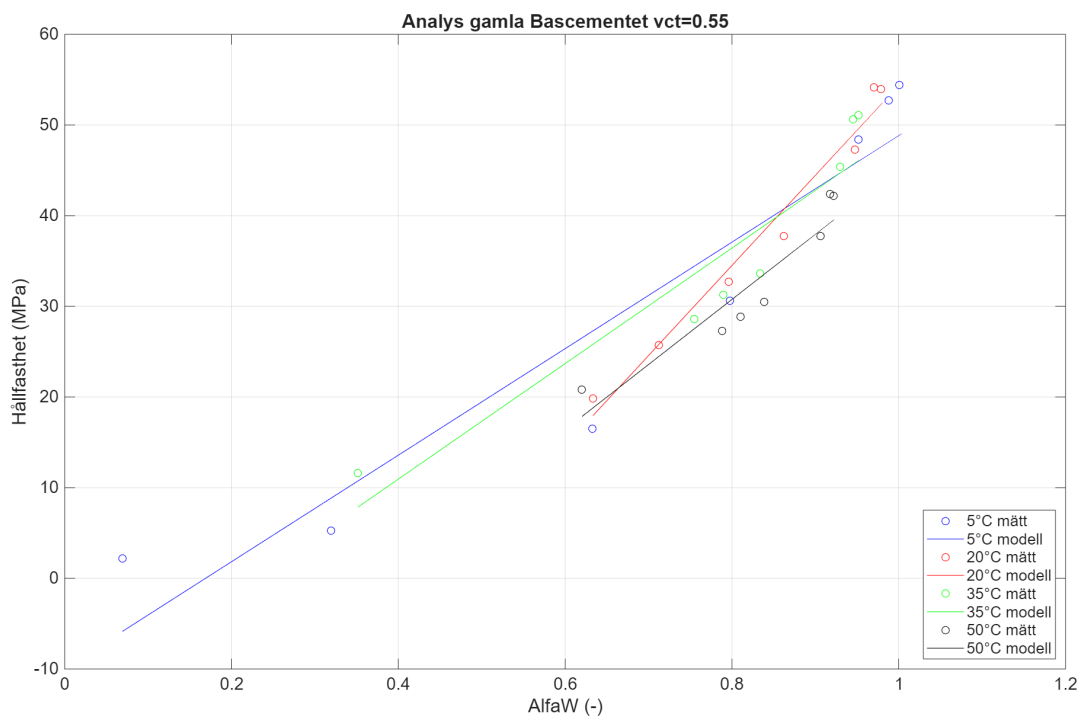
Figur 101. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer



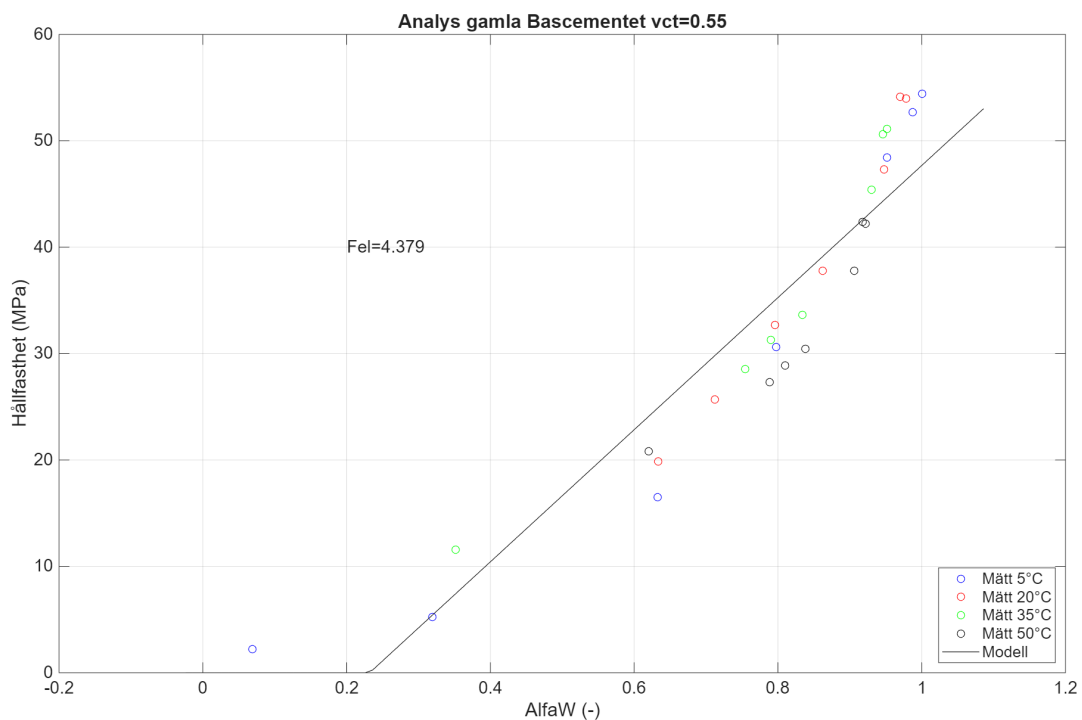
Figur 102. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



Figur 103. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer



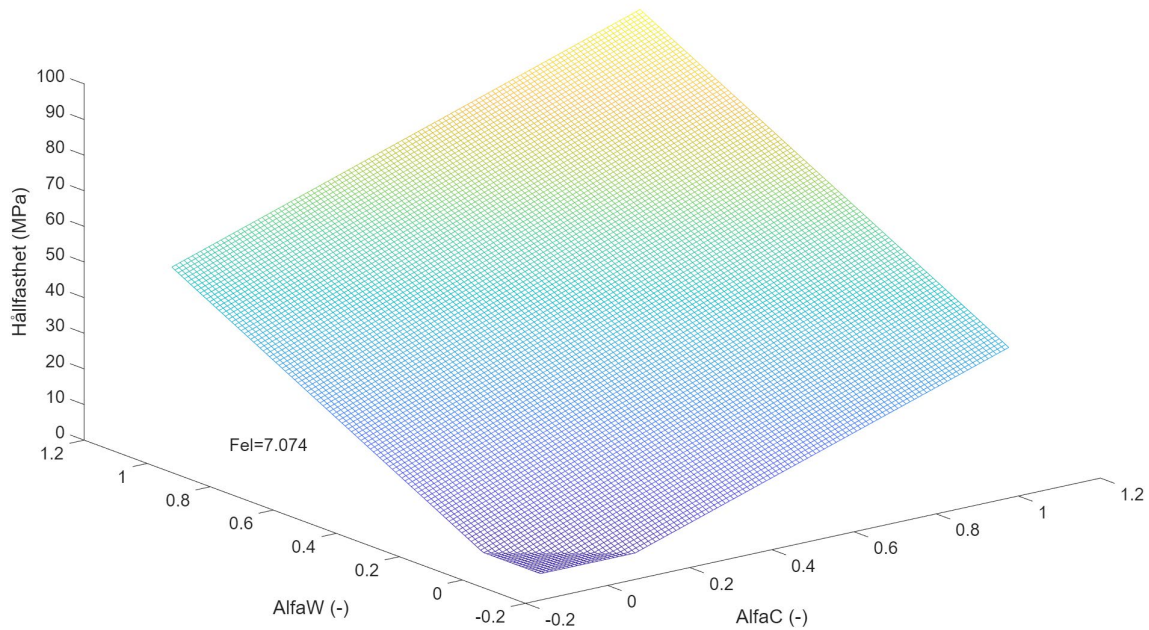
Figur 104. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där separata linjära samband anpassats för resp. temperatur



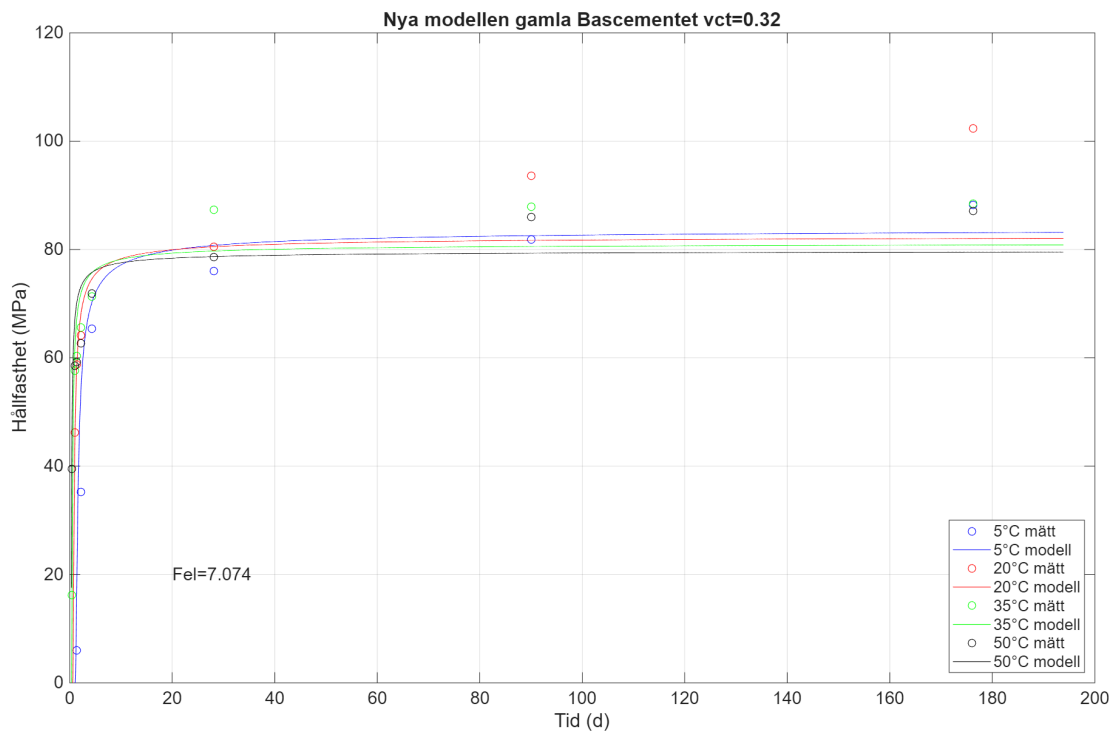
Figur 105. Analysanpassning med korrelation mellan tryckhållfasthet och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55, där ett linjärt samband anpassats för samtliga temperaturer

4.6 Hållfasthet – analys mot AlfaC och AlfaW

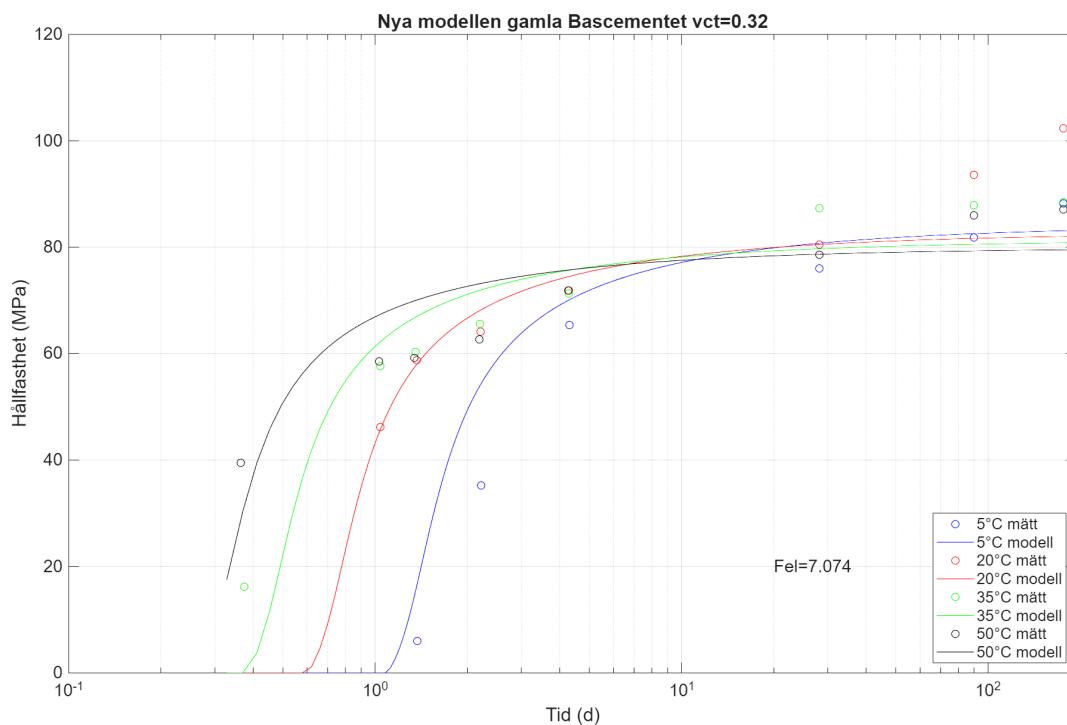
Nya modellen gamla Bascementet vct=0.32



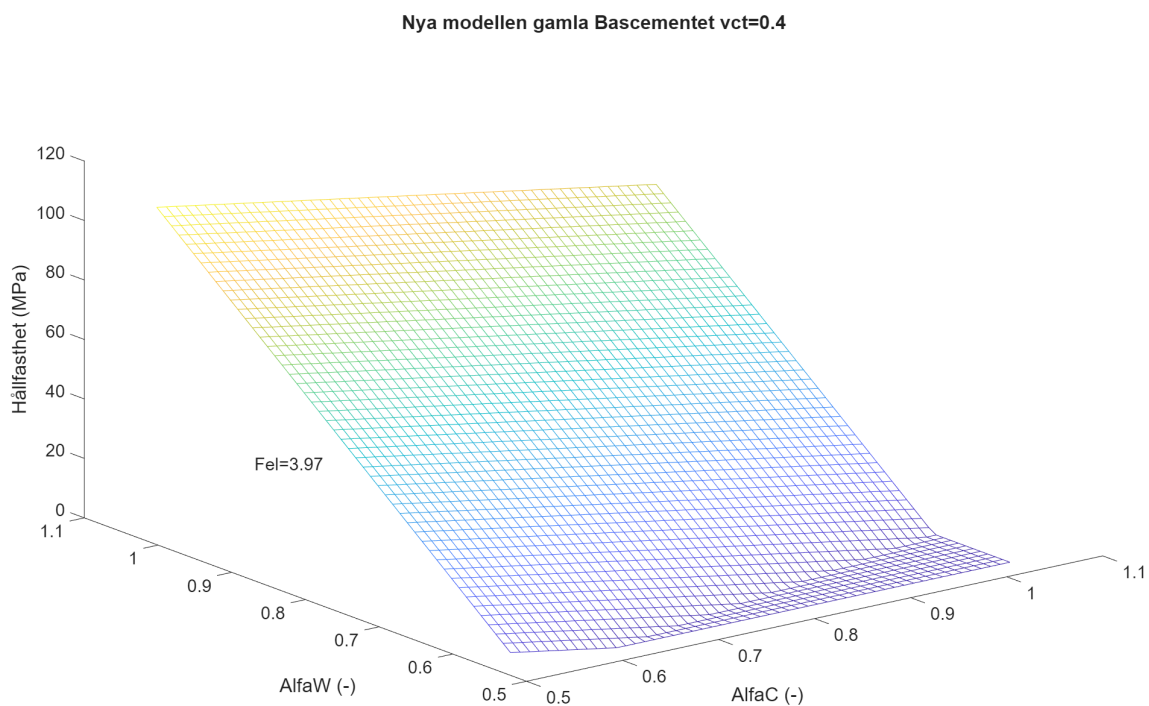
Figur 106. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,32



