

UTVÄRDERING AV FORMTRYCKSMODELLER VID GJUTNING MED SKB

En internationell jämförelse med världens experter samlade



Peter Billberg, CBI Betonginstitutet AB

2013-08-28

Förord

Detta projekt har planerats inom ramen för en RILEM-kommitté (RILEM TC 233-FPC) vars arbete behandlar frågan om formtryck genererat av färsk betong. Bland denna internationella kommittés medlemmar finns många av de forskare som under de senaste 10-12 åren arbetat med att ta fram beräkningsformler för formtryck vid gjutning med självkompakterande betong (SKB). Några av de representanter som medverkat i utvärderingen är inte direkt aktiva inom RILEM utan istället i American Concrete Institute (ACI). För att projektet skulle få en tillräcklig tyngd, dvs. att så många som möjligt av de framtagna modellerna skulle ingå i utvärderingen, så behövdes alltså ett formellt samarbete mellan RILEM och ACI. Detta mötte inte några som helst hinder utan projektet har stötts fullt ut av båda dessa organisationer.

Förutom de diskussioner inom RILEM-kommittén som övergripande bidrog till planläggning av projektet så har en svensk projektgrupp utarbetat detaljerna. Projektgruppen har bestått av representanter från följande företag:

JM AB genom Greger Sandström

Peri AB genom Nils Bertilsson

Betongindustri AB genom Ulf Sandström

KTH genom Stefan Trillkott

CBI Betonginstitutet genom Peter Billberg (ordförande för RILEM TC 233-FPC) - Projektledare

Som stöd för denna grupp har också Nicolas Roussel (IFSTTAR, Frankrike), tillika sekreterare i RILEM TC 233-FPC, fungerat.

CBI:s personal har också varit till ovärderlig hjälp och de personer som hjälpt till är följande: Richard McCarthy, Marija Golubeva, Patrick Rogers, Åke Engström, Alexander Eriksson-Brandels, Karin Glad, Tuula Ojala och Jessica Kjell Dahl.

Bidrag till finansieringen av detta internationella projekt har kommit från flera håll. Från Sverige har medel kommit från Konsortiet för finansiering av grundforskning inom betongområdet, från SBUF, från CBI samt som egeninsats av Peri AB och Betongindustri AB. Förutom det mer symboliska stödet från RILEM har även finansiellt stöd erhållits av ACI genom dess Concrete Research Council (CRC). För att ytterligare bidra till att täcka kostnaderna, då främst avseende rese- och transportkostnader för de internationella deltagarna, genomfördes en endagskonferens i Stockholm under den vecka som projektet genomfördes.

Jag vill härmed framföra mitt varma tack till alla personer, organisationer och företag som gjort projektet möjligt.

Synpunkter från Johan Silfwerbrand, CBI, Hans Hedlund, SBUF och Mats Emborg, Betongindustri har beaktats.

Peter Billberg

Stockholm, 2013-08-28

SAMMANFATTNING

Man kan konstatera att självkompakterande betong, SKB, revolutionerat tillverkningen av prefabricerade betongelement. Men då användningen av SKB ligger på 50-100 % inom prefabindustrin så ligger användandet vid platsgjutning fortfarande på nivåer kring 10 %. Det finns flera tydliga orsaker till detta och en av de mer centrala är att det råder allmän osäkerhet kring för vilket formtryck man skall dimensionera formen.

Syftet med projektet är att utvärdera och jämföra de olika formtrycksmodellerna som anpassats för SKB. Detta skall i sin tur leda fram till ökad insikt om formtryck med SKB och ge underlag för rekommendationer av vilken modell som är mest användbar. I förlängningen skall denna kunskap kunna användas för att säkerställa att formtrycket hålls under kontroll, särskilt vid gjutning av höga konstruktioner. Adekvata beräkningsformler för formtryck vid gjutning med SKB är av avgörande betydelse för att SKB skall nå den potential som den har möjlighet att nå.

I princip all världens expertis på formtryck vid gjutning med SKB samlades i Stockholm under en vecka i slutet av maj 2012. De är också upphovsmän till de olika formtrycksmodeller som utvärderats.

Två väggar per dag göts under fyra dagar i sträck, dvs. totalt åtta väggar. Fyra av dem var 6,6 m höga och de övriga 4,2 m höga. Samtliga väggar var 2,4 m breda och alla väggar hade tjockleken 0,2 m förutom en som var 0,4 m tjock. Två typrecept av SKB användes och de präglas av olika grad av tixotropi. Formtrycken uppmättes med tryckceller på fyra nivåer i varje vägg. Totalt tio olika modeller baserade på olika nyckelparametrar såsom strukturuppbyggnad, konsistensförlust, tillstyvnadstid och tryckminskning efter färdig gjutning, teoretiska såväl som mer empiriska, utvärderades.

Försöken visade att samtliga modeller fungerade bra och att de väl kunde förutse trycken som uppmättes. Tryck relativt hydrostatiskt tryck hamnade för samtliga väggar mellan 50 % och 90 % vid gjuthastigheter på 2,7 – 6,4 m/h. Vid linjär regression tvingad genom origo på samtliga resultat som respektive modell förutsåg relativt uppmätta tryck och för samtliga åtta väggar, erhöll modellerna lutningskoefficienter mellan 1,09 och 1,42 och korrelationskoefficienter, R^2 , mellan 0,69 och 0,86. Detta innebär att alla modeller är konservativa i det att de överskattar trycken en aning (lutningskoefficient > 1) och med någorlunda god precision. Ingen av dem kan rekommenderas som bäst men ingen av dem kan heller uteslutas på grund av bristande kapacitet. Detta innebär att grund för val av metod handlar om med vilken enkelhet, och tillförlitlighet, nyckelparametern kan bestämmas.

Konsistens och gjuthastighet räcker inte för att beräkna formtrycket, utan istället styrker resultaten att det är beteendet i vila som också måste beaktas. I samtliga utvärderade metoder ingår en parameter som relaterar till detta på ett eller annat sätt.

Denna rapport skall under inga omständigheter användas såsom någon officiellt accepterad ersättning till gällande formbyggnadshandbok. Orsaken är självklar i det att detta projekt har

karaktären av att utvärdera befintliga hypoteser och beräkningsmodeller med endast åtta försök. Åtta försök kan räcka för en utvärdering men däremot inte för att säkerställa modellernas statistiska tillförlitlighet eller vilka konfidensintervall och partialkoefficienter som bör användas. För detta skulle långt fler försök behövas. Ett större, gärna nationellt, projekt skulle däremot kunna ge svar på det som inte kunde besvaras i detta projekt. Nämligen hur enkelt och tillförlitligt man kan fånga upp de värden på parametrarna som ingår i respektive modell.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	6
2. SYFTE MED PROJEKTET OCH DESS RELEVANS	7
3. DE UTVÄRDERADE METODIKERNA	7
3.1 MODELL UTVECKLAD AV KHAYAT OCH OMRAN	8
3.2 MODELL UTVECKLAD AV LANGE OCH TEJEDA-DOMINGUEZ	8
3.3 MODELL UTVECKLAD AV OVARLEZ OCH ROUSSEL	9
3.4 MODELL UTARBETAD AV PERROT M.FL.	9
3.5 MODELL UTVECKLAD AV GARDNER M.FL.	10
3.6 MODELLER ENLIGT DIN 18218:2010-01	10
3.7 MODELLER UTVECKLADE AV PROSKE	11
3.8 MODELL UTVECKLAD AV BEITZEL	12
4. PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	13
4.1 ÖVERGRIPANDE	13
4.2 INSTRUMENTERING AV FORMARNA	14
4.3 MÄTNING AV GJUTHASTIGHET	15
4.4 BETONGRECEPT OCH LEVERANSER	16
4.5 BETONGENS FÄRSKA EGENSKAPER	18
5. RESULTAT	18
5.1 VÄGGARNAS GEOMETRI OCH TRYCKCELLERNAS PLACERING	18
5.2 FORMTRYCKSPROFILER OCH RELATIVA TRYCK	19
5.3 UTVÄRDERING AV FORMTRYCKSMODELLERNA	24
5.4 SAMMANSTÄLLNING AV REGRESSIONSANALYSER	30
5.5 UPPMÄTTA VÄRDEN FÖR RESPEKTIVE METODERS NYCKELPARAMETRAR	30
6. REKOMMENDATIONER	34
7. SLUTSATSER	35