Figur 107. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme

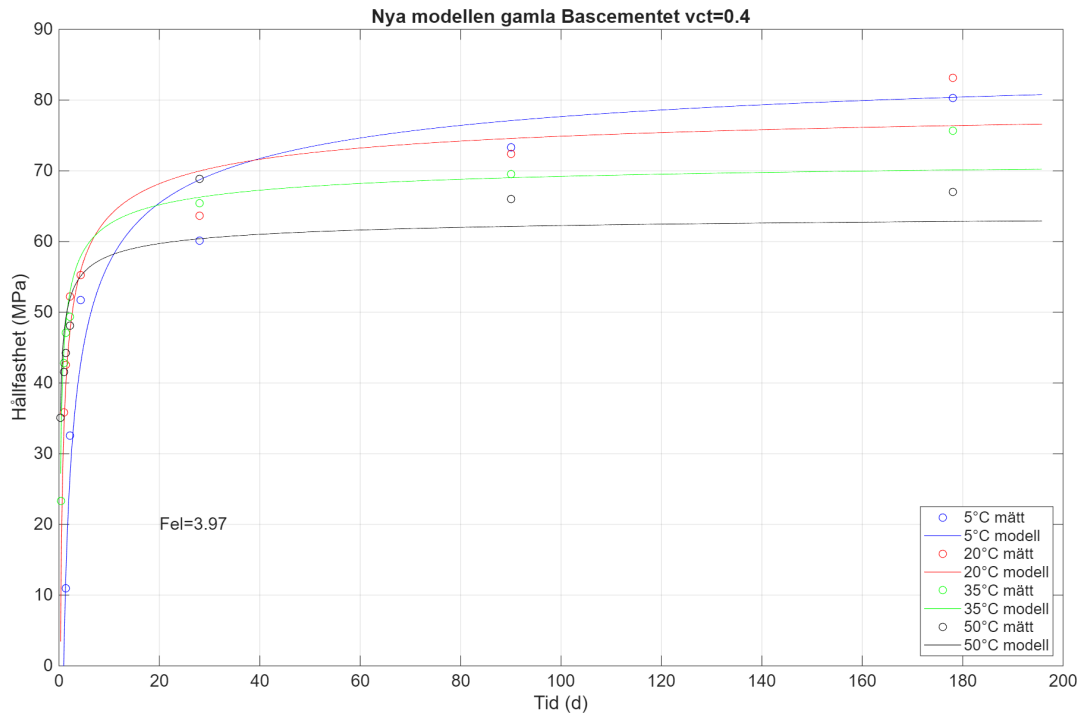


Figur 108. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme

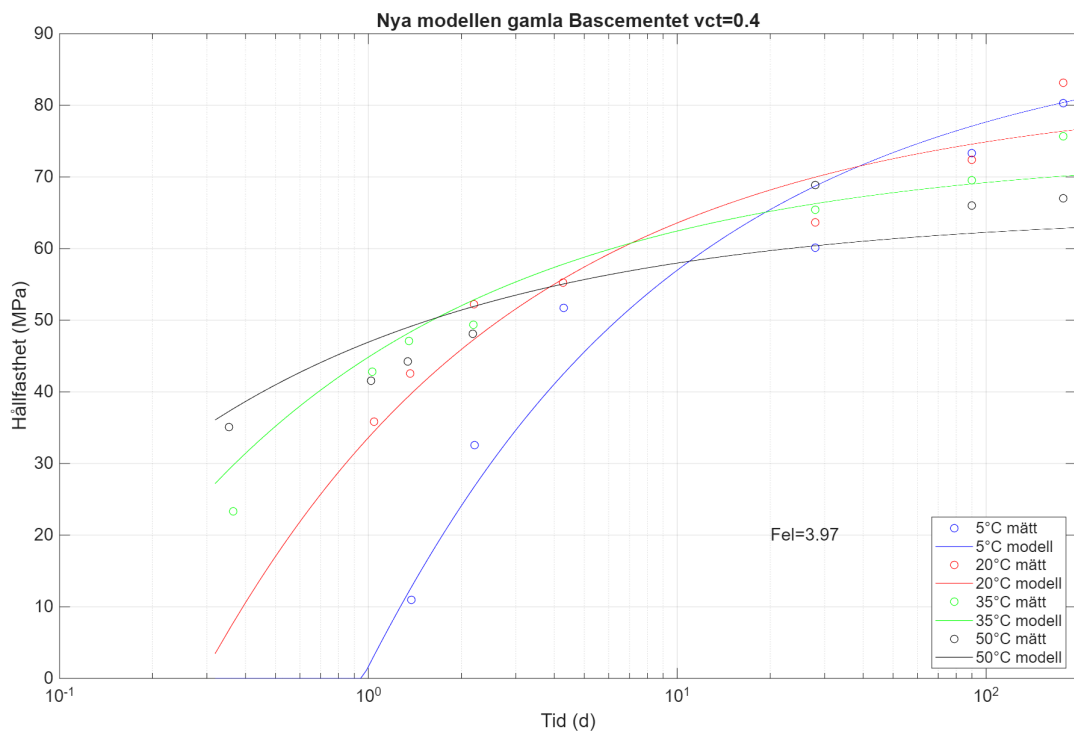


Figur 109. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,40

Slutrapport SBUF 14165 Bilaga 1

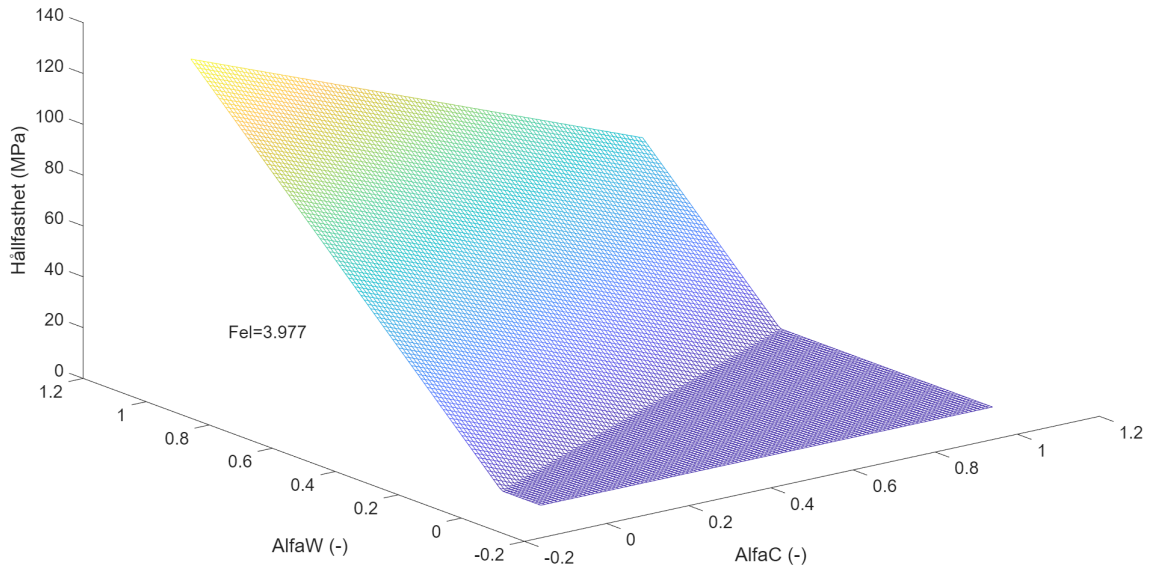


Figur 110. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme

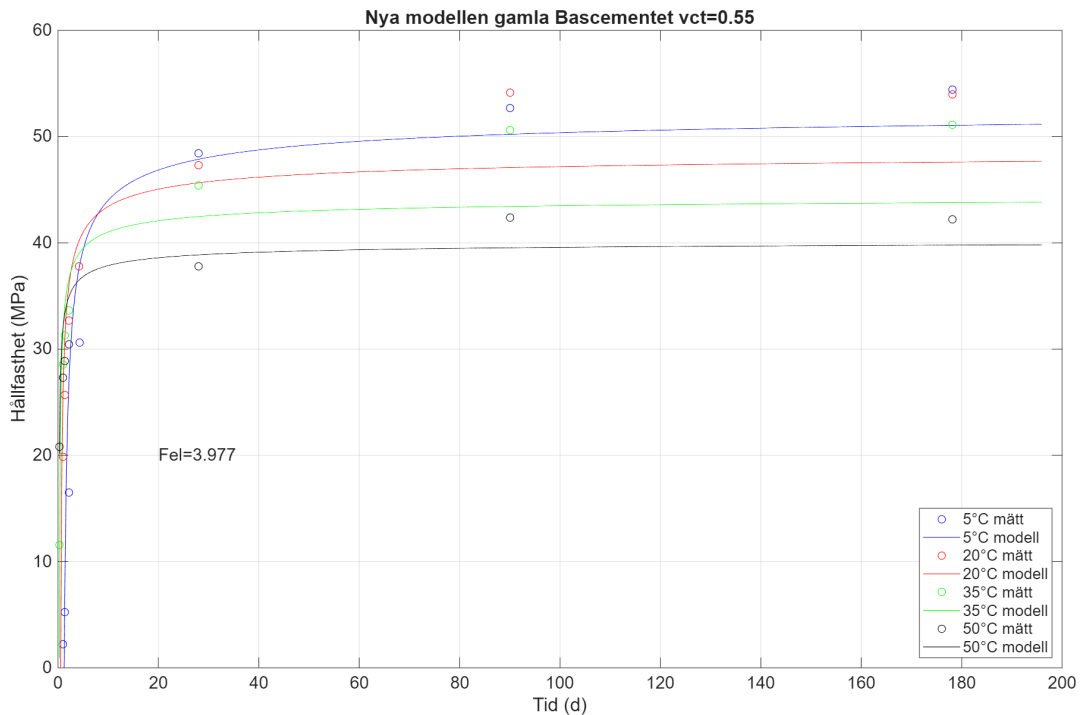


Figur 111. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme

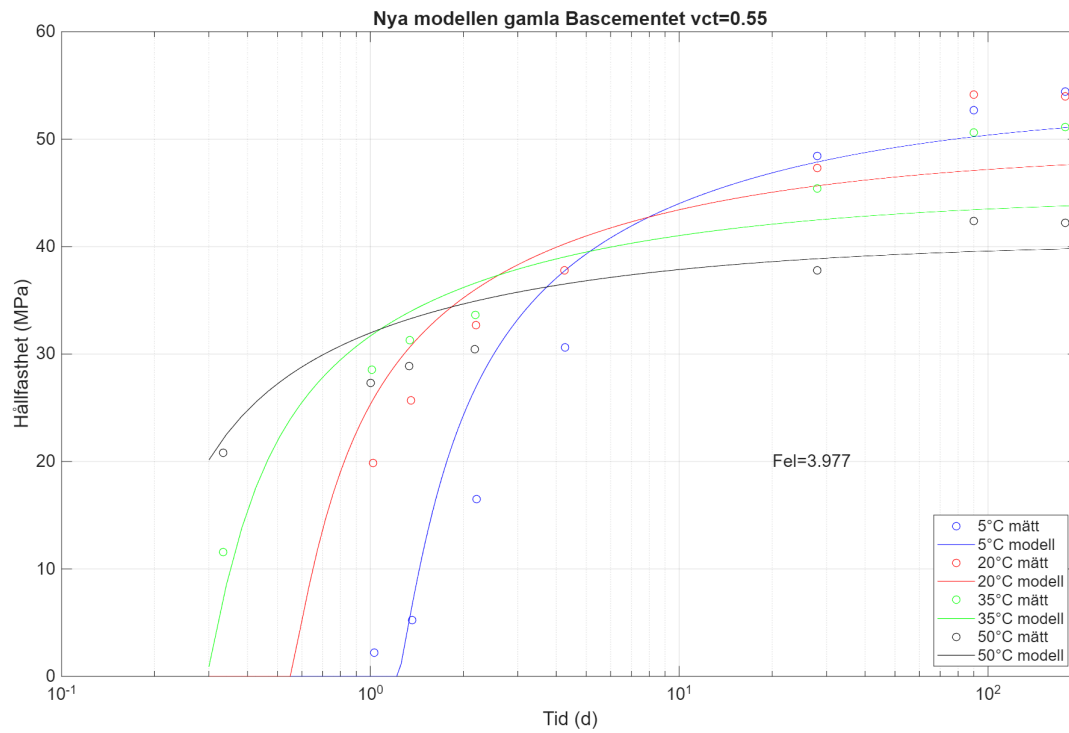
Nya modellen gamla Bascementet vct=0.55



Figur 112. Visualisering av den föreslagna modellen av tryckhållfasthet som linjär funktion av både bindemedelsrelaterad hydratationsgrad (AlfaC) och vattenrelaterad hydratationsgrad (AlfaW) från den nya modellen med två termer i ekvationen för värme, för det gamla Bascementet vct 0,55



Figur 113. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme



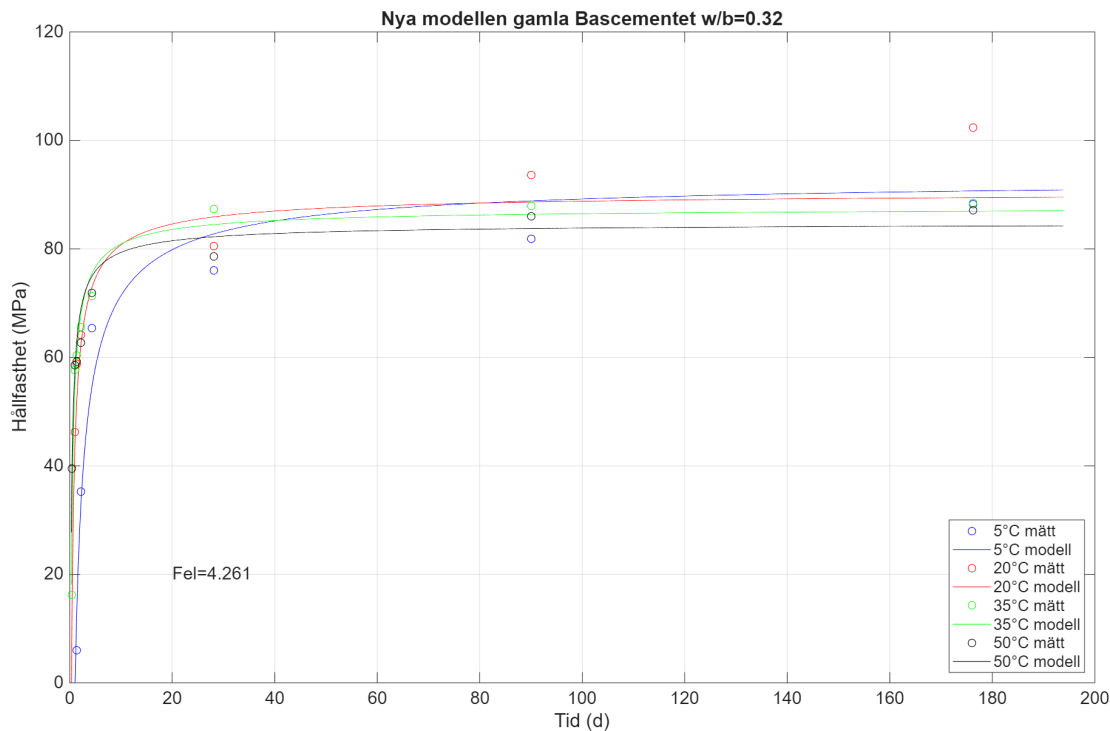
Figur 114. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet, hydratationsvärme och kemiskt bundet vatten med två termer i ekvationen för värme

5 Nya modellen - värme och hållfasthet, samtidig anpassning, en term för värme

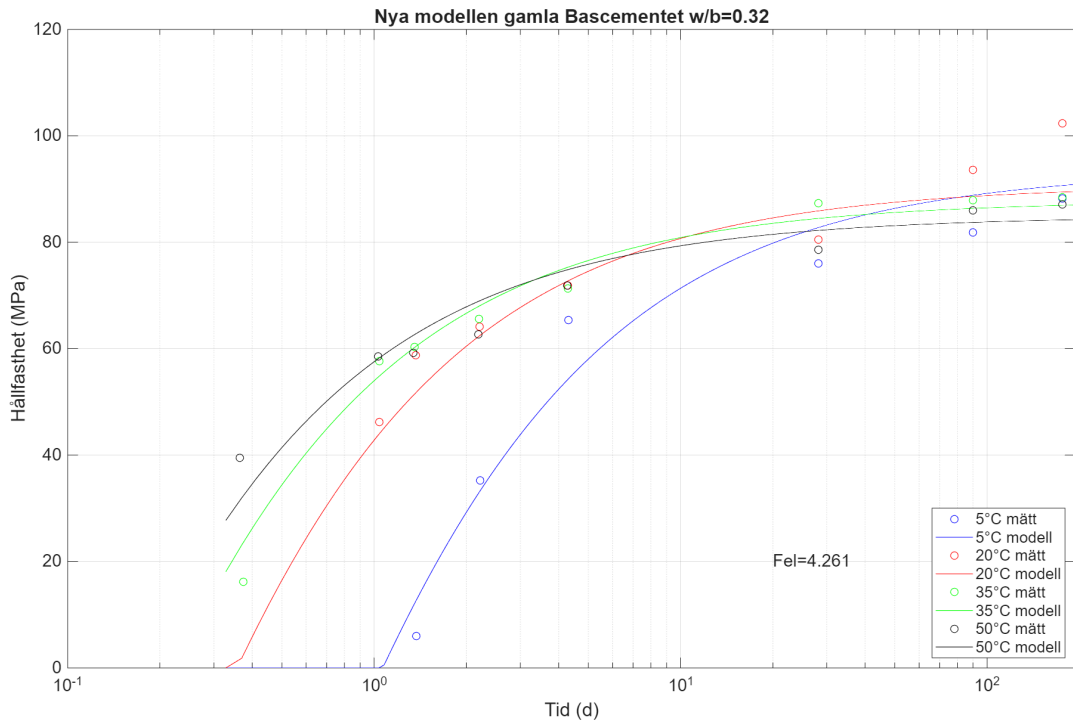
Anpassningsförfarandet är enligt:

- Initial anpassning av hållfasthet och hydratationsgrad till mätdata för Hållfasthet.
- Initial anpassning av hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hydratationsvärme. Parametrar för hydratationsgrad från hållfasthet används som startvärden.
- Justeringsanpassning av hållfasthet, hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hållfasthet och hydratationsvärme. Parametrar från tidigare anpassningar används som startvärden.