8. MEDVERKANDE	36
LITTERATURFÖRTECKNING	37
BILAGA 1 - EXEMPEL PÅ TVÅ ENKLA MODELLERS ANVÄNDNING	39
BILAGA 2 - STAGKRAFTER RELATIVT TRYCKCELLER	42
BILAGA 3 - GJUTHÖJD SOM FUNKTION AV TIDEN	43

1. INLEDNING

Självkompakterande betong (SKB) började utvecklas i Japan i mitten av 1980-talet och tekniken för detta speciella betongmaterial och dess användning har sedan dess spritts över i princip hela världen. Orsakerna bakom detta stora intresse för en betong som inte behöver kompakteras utan istället kan processas rationellt är många. Inte minst för att SKB har en mycket stor potential att effektivisera produktionen av betongkonstruktioner (tid och pengar) och samtidigt förbättra arbetsmiljön på byggarbetsplatsen [1,2]. Dessutom kan man med SKB gjuta konstruktioner med komplicerade geometrier och täta armeringslösningar. De bättre ytor som kan erhållas är mycket gynnsamt i de fall där arkitektoniska frågor är avgörande.

Fram tills idag kan man konstatera att SKB revolutionerat tillverkningen av prefabricerade betongelement. Många äldre fabriker har helt eller delvis anpassats för produktion med SKB och nyare fabriker planeras och designas ofta helt med hänsyn till processning med SKB. Men då användningen av SKB ligger på 50-100 % inom prefabindustrin (nivå dock beroende på fabrik och dess produkter) så ligger användandet vid platsgjutning fortfarande på nivåer kring 10 % (lokalt dock på större nivåer).

Det finns ett par tydliga orsaker till detta och en av de mer centrala orsakerna är att det råder allmän osäkerhet kring för vilket formtryck man skall dimensionera formen. Detta faktum blir tydligt om man studerar hur det internationella intresset för frågan om SKB relativt formtryck vid konferenser och i tidsskrifter ökat de senaste ca 10 åren. Dessutom har det rapporterats flertal gånger om att SKB kan generera tryck långt under det hydrostatiska [3-9].

Sedan ett par år tillbaka har den internationella organisationen RILEM (*Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages*) en teknisk kommitté (TC 233-FPC) som skall hantera frågan om formtryck vid gjutning med färsk betong (Peter Billberg, CBI Betonginstitutet AB, är ordförande). Samtidigt har ACI (*American Concrete Institute*) en kommitté som arbetar med samtliga frågor om betongformar (ACI 347-Formwork) och den har identifierat denna fråga som en av de viktigaste att reda ut framöver. Denna kommitté ger ut publikationen "Guide to Formwork for Concrete" vilken framöver skall uppdateras med nya beräkningsformler för formtryck vid gjutning med SKB.

I detta nu råder emellertid osäkerhet om vilken formtrycksmodell som skall prioriteras. Under det senaste decenniet har det runt om i världen framtagits ett flertal beräkningsmodeller som resulterat i olika empiriska och teoretiska formler för att kunna förutse formtryck vid gjutning med SKB.

Vid sidan av allmännyttan med ett större utnyttjande av SKB, så är kunskap om formtryck en central fråga för entreprenörerna. Formen utgör en stor andel av kostnaderna för en entreprenad, och en optimering av denna kontra gjut- och processhastigheter är direkt resurssparande.

2. SYFTE MED PROJEKTET OCH DESS RELEVANS

Syftet är att utvärdera och jämföra de olika formtrycksmodellerna som anpassats för SKB [4-14]. Detta skall i sin tur leda fram till ökad insikt om formtryck med SKB och ge underlag för rekommendationer av vilken modell som är mest användbar. Kunskapen skall användas för att man skall kunna säkerställa att formtrycket hålls under kontroll, särskilt vid gjutning av höga konstruktioner samt veta hur man kan optimera betongen med hänsyn till gjuthastighet, typ av form etc.

Adekvata beräkningsformler för formtryck vid gjutning med SKB är av avgörande betydelse för att SKB skall nå den potential som den har möjlighet att nå. Forskningsprojektets betydelse för detta stöds av Sveriges Bygguniversitet genom dess temagrupp för konstruktion. Projektet är unikt genom sitt upplägg och sin internationella prägel vilket borgar för kvalitet, relevans och genomslagskraft.