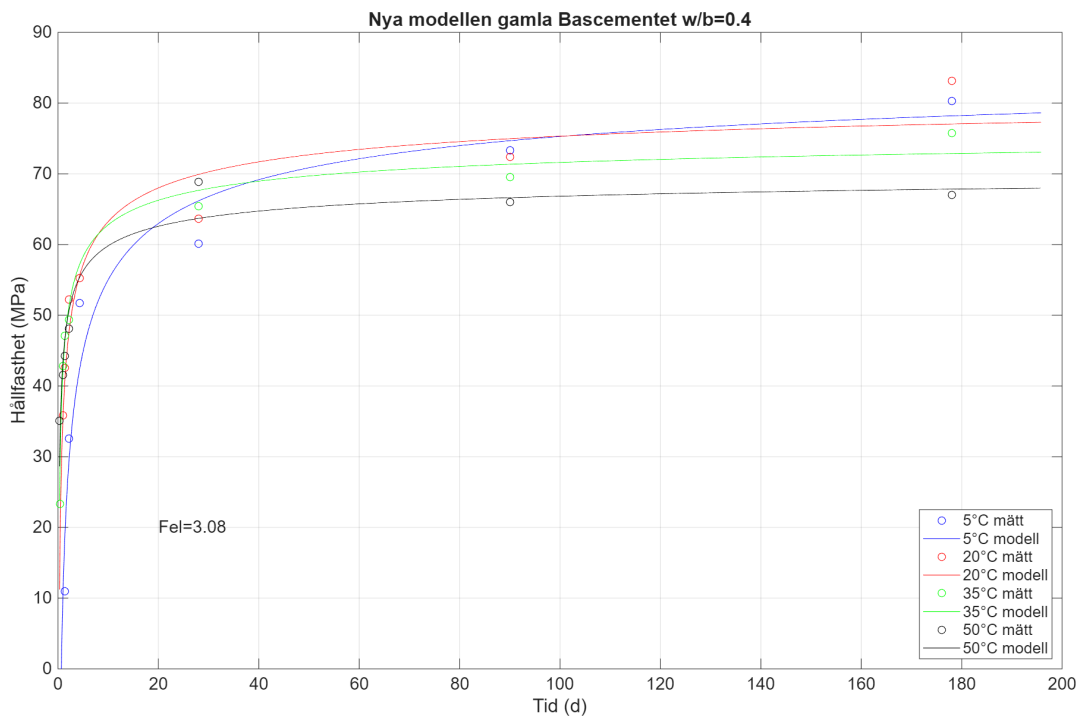
5.1 Initial hållfasthet



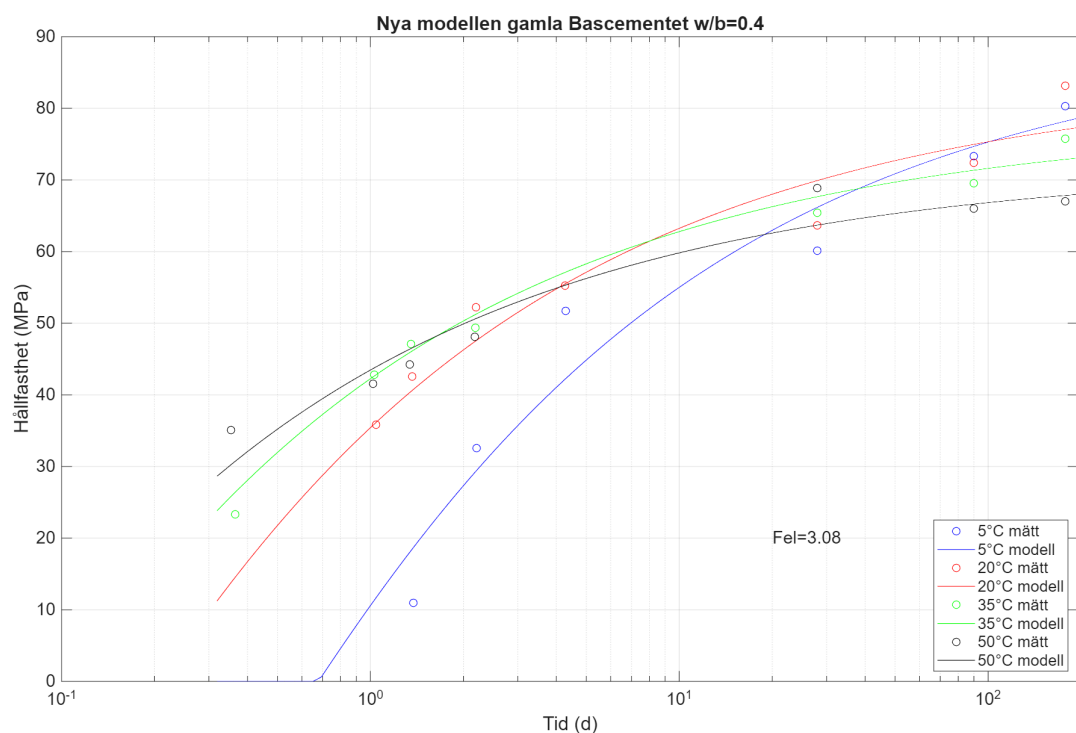
Figur 115. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet



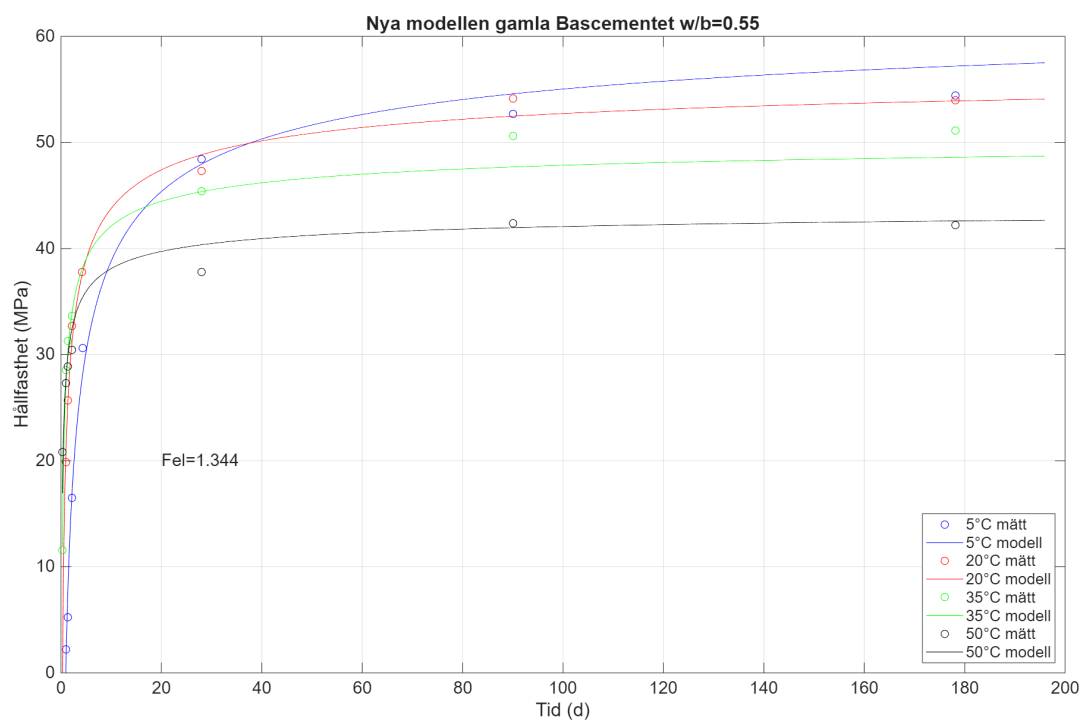
Figur 116. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet



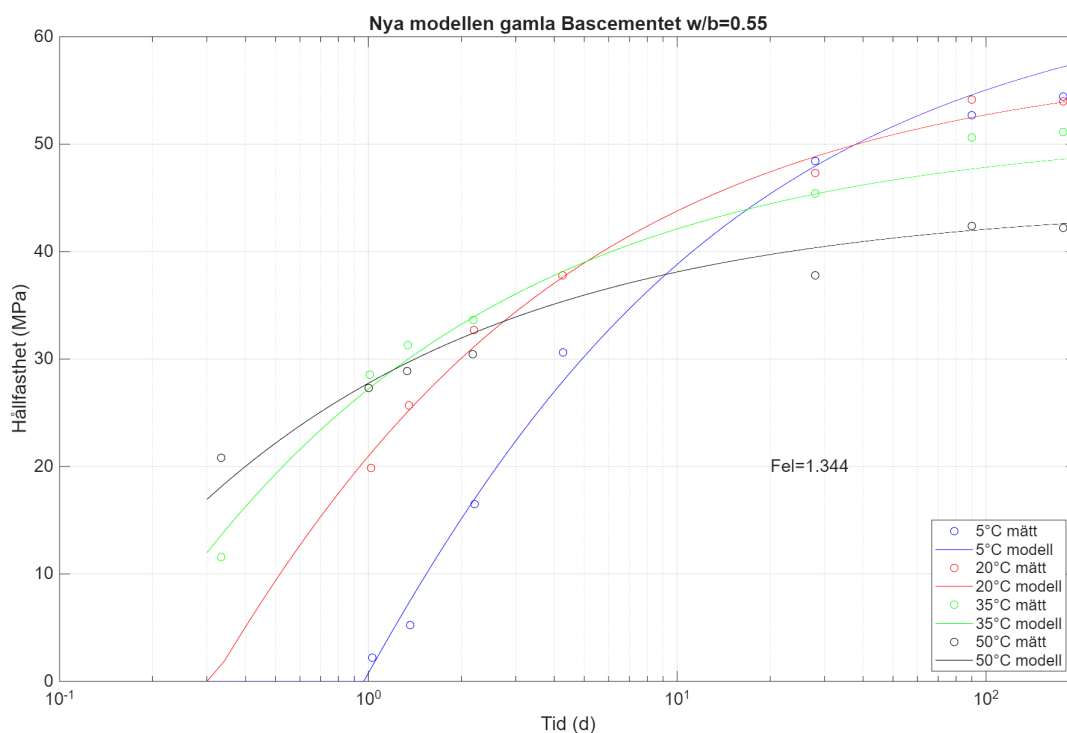
Figur 117. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet



Figur 118. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet

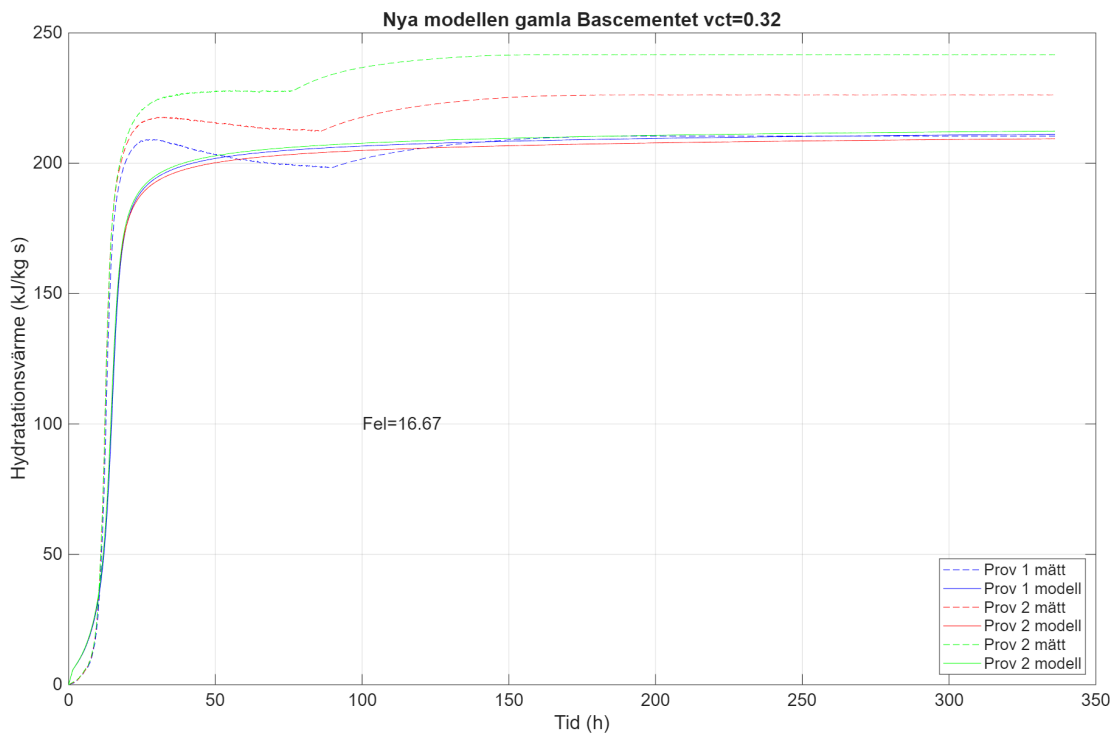


Figur 119. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet

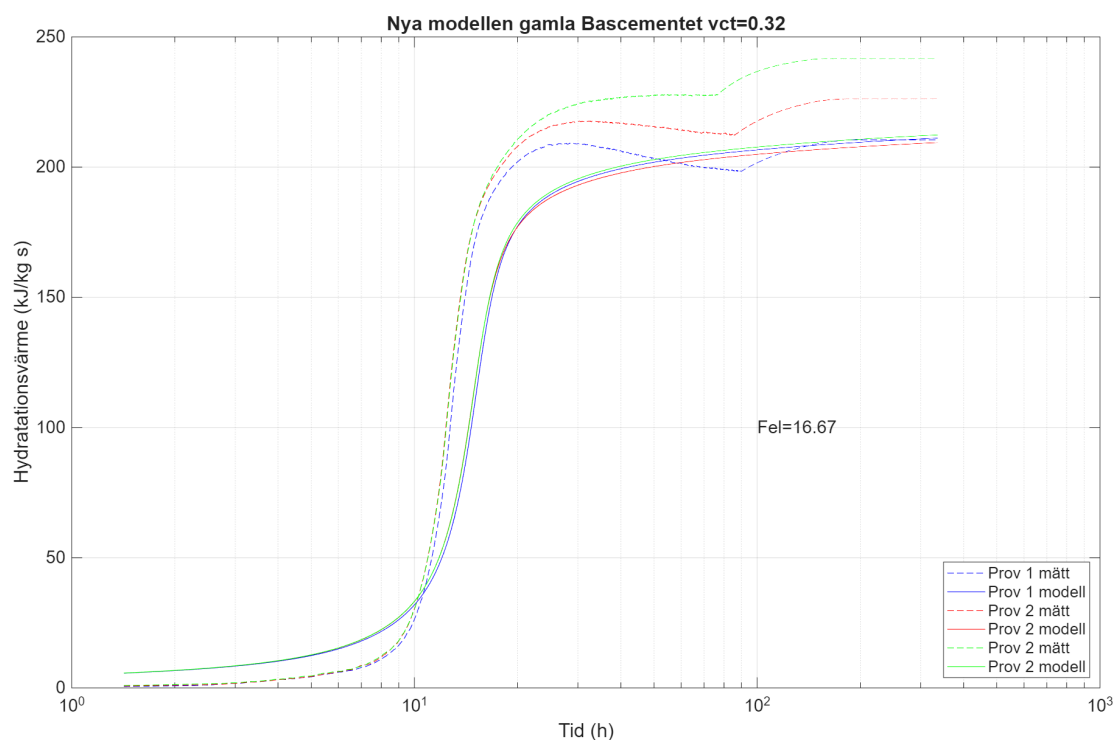


Figur 120. Anpassning för tryckhållfasthet för det gamla Basementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för endast tryckhållfasthet

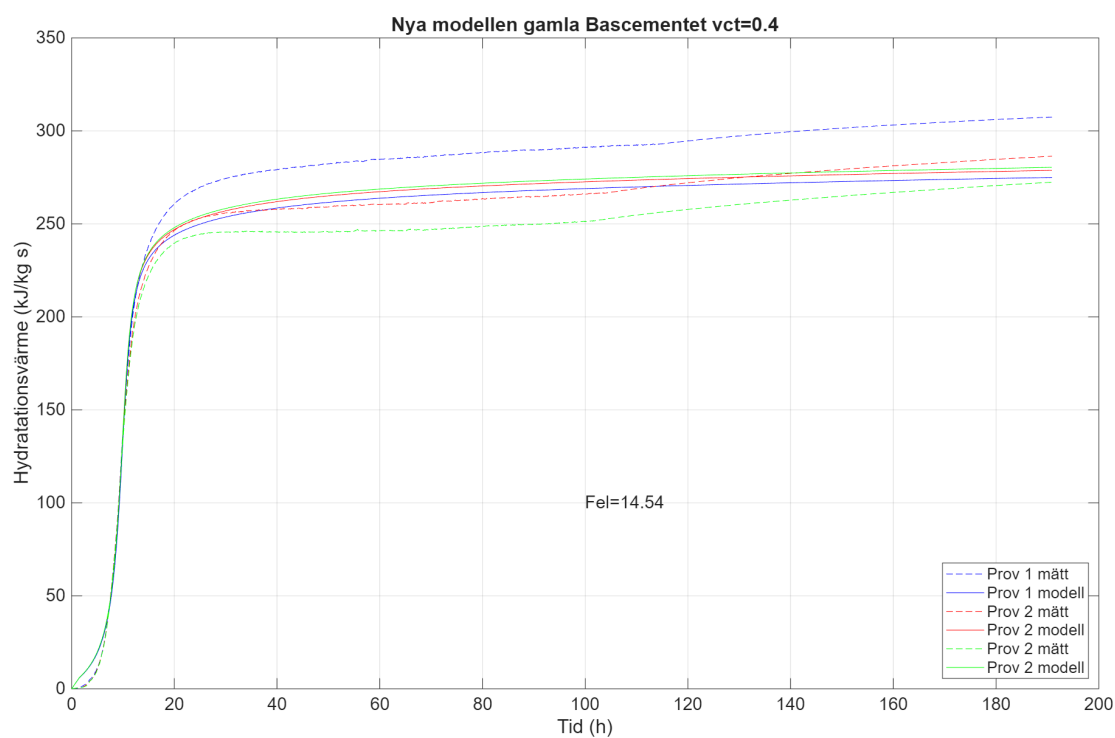
5.2 Initial värme



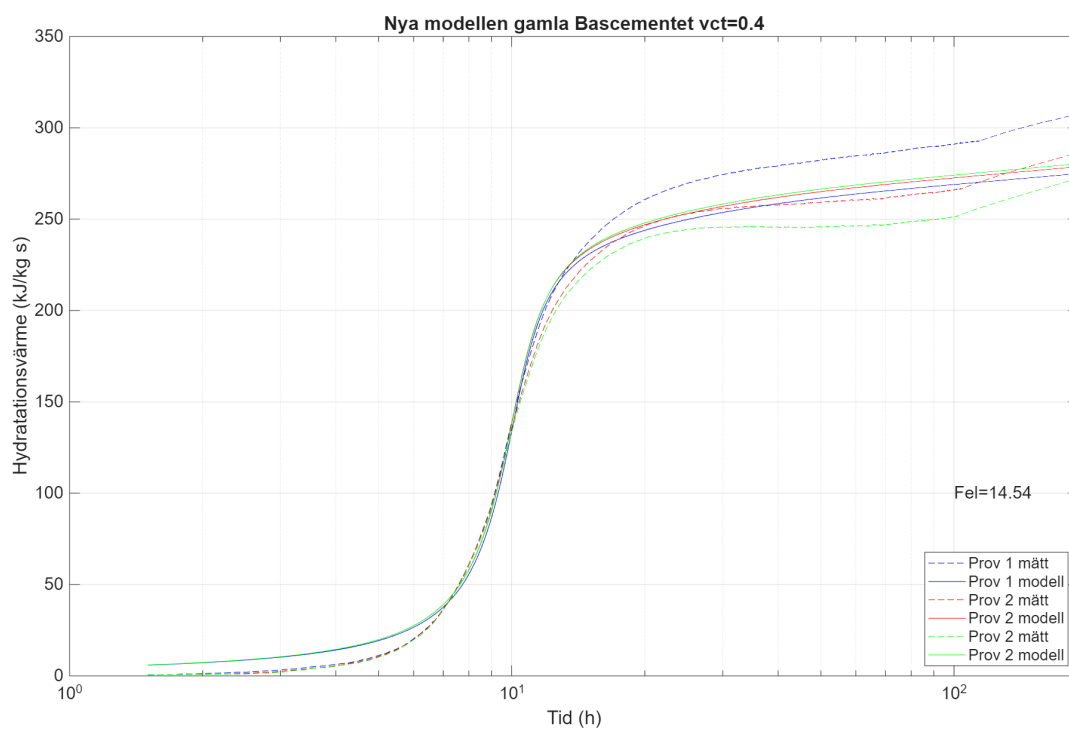
Figur 121. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Basementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