3. DE UTVÄRDERADE METODIKERNA

Modellerna som utvärderats i denna serie försök samt deras upphovsmän presenteras kortfattat nedan. Totalt tio olika modeller har ingått i försöken. Läsaren hänvisas till originalkällorna som refereras till för att få en mer komplett beskrivning och bakgrund till dessa modeller.

- Sofiane Amziane, professor, Clermont University, Polytech'Clermont-Ferrand, Frankrike
- Marc Beitzel, dr.-Ing, Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik, Trier, Germany
- John N. Gardner, professor emeritus, University of Ottawa, Ottawa, Kanada
- Kamal H. Khayat, professor, Missouri University of Science and Technology, Missouri, USA
- David A. Lange, professor, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, USA
- Ahmed F. Omran, forskare, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Kanada
- Arnaud Perrot, biträdande professor, South Britany University, Lorient, Frankrike
- Tilo Proske, seniorforskare, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Tyskland
- Nicolas Roussel, seniorforskare, IFSSTAR, Frankrike
- DIN 18218:2010-01

3.1 Modell utvecklad av Khayat och Omran

Khayat och Omran [4] utvecklade sin beräkningsmodell utifrån en stor mängd laboratorieförsök där de använt ett 0,7 m högt rör som kallas ”Sherbrooke pressure column” [15]. Den är designad för att med övertryck av luft kunna simulera betonghöjder upp till 13 m. Från den stora databasen kunde samband erhållas mellan olika nyckelparametrar och ett uttryck erhållas för det maximala trycket, P_{max} (kPa) se Ekv. 1. Modellen tar hänsyn till följande parametrar: gjuthöjd H (m), gjuthastighet R (m/h), minsta horisontella formdimensionen D_{min} (m) och betongens strukturuppbyggnad under vila $PV_{\tau_{rest}@15min}$ (Pa). Metoden innebär att man med en portabel tixometer (Portable Vane, PV [15], på engelska) mäter det vridmoment som behövs för att få en fyrbladig sond, nersänkt i betongen, att rotera. Genom att ta hänsyn till geometrin hos sonden kan vridmomentet räknas om till den statistiska flytgränsspänningen som mäts efter 15 minuter i vila. Modellen tar även hänsyn till maximal stenstorleken (MSA) och väntetid (s) mellan gjutpallar (WP) genom faktorerna f_{MSA} respektive f_{WP} .

$$P_{max} (kPa) = \frac{\gamma_c H}{100} (98 - 3.82 H + 0.63 R + 11 D_{min} - 0.021 PV_{\tau_{rest}@15min@Ti}) \cdot f_{MSA} \cdot f_{WP} \quad (1)$$

där $\gamma_c = \rho g$ är betongens enhetstyngd (kN/m³)

3.2 Modell utvecklad av Lange och Tejeda-Dominguez

Lange och Tejeda-Dominguez [5,10] karakteriserar betongens beteende i vila genom formtryckets förändring (sjunkande) efter slutförd gjutning. Själva metodiken innebär att betong gjuts i ett PVC-rör med höjden 920 mm och diametern 250 mm. Röret är instrumenterat med en tryckcell 152 mm från botten av röret. Tryckcellen registrerar trycket från gjutning till dess att trycket reducerats till noll. Denna tryckkurva befann man bäst beskrivas med en hyperbolisk funktion (Ekv. 2).

$$C(t) = \frac{C_0}{(at^2 + 1)^\alpha} \quad (2)$$

där $C(t)$ är den karakteristiska tryckkurvan som funktion av tiden, C_0 är trycket direkt efter slutförd gjutning och de tidsberoende parametrarna, a och α , används för att anpassa funktionen till tryckkurvan. Uttrycket för horisontella trycket, P_h (kPa), förutsatt en kontinuerlig gjutning, blir då (Ekv. 3):

$$P_h = \gamma R t \frac{C_0}{(at^2 + 1)^\alpha} \quad (3)$$

där $\gamma = \rho g$ är betongens enhetstyngd (kN/m³), R är gjuthastigheten (m/h) och t är tiden (h).