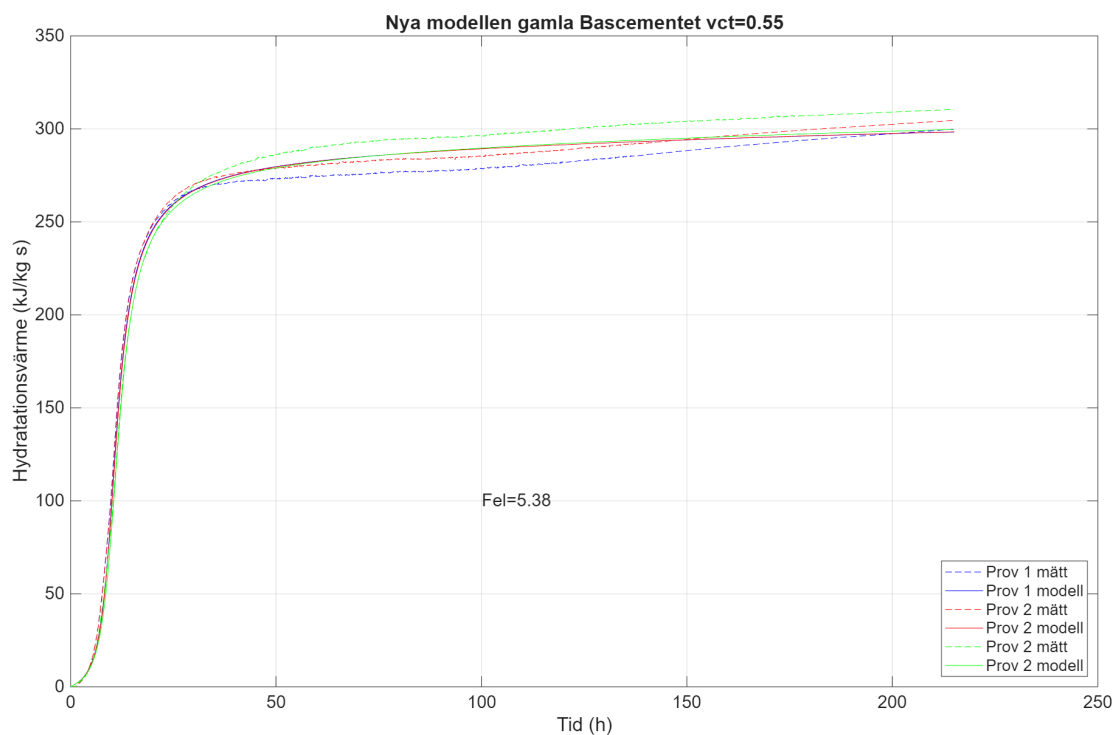
Figur 122. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



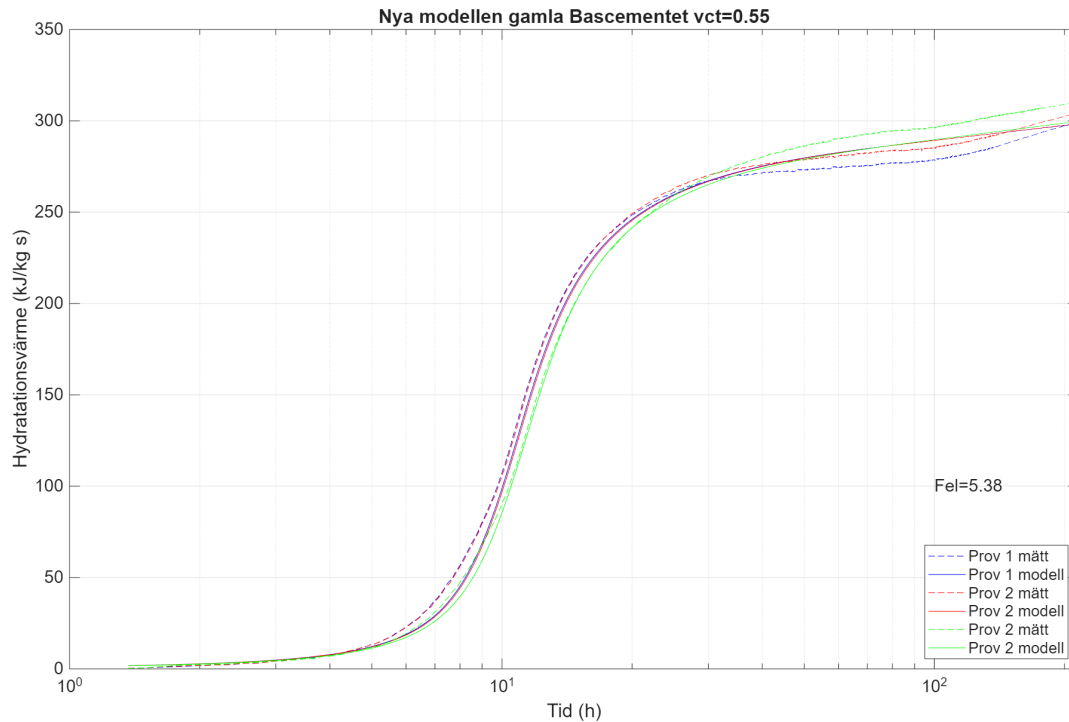
Figur 123. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



Figur 124. Initial anpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydrationsvärme med en term i ekvationen för värme

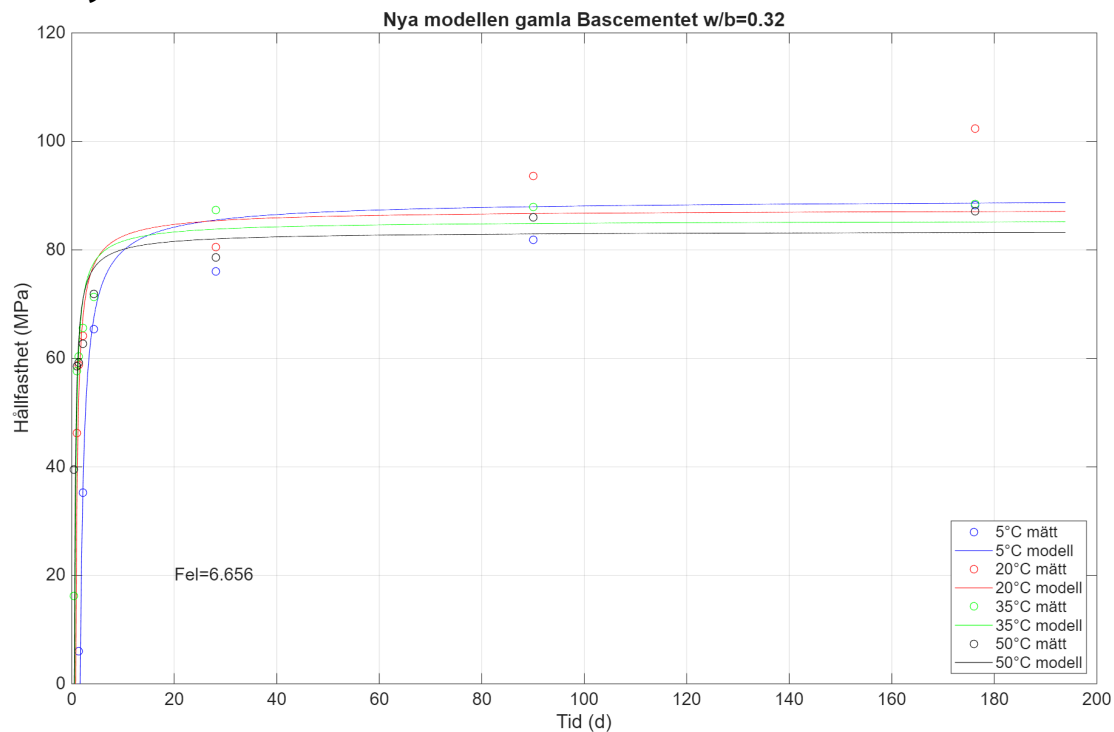


Figur 125. Initial anpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydrationsvärme med en term i ekvationen för värme

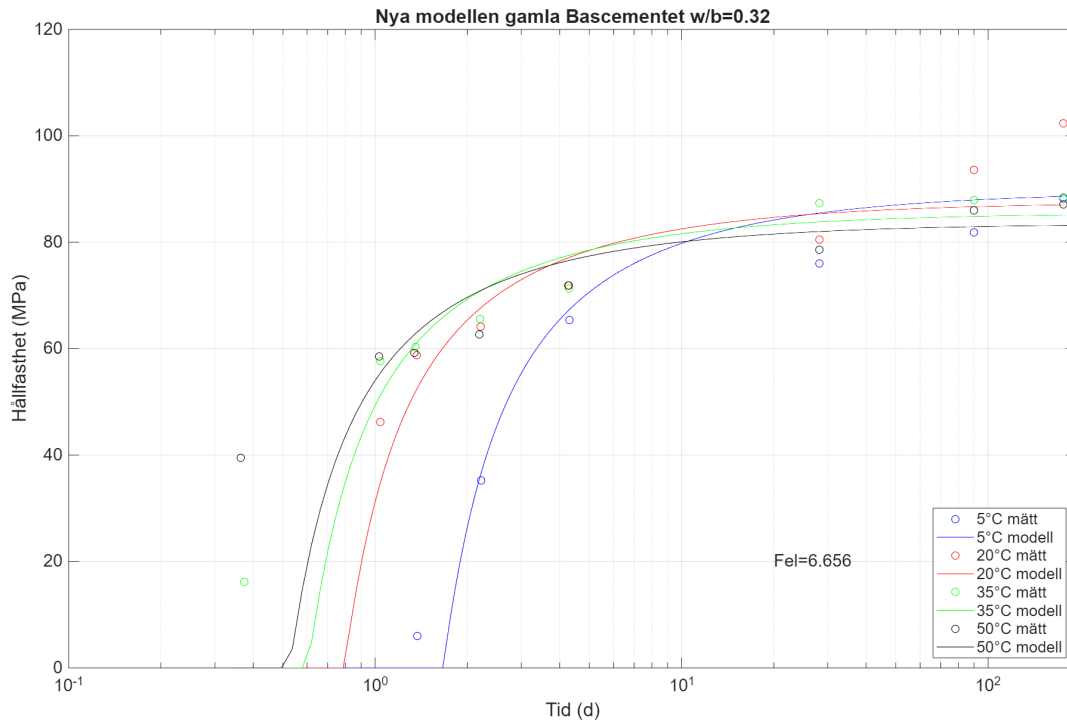


Figur 126. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme

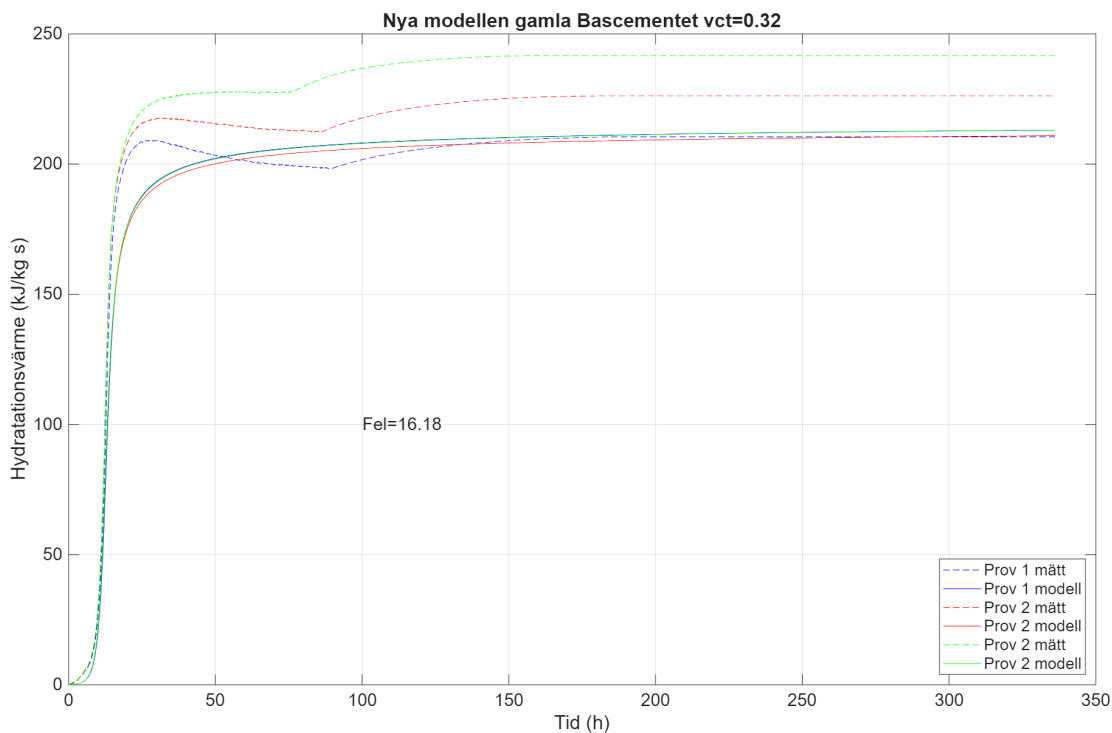
5.3 Justerad hållfasthet och värme



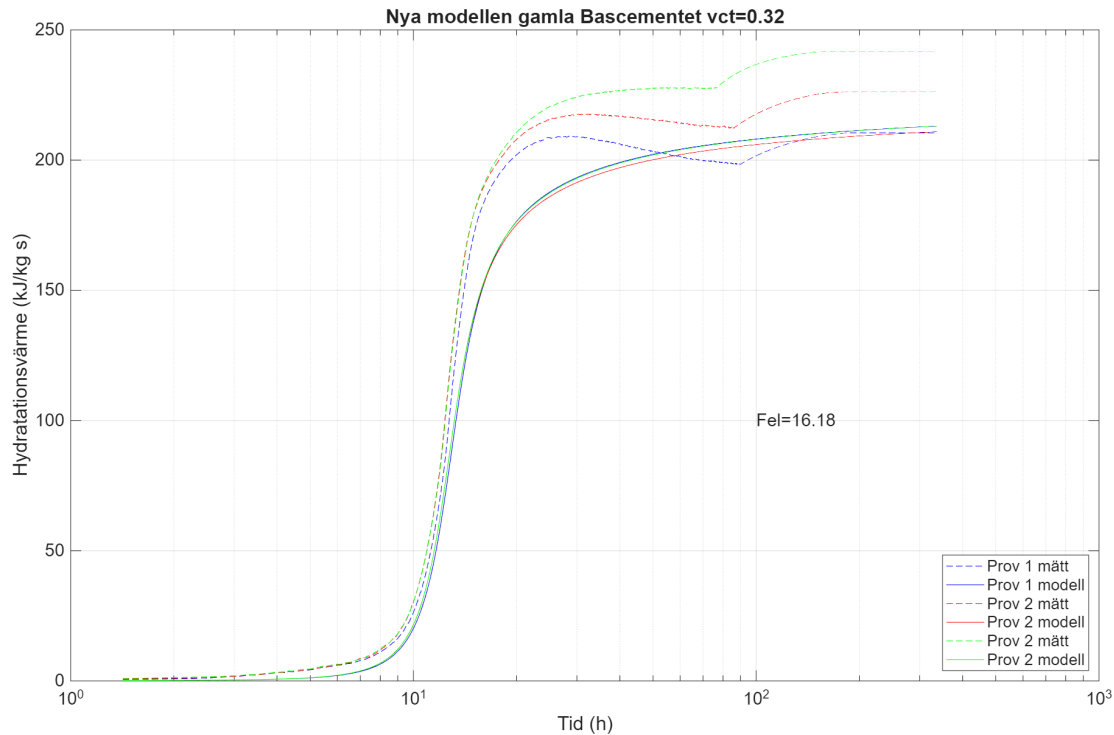
Figur 127. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