3.3 Modell utvecklad av Ovarlez och Roussel

Ovarlez and Roussel [6] använder en teori om silotryck, från början presenterad 1885 av Janssen [17], för att analytiskt ta fram en formtrycksmodell för SKB. Deras tillvägagångssätt baseras på antagandet att Janssens modell också är giltig för ett inneslutet elastiskt material, som SKB i en form. Modellen antar vidare att det är friktion mellan betongen och formen och att det uppstår en skjuvspänning i betongen som motsvarar den statiska flytgränsspänningen. Istället för att använda en statisk flytgräns vid en viss tidpunkt så fokuserar Ovarlez and Roussel på den linjära, tidsberoende, ökningen av den statiska flytgränsen i vila, A_{thix} (Pa/s), med andra ord strukturuppbyggnaden. Genom att använda formens geometri, höjd, H (m), och tjocklek, e (m); gjuthastighet, R (m/h), och betongens densitet, ρ (kg/m³), på ett fundamentalt sätt så tar de fram följande ekvation (Ekv. 4) för beräkning av P_{max} (kPa):

$$P_{max} = \left(1 - \frac{HA_{thix}}{\rho g e R}\right) \cdot \rho g H = \rho g H - \frac{H^2 A_{thix}}{e R} \quad (4)$$

3.4 Modell utarbetad av Perrot m.fl.

Denna modell, framtagen av Perrot *et al* [9], är baserad på den tidigare modellen av Ovarlez och Roussel (avsnitt 3.3) [6]. Men det finns två huvudsakliga skillnader mellan dessa modeller. Den första är att Perrot *et al* [9] också tar hänsyn till inverkan av armeringen i formen. Endast den vertikala armeringen ingår i beräkningarna trots att de horisontella järnen givetvis också har betydelse. Detta innebär att modellen är konservativ vilket är bättre än det omvända. Den andra skillnaden är att Perrot *et al* [9] mäter strukturuppbyggnaden med en speciellt utvecklad metod. En platta sänks delvis ner i betong som i sin behållare står på en våg. Det räcker med en mycket liten sättning av betongen för att plattan successivt ska ta upp mer och mer av betongtyngden från vågen. Spänningen som byggs upp på plattans yta motsvarar den statiska flytgränsspänningen. Detta är alltså en statisk metod som inte stör provet och som kontinuerligt registrerar betongens strukturuppbyggnad [18,19]. Dessa förändringar av Ovarlez and Roussels metod [6] resulterar i följande uttryck för det maximala horisontella betongtrycket mot form (Ekv. 5):

$$P_{max} = \left(\rho g H - \left(\frac{\phi_b + 2S_b}{(e - S_b)\phi_b} \right) \frac{A_{thix} H^2}{R} \right) \quad (5)$$

där S_b är den horisontella ytan av armering per löpmeter form (m²), och ϕ_b är den genomsnittliga diametern av armeringsjärnen (m). De andra parametrarna har beskrivits i avsnitt 3.3 ovan.

3.5 Modell utvecklad av Gardner m.fl.

Baserat på resultat från en stor mängd fältförsök har Gardner m.fl. utvecklat en formtrycksmodell [7]. Den fokuserar på tiden som behövs för att betongens flytsättningsmått skall reduceras till noll, t_0 (h), Ekv. 6. Denna parameter fås vid extrapolering av konsistenstappet för betong som i princip får vila till dess att betongens flytsättningsmått skall sjunka till 400 mm från det ursprungliga värdet [7].

$$t_0 = t_{400} \left(\frac{FSM_i}{FSM_i - 400} \right) \quad (6)$$

där t_{400} = tiden till dess att flytsättningsmålet når 400 mm (h), FSM_i = ursprungligt flytsättningsmått (mm). Uttrycket för horisontellt tryck P (kPa) som funktion av tiden t (h) lyder, Ekv. 7:

$$P = wR \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) \quad (7)$$

där w = betongens enhetstyngd (kN/m^3), R = gjuthastighet (m/h) och t = tid (h). Ekv. 7 är giltig för $t < t_0/2$. Maximalt tryck uppstår vid $t = t_0/2$ och då gäller uttrycket, Ekv. 8:

$$P_{\max} = wRt_0/2 \quad (8)$$

Om tiden för att fylla formen, $t_h = H/R$, är mindre än t_0 , används $t = t_h$ i Ekv. 7, vilket då blir Ekv. 9:

$$P_h = wR \left(t_h - \frac{t_h^2}{2t_0} \right) \quad (9)$$

3.6 Modeller enligt DIN 18218:2010-01

Graubner *et al* [8] tog fram en modell baserad på simuleringsförsök med betongprover med måtten $25 \times 25 \times 25$ (cm) samt teoretiska studier och fullskaleprov som genomfördes under ett gemensamt projekt tillsammans med en rad olika tyska forskningscentra [13]. Formlerna i standarden DIN 18218:2010-01 [13] är grundade på denna modell. Endast ett fåtal parametrar ingår i modellen som är avsedd för att vara både robust och praktiskt; gjuthastighet R (m/h), betongens enhetstyngd $\gamma_c = \rho_c g$ (kN/m^3), betongens tillstyvnadstid, t_E (h), som korrelerar mot strukturuppbyggnaden, samt gjuthöjden, H (m). DIN 18218:2010-01 beskriver hur man kan beräkna tillstyvnadstiden t_E baserat på $t_{E,KB}$ som mäts med en tillstyvnadstids-påse (tumtest), $t_E = 1.25 t_{E,KB}$. Tiden för tillstyvnad definieras som när intrycket av tummen i påsen är mindre än 1 mm då man trycker med kraften 50 N. Vid sidan om detta sätt att karakterisera tillstyvnadstiden kan den också mätas med vicanål eller ultraljud.

DIN 18212:2010-01 erbjuder ekvationer för både tryckets medelvärde och karakteristiskt dimensioneringsvärde. Medelvärde beräknas med följande ekvation (Ekv. 10):

$$P_{\max} = (0.8 [m] + 0.16 \cdot R \cdot t_E) \cdot \gamma_c \quad (10)$$

under förutsättning att $P_{\max} \leq P_{hyd}$

Ekvationen för karakteristiskt konstruktionsvärde lyder (Ekv. 11):

$$P_{\max} = (1.0 [m] + 0.26 \cdot R \cdot t_E) \cdot \gamma_c \quad (11)$$

under förutsättning att $P_{\max} > 30$ kPa och $P_{\max} \leq P_{hyd}$

Det karakteristiska dimensioneringsvärdet och partialkoefficienten enligt DIN 18218:2010-01, lika med 1,5 tar hänsyn till spridningen i parametrarna såsom tillstyvnadstid, gjuthastighet och betongens densitet och övriga osäkerheter. I detta projekt beräknades tillstyvnadstiden med påse, $t_{E,KB}$, med tiden beräknad från gjutstart.

3.7 Modeller utvecklade av Proske

Proskes [11] modell baseras på Janssens [17] siloteori. Den tidsberoende friktionen mellan betong, form och armering $\mu(t)$ liksom den tidsberoende tryckkvoten $\lambda(t)$ bestämdes genom laborieförsök [11,12]. Modellen tar hänsyn till gjuthastighet, R (m/h), betongens enhetstyngd, γ_c (kN/m³), tillstyvnadstid, t_E (h), samt minsta horisontella dimensionen, D_{min} (m), och betongens ålder, t (h). För modellen krävs också minsta armeringsdimensionen. Tillstyvnadstiden, $t_E = 1,25t_{E,KB}$, kan beräknas baserat på $t_{E,KB}$ som mäts med tillstyvnadstids-påsen (tumtest, se tidigare beskrivning). I detta projekt beräknades tillstyvnadstiden med påse, $t_{E,KB}$, med tiden beräknad från gjutstart. Då endast ett armeringslager använts i projektet ökades D_{min} , med en faktor = 1,5.

Det är viktigt att skilja på medelvärde och karakteristiskt dimensioneringsvärde. Uttrycket för medelvärde är:

$$P_{\max} = \max P(t)$$

med

$$P(t) = P_{vertical}(t) \cdot \lambda(t) = \frac{\gamma_c \cdot R \int_0^t e^{-\frac{2R}{D_{min}} \int_0^t \lambda(t) \cdot \mu(t) dt} \cdot dt}{e^{-\frac{2R}{D_{min}} \int_0^t \lambda(t) \cdot \mu(t) dt}} \cdot \lambda(t) \quad (12)$$

där

$$\lambda(t) = 1 + 0.11 \frac{t}{t_E} - 2.23 \left(\frac{t}{t_E} \right)^2 - 0.66 \left(\frac{t}{t_E} \right)^3 + 3.46 \left(\frac{t}{t_E} \right)^4 - 1.56 \left(\frac{t}{t_E} \right)^5 \quad (13)$$

och

$$\mu(t) = 2 \left(\frac{t}{t_E} \right)^{2.5} \leq 0.2 \quad (14)$$

Ekvation 15 utvecklades för karakteristiskt dimensioneringsvärde [12] och tar hänsyn 5 % - kvantilen för den tidsberoende friktionen $\mu(t)$ samt 95 % -kvantilen för tryckkvoten $\lambda(t)$.