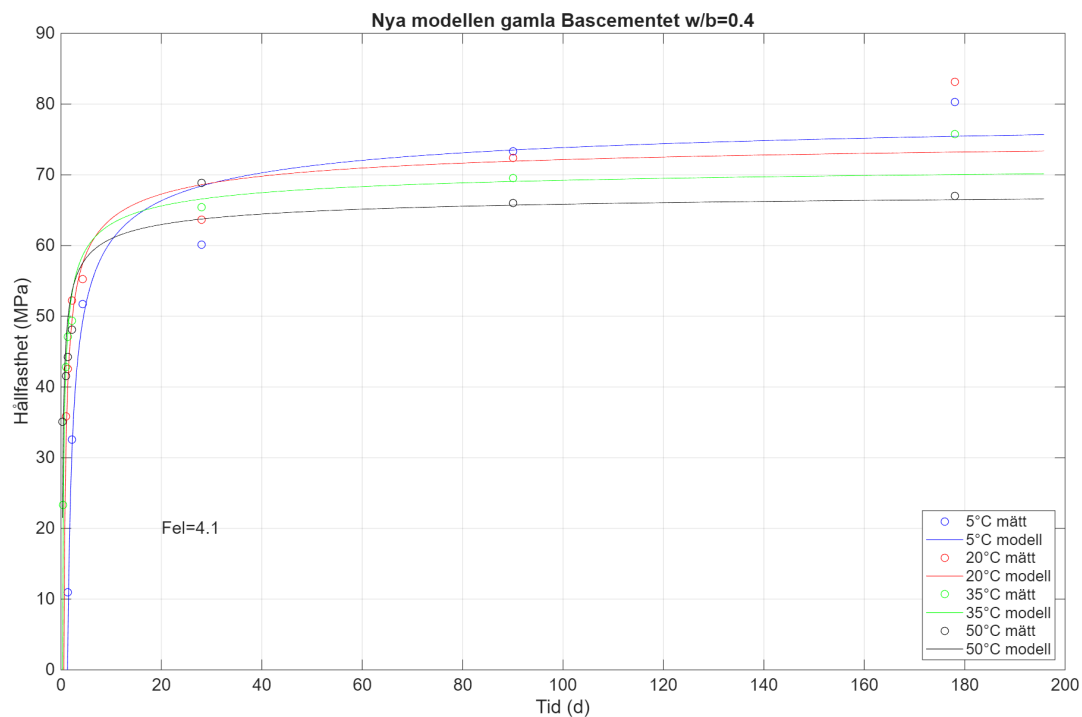
Figur 128. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



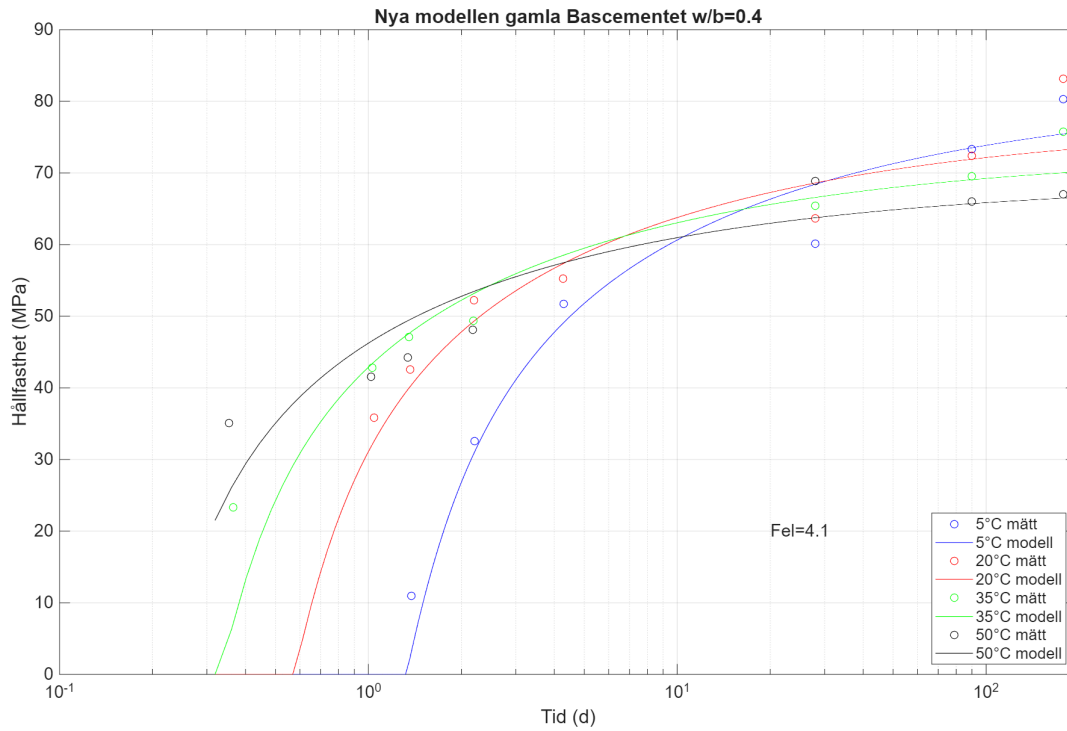
Figur 129. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



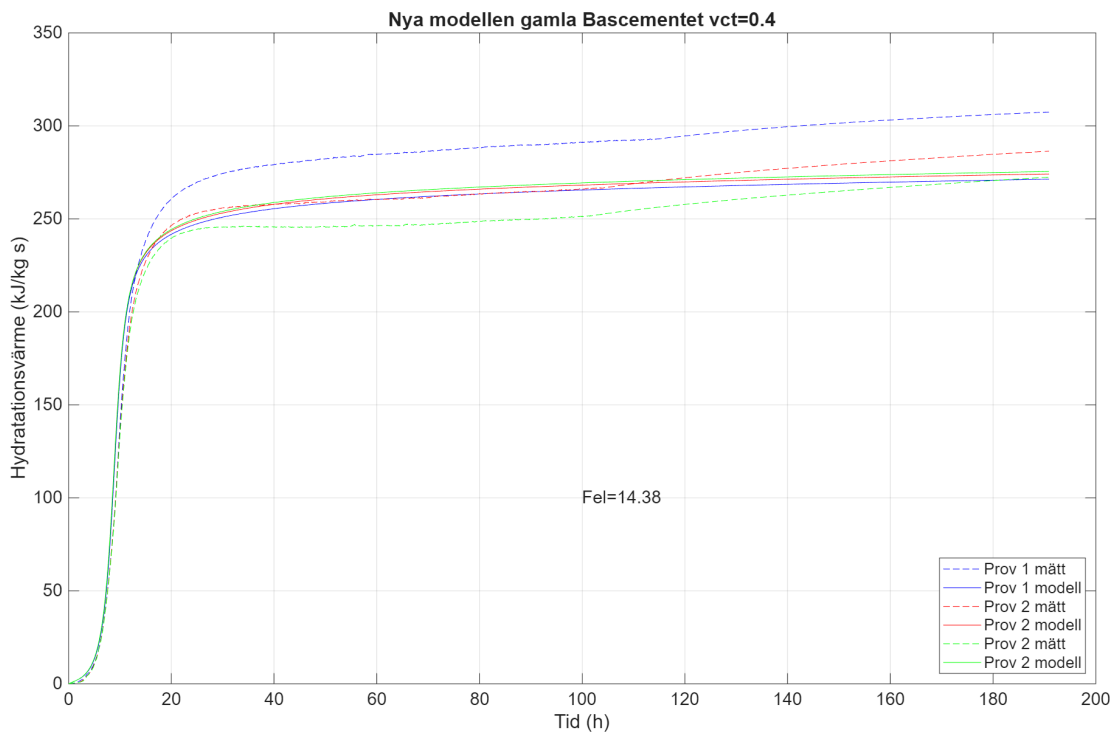
Figur 130. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



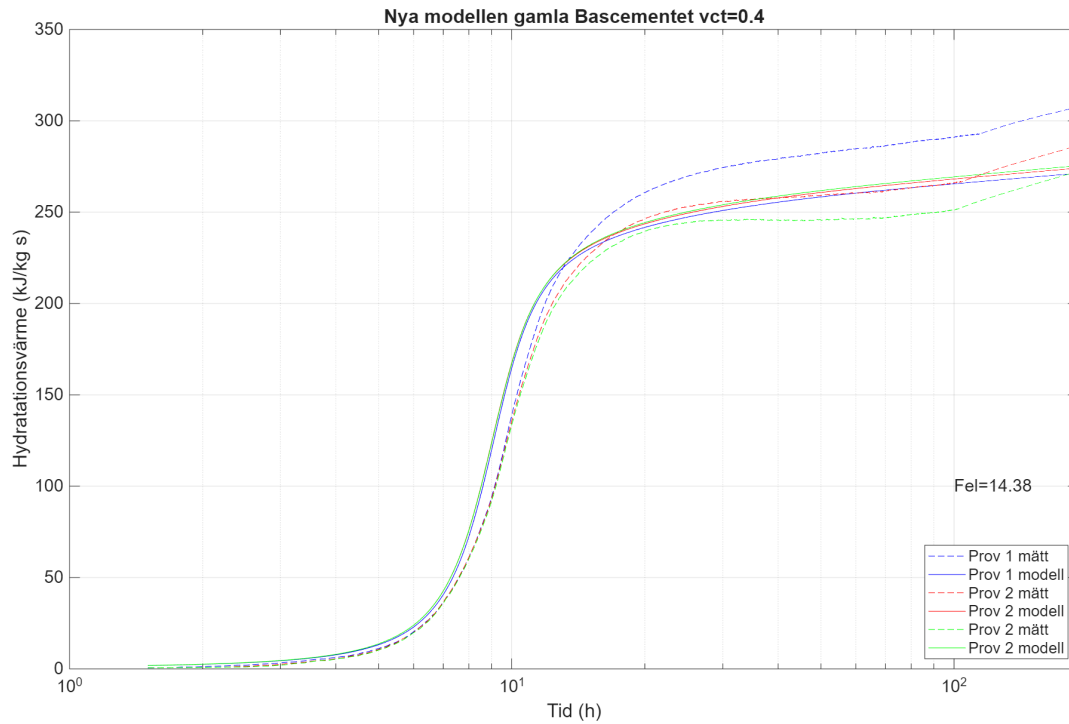
Figur 131. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



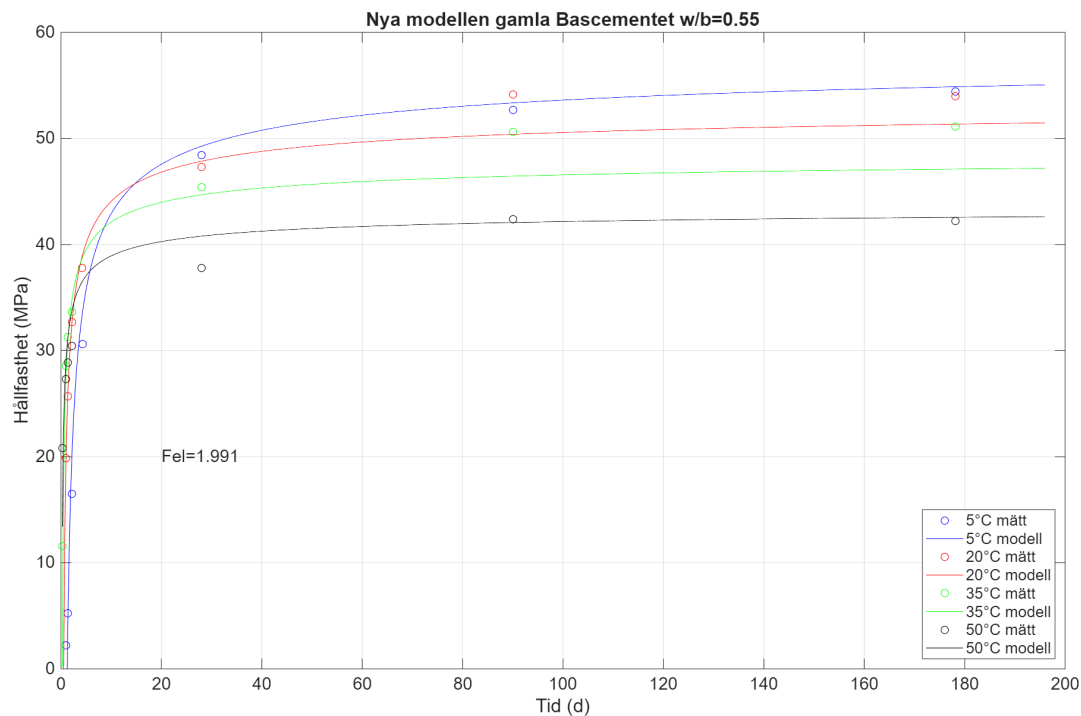
Figur 132. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



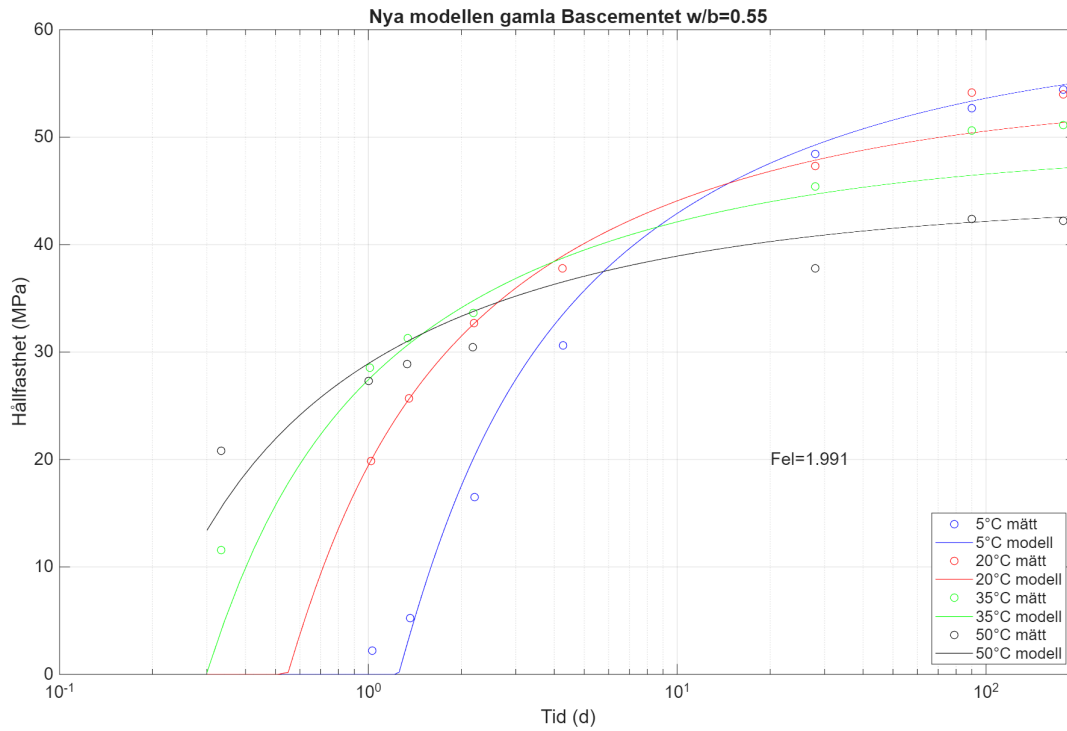
Figur 133. . Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



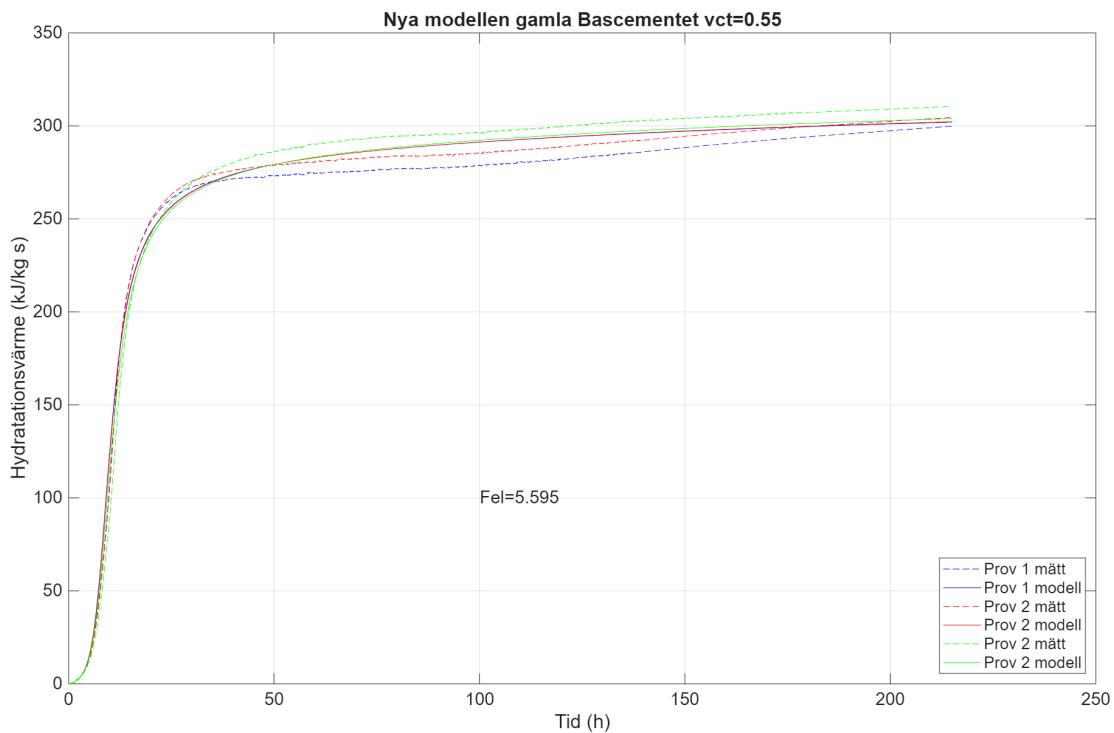
Figur 134. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



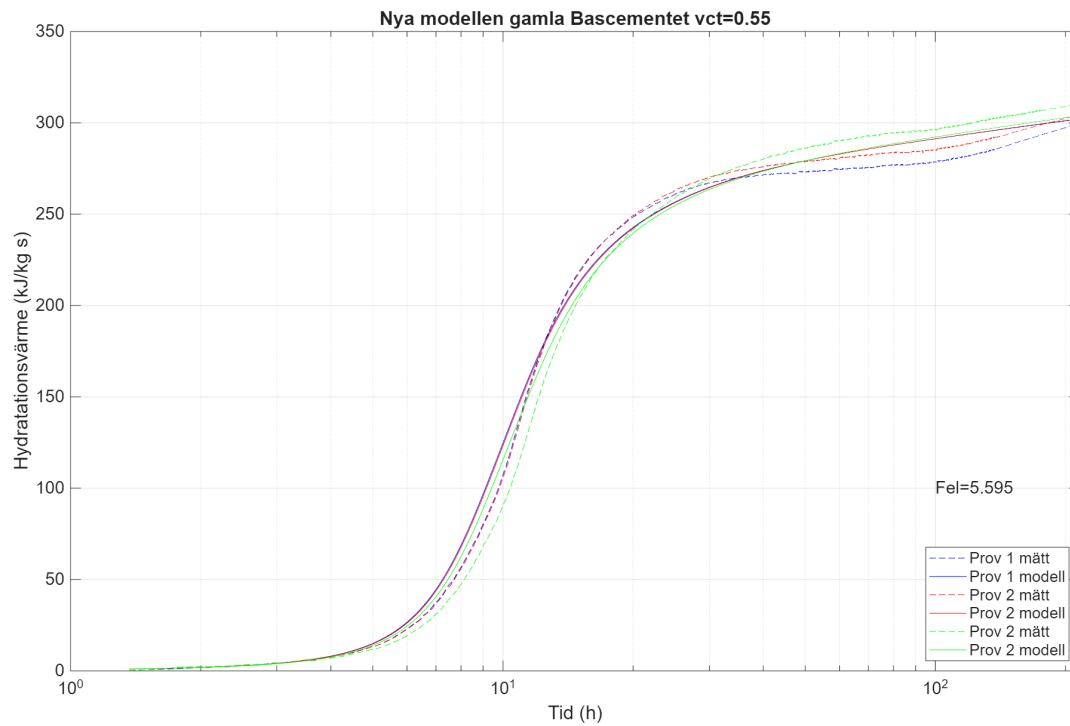
Figur 135. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



Figur 136. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



Figur 137. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där Anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med en term i ekvationen för värme



Figur 138. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydrationsvärme med en term i ekvationen för värme

6 Nya modellen - värme och hållfasthet, samtidig anpassning, två termer för värme

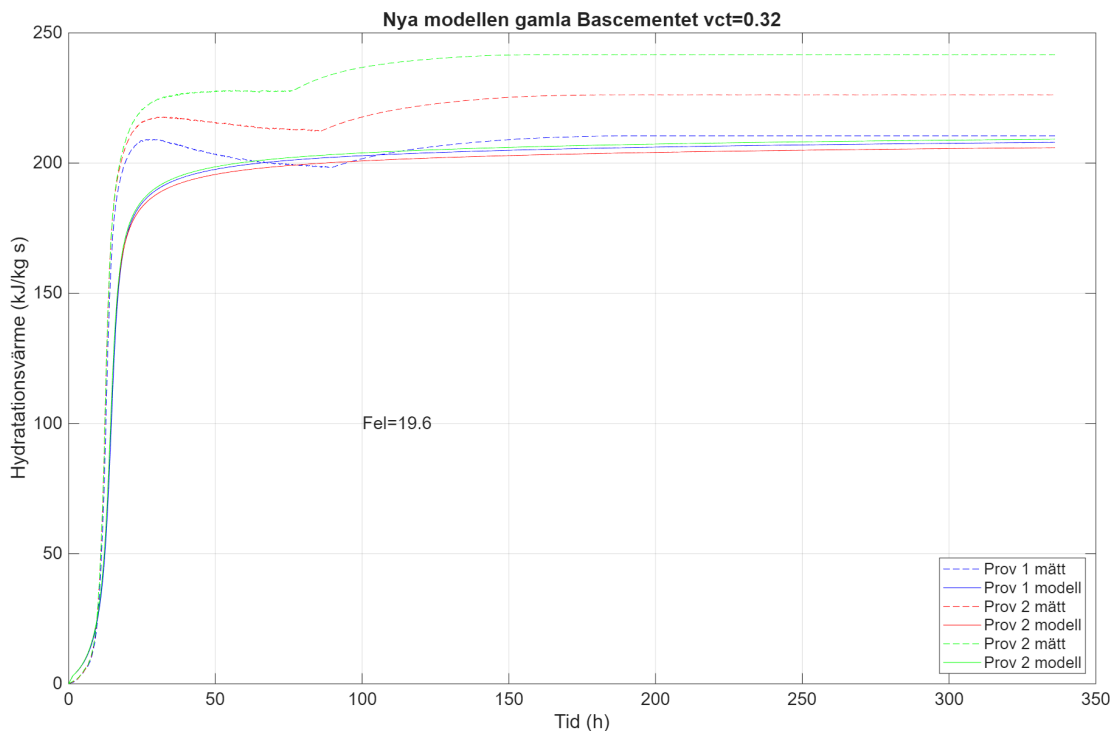
Anpassningsförfarandet är enligt:

- Initial anpassning av hållfasthet och hydratationsgrad till mätdata för Hållfasthet.
- Initial anpassning av hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hydratationsvärme. Parametrar för hydratationsgrad från hållfasthet används som startvärden.
- Justeringsanpassning av hållfasthet, hydratationsvärme och hydratationsgrad till mätdata för hållfasthet och hydratationsvärme. Parametrar från tidigare anpassningar används som startvärden.

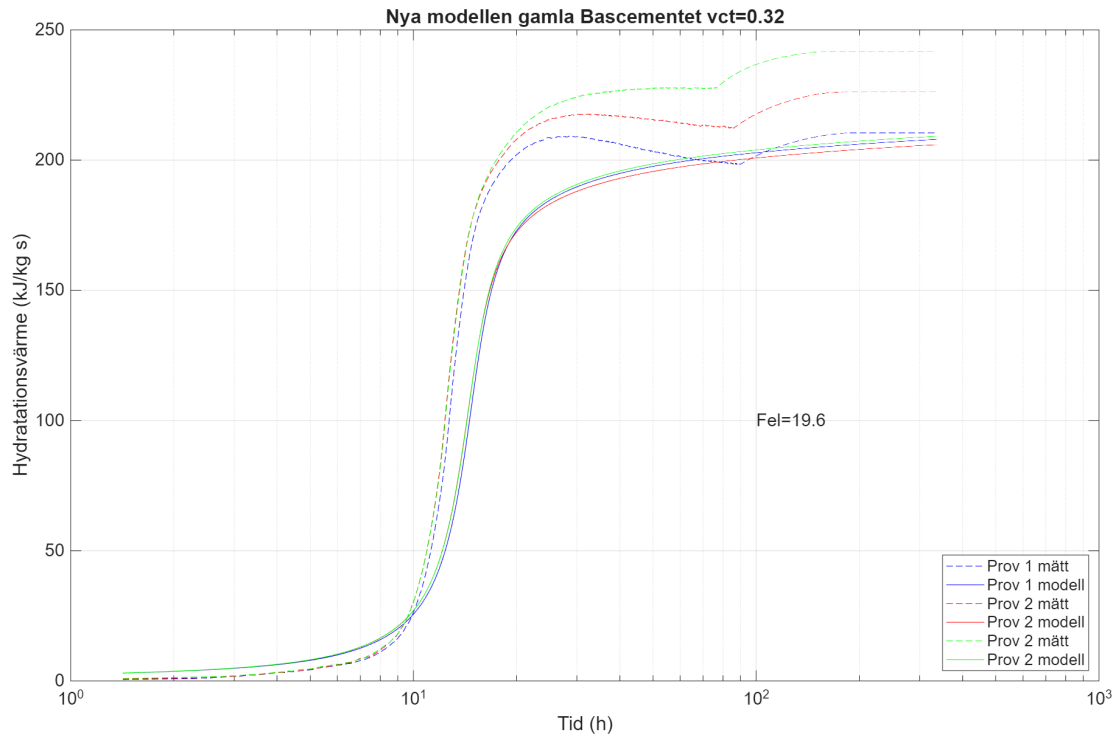
6.1 Initial hållfasthet

Samma som för en term för värme, se 8.1.

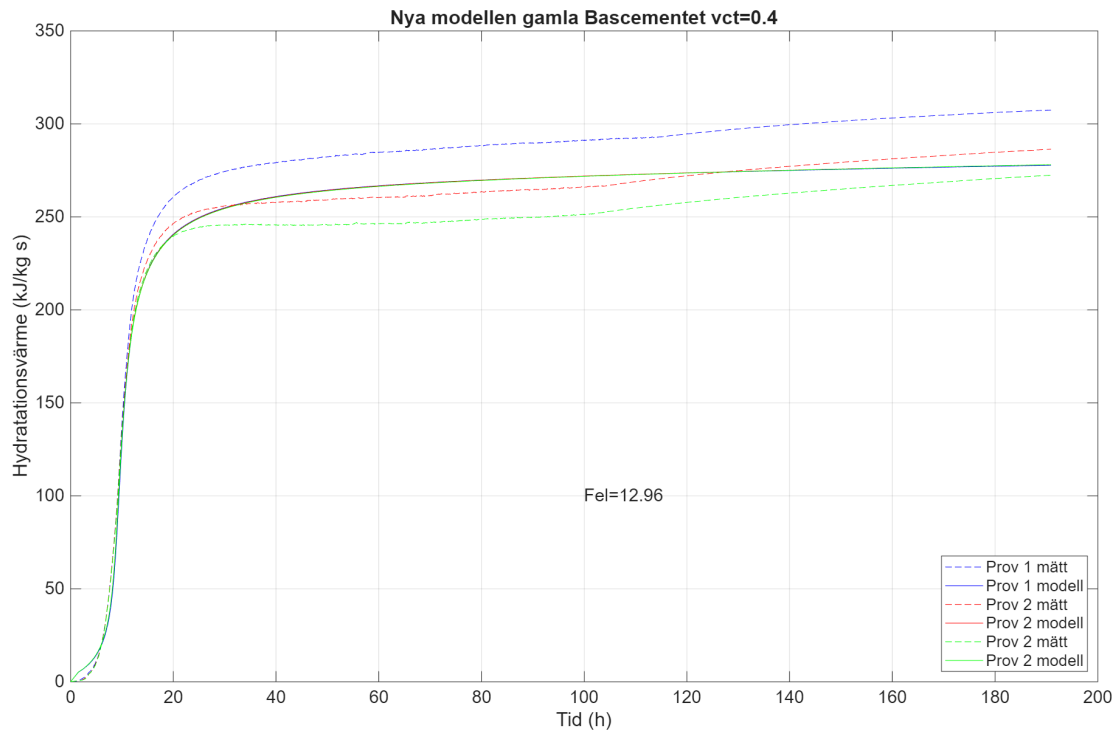
6.2 Initial värme



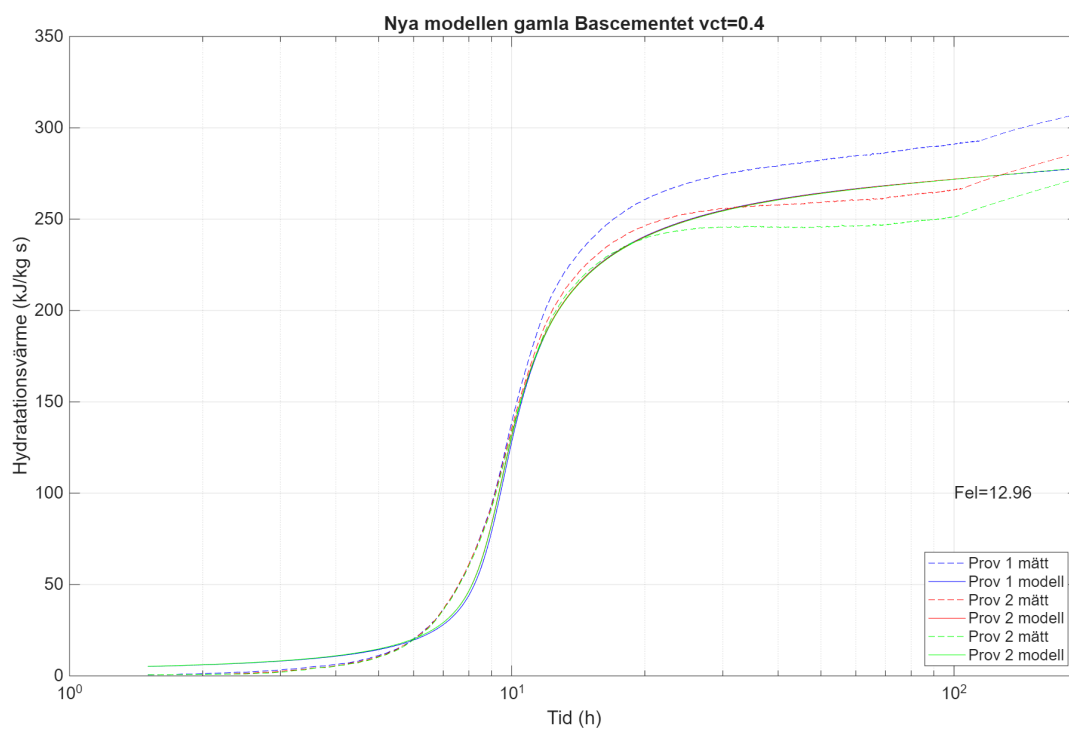
Figur 139. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



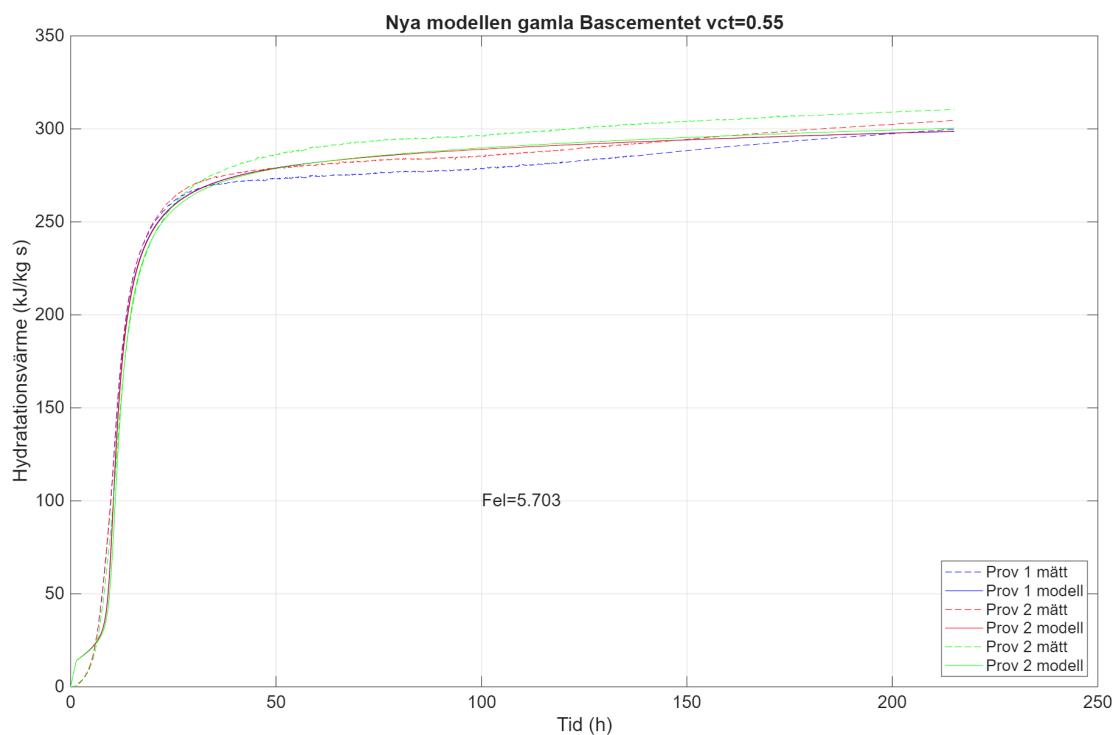
Figur 140. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