$$P_{\max} = \left(R \cdot \frac{t_E}{10} \right)^{(0.72+0.178 \cdot \arctan(D_{\min}))} \cdot \arctan \left((D_{\min} \cdot 12)^{0.45} \right) \cdot 2.37 \cdot \gamma_c \quad (15)$$

under förutsättning att $P_{\max} > 10$ kPa och $P_{\max} \leq P_{hyd}$.

3.8 Modell utvecklad av Beitzel

Beitzel [14] utarbetade en modell i sitt doktorandprojekt och liksom flera andra modeller bygger teorierna på Janssens [17] siloteori. Beitzel [14] studerade jämvikten hos de krafter som råder för ett betongtvärsnitt i formen och ur denna tog han fram ett uttryck för det vertikala trycket, σ_v (kPa), Ekv. 16.

$$\sigma_v = \rho g H - \frac{C_{thix} \cdot H^2}{Rd} \quad (16)$$

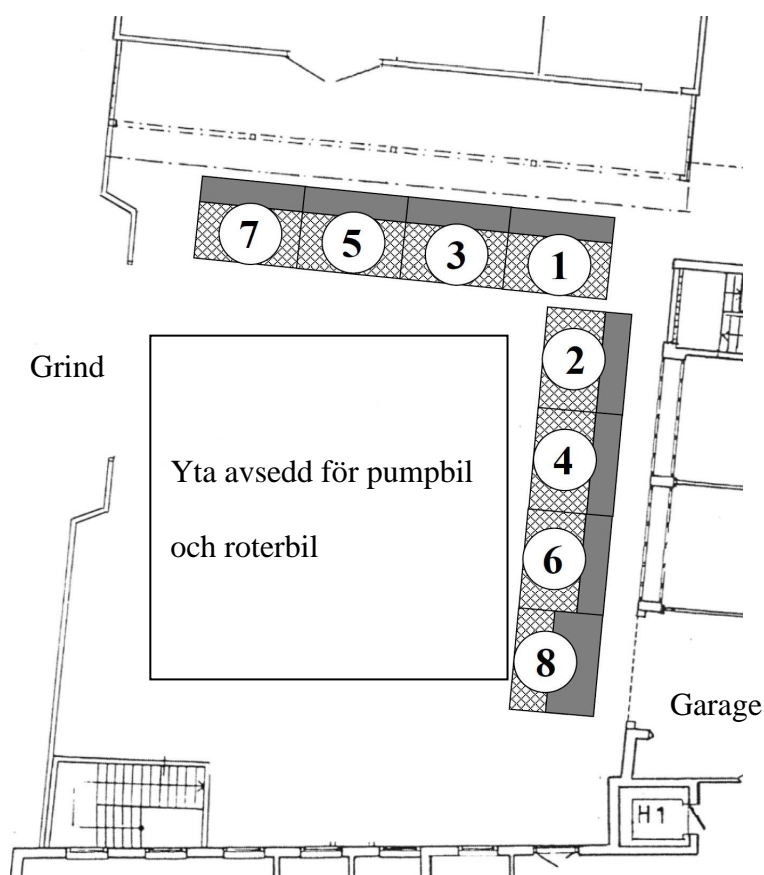
där C_{thix} är strukturuppbyggnaden (Pa/s), dvs. exakt lika parametern A_{thix} som beskrevs för modellen utvecklad av Ovarlez och Roussel [6] (avsnitt 3.3), d är formtjockleken (m), H och R är som tidigare höjden (m) respektive gjuthastigheten (m/h). Beitzel använde sedan Mohrs modell för beräkning av huvudspänningar för att relatera det vertikala trycket till det horisontella, σ_h (kPa), Ekv. 17:

$$\sigma_h = \sigma_v - \frac{2 \cdot C_{thix} \cdot H}{R} \quad (17)$$

4. PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

4.1 Övergripande

Det beslöts i ett tidigt skede att försöken skulle äga rum på CBI:s gård (på KTH:s campus i Stockholm). Orsaken till detta var främst att alla deltagare skulle kunna arrangera all sin mätutrustning under tak vid risk