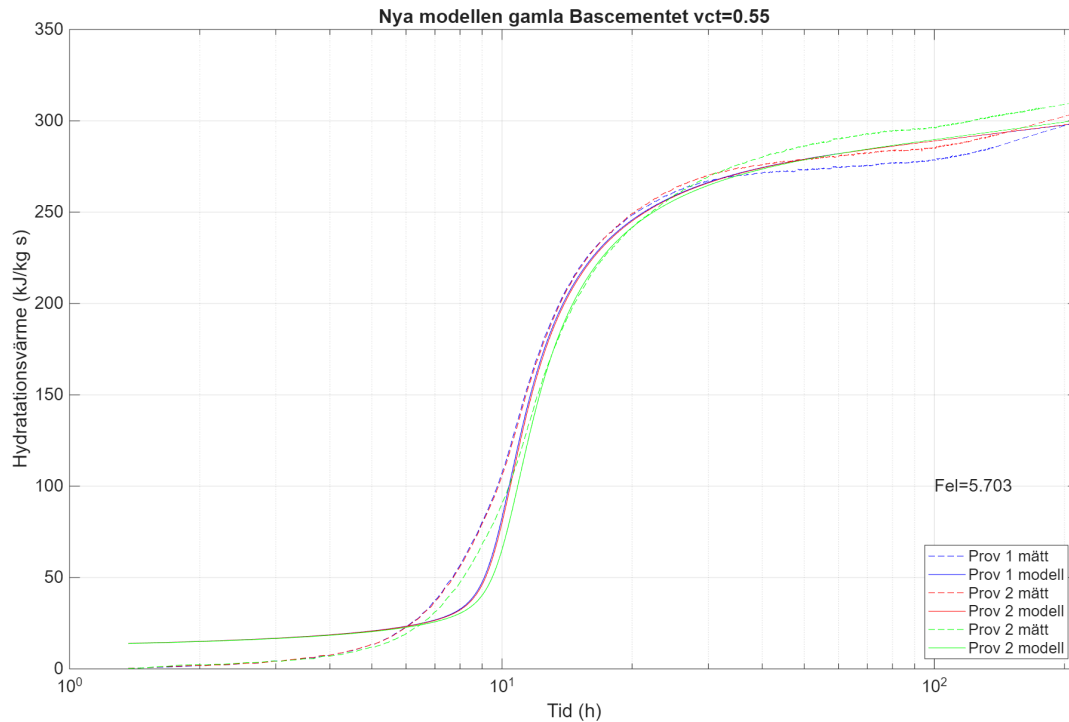
Figur 141. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



Figur 142. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme

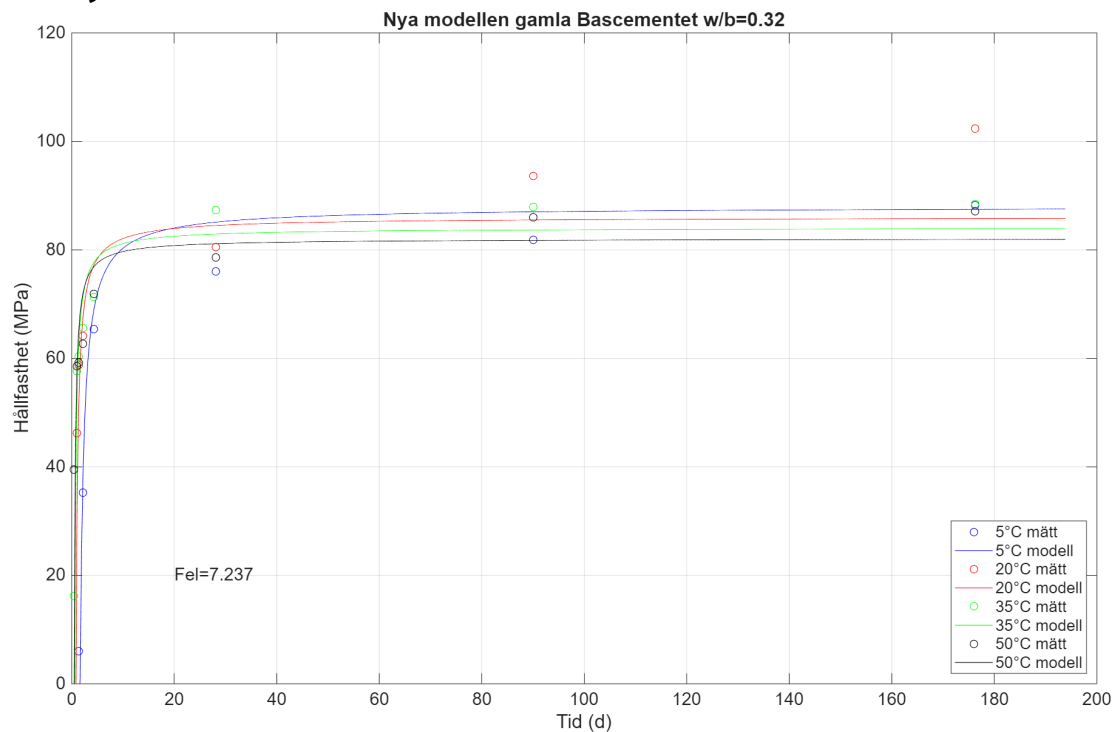


Figur 143. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme

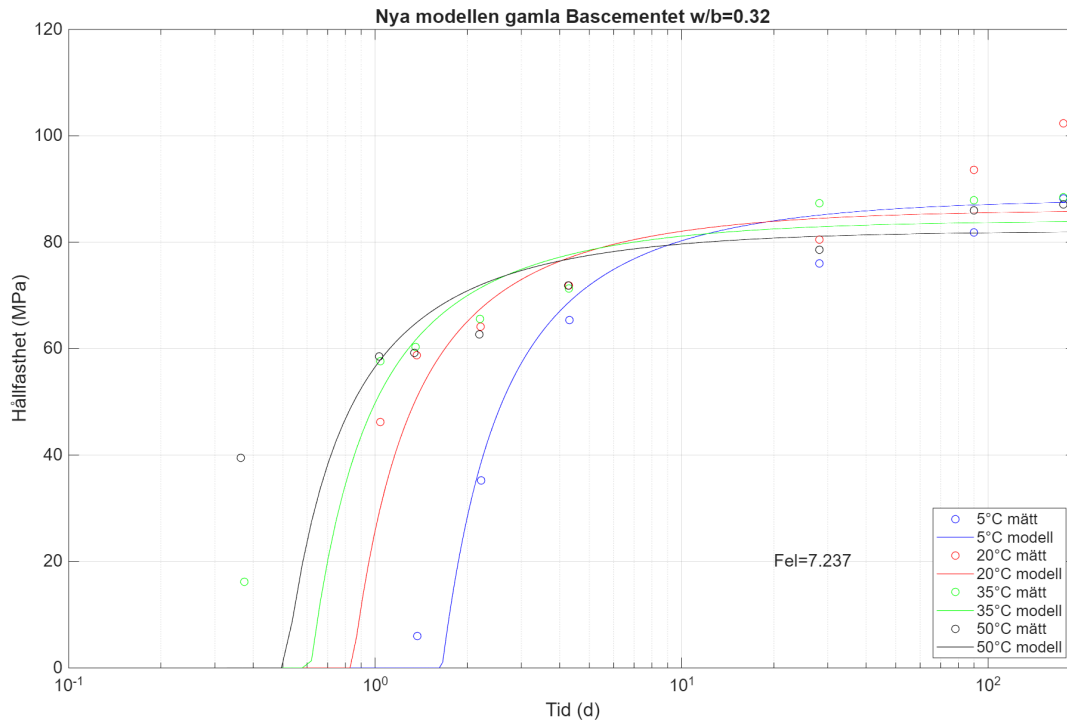


Figur 144. Initial anpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme

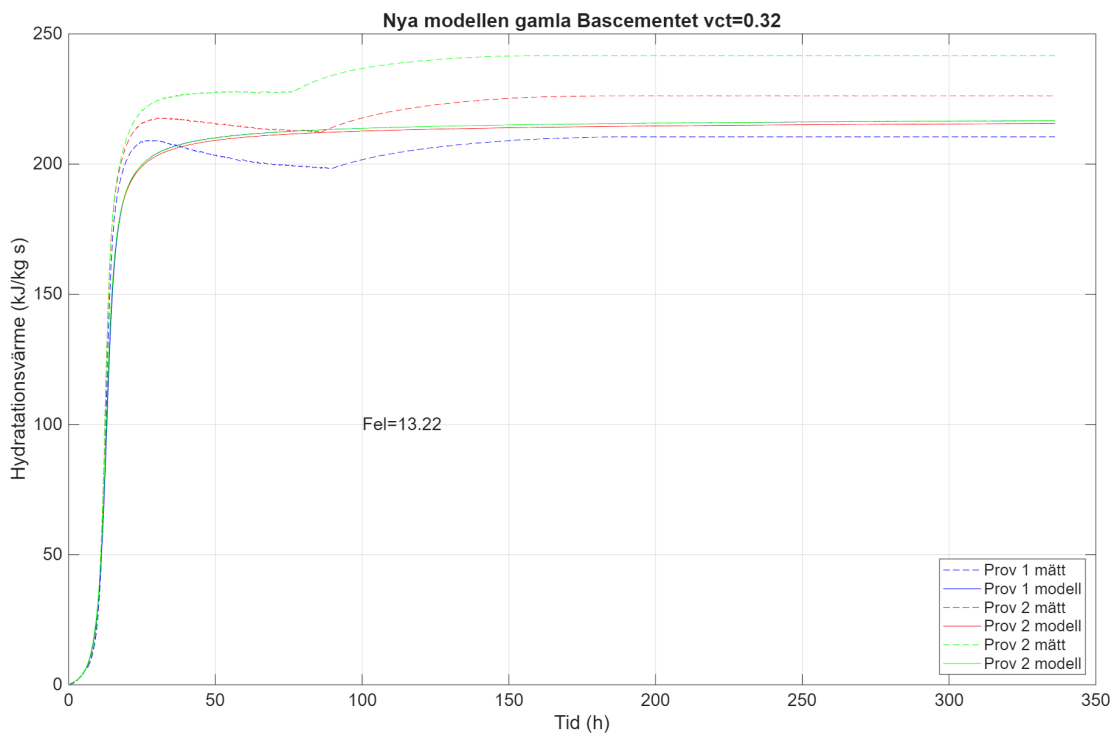
6.3 Justerad hållfasthet och värme



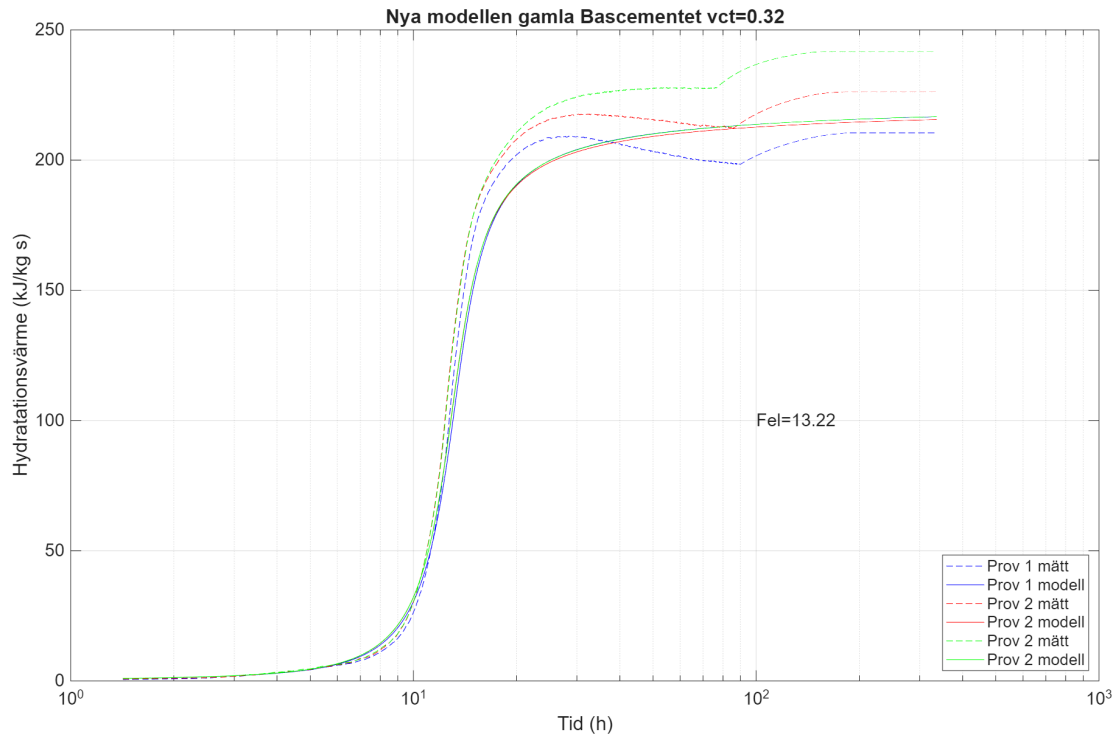
Figur 145. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



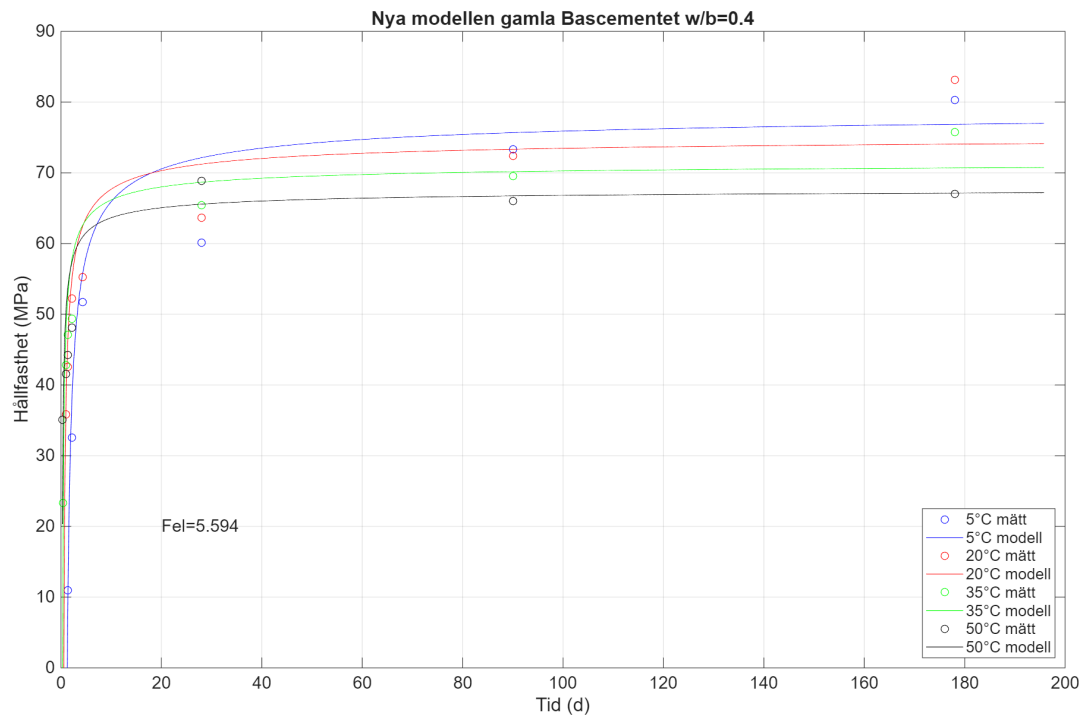
Figur 146. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



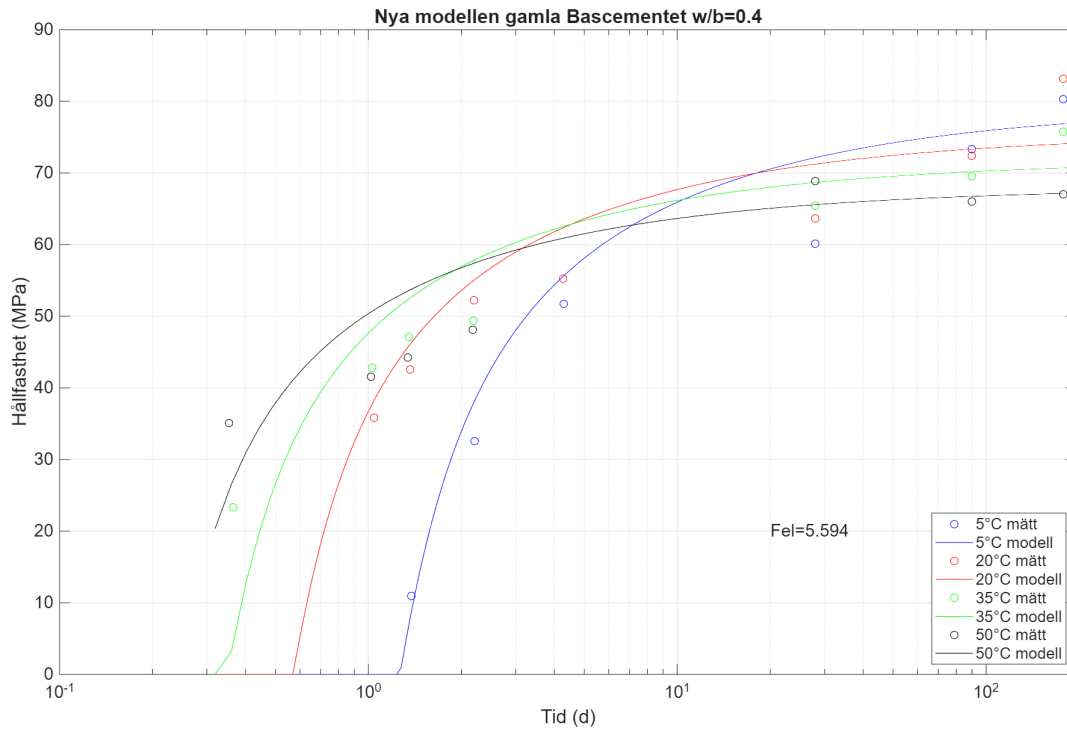
Figur 147. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



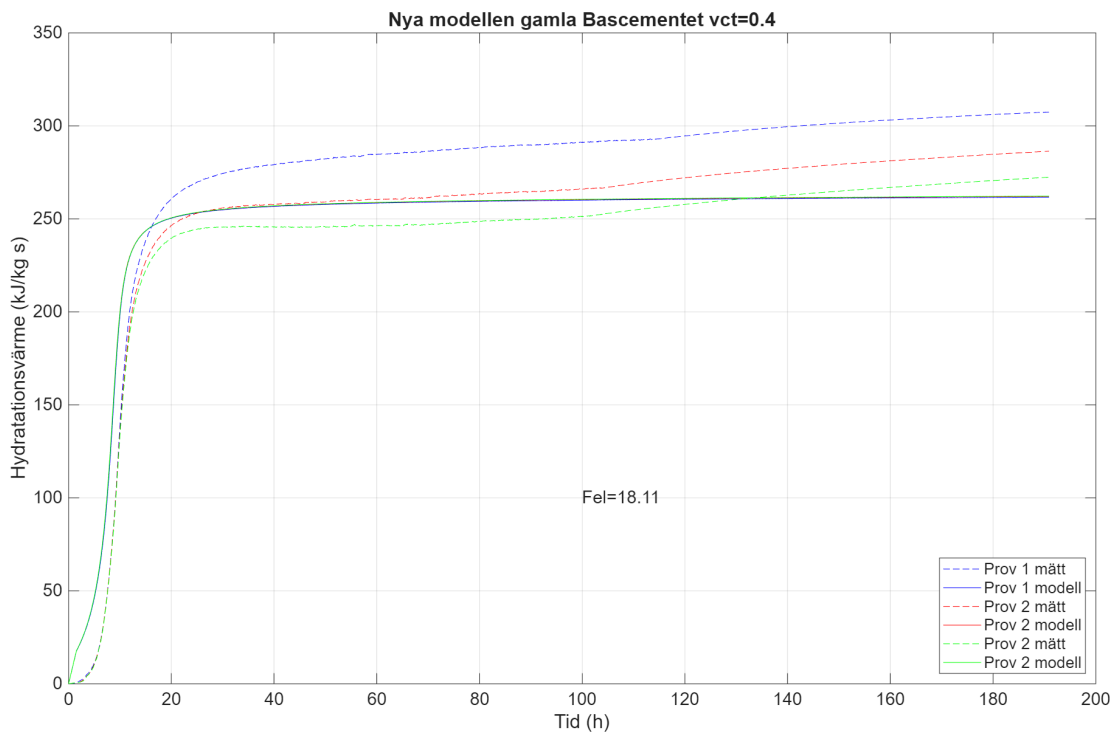
Figur 148. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,32 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



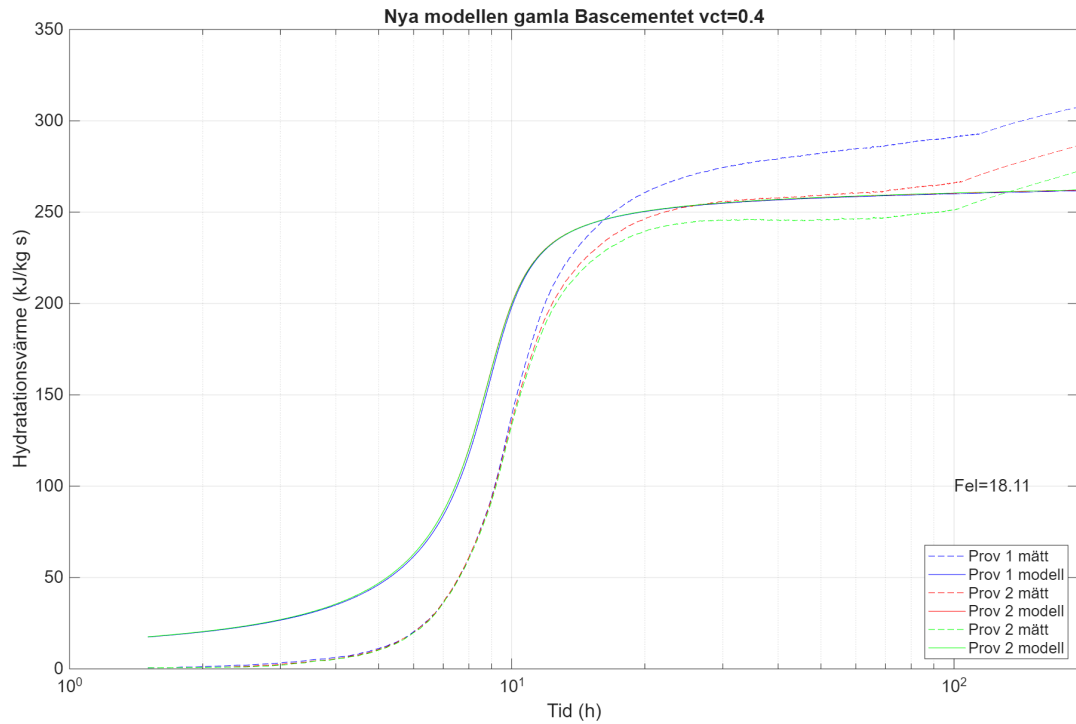
Figur 149. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



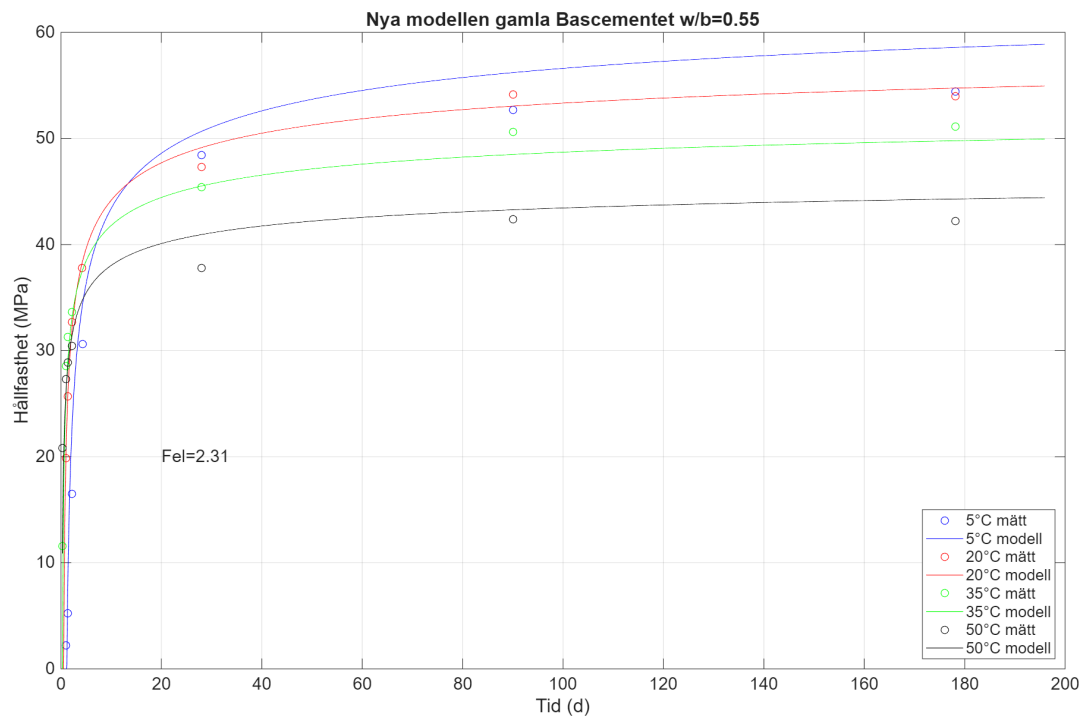
Figur 150. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



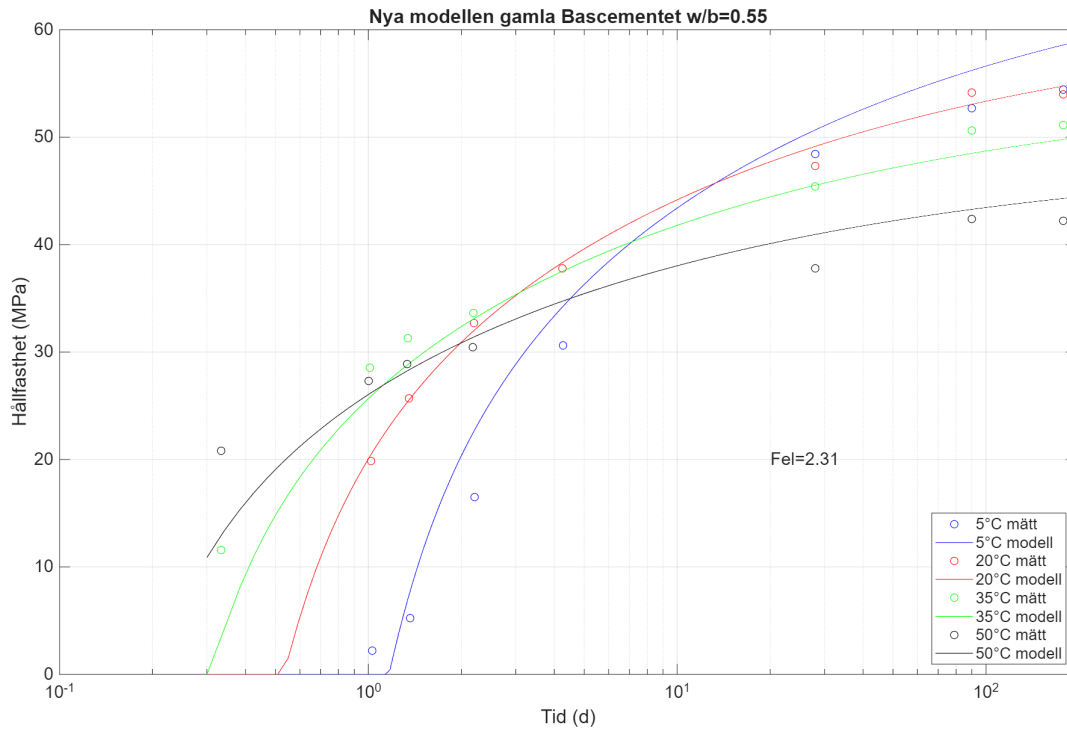
Figur 151. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



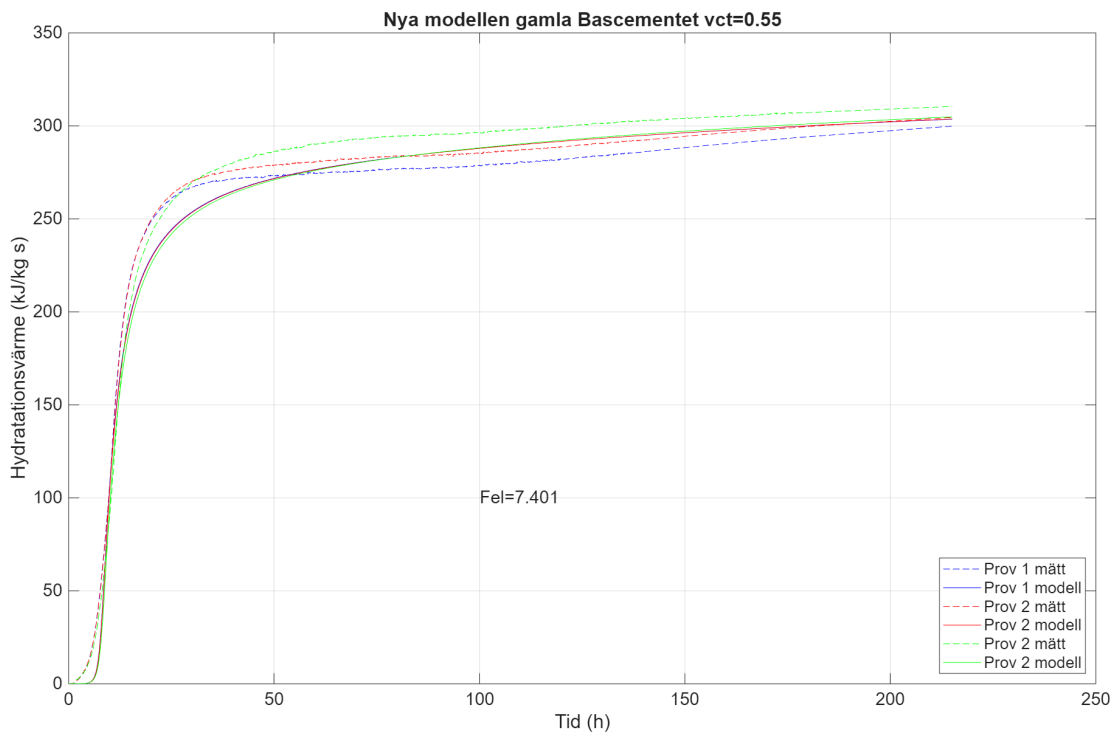
Figur 152. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,40 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



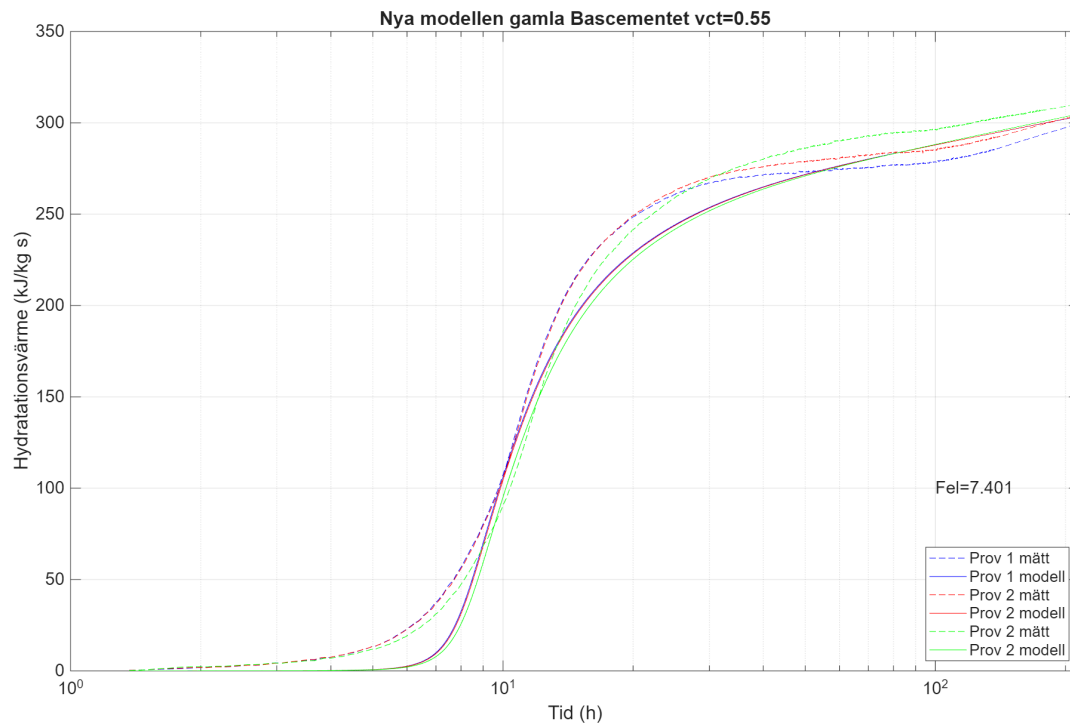
Figur 153. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



Figur 154. Justeringsanpassning för tryckhållfasthet för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



Figur 155. Justeringsanpassning för hydratationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydratationsvärme med två termer i ekvationen för värme



Figur 156. Justeringsanpassning för hydrationsvärme för det gamla Bascementet vct 0,55 och den nya modellen, där anpassning utförts mot mätdata för både tryckhållfasthet och hydrationsvärme med två termer i ekvationen för värme

Bevis för matematisk likvärdighet mellan två modellansatser för värme

Beviset för matematisk likvärdighet mellan modellansatserna för hydratationsvärme:

$$\frac{dQ}{dt} = [1 - a_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_C}{dt}$$

och

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 \frac{d\alpha_C}{dt} + a_2 \frac{d\alpha_W}{dt}$$

där

$$\frac{d\alpha_W}{dt} = [1 - b_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_C}{dt}$$

och a_{adj} , b_{adj} , a_1 och a_2 är fritt valbara anpassningsparametrar utgår från den andra ansatsen:

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 \frac{d\alpha_C}{dt} + a_2 \frac{d\alpha_W}{dt}$$

där uttrycket för $\frac{d\alpha_W}{dt}$ sätts in och de fritt valbara parametrarna a_1 och a_2 sätt enligt $a_1 = 1 - \frac{a_{adj}}{b_{adj}}$

och $a_2 = \frac{a_{adj}}{b_{adj}}$. Resultatet blir:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= a_1 \frac{d\alpha_C}{dt} + a_2 [1 - b_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_C}{dt} \\ &= \left(1 - \frac{a_{adj}}{b_{adj}}\right) \frac{d\alpha_C}{dt} + \frac{a_{adj}}{b_{adj}} [1 - b_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_C}{dt} \\ &= \frac{d\alpha_C}{dt} - \frac{a_{adj}}{b_{adj}} \frac{d\alpha_C}{dt} + \frac{a_{adj}}{b_{adj}} \frac{d\alpha_C}{dt} - \frac{a_{adj}}{b_{adj}} b_{adj}(T - 20^\circ\text{C}) \frac{d\alpha_C}{dt} \\ &= \frac{d\alpha_C}{dt} - a_{adj}(T - 20^\circ\text{C}) \frac{d\alpha_C}{dt} \\ &= [1 - a_{adj}(T - 20^\circ\text{C})] \frac{d\alpha_C}{dt} \end{aligned}$$

Det erhållna uttrycket är lika med den första modellansatsen, vilket skulle bevisas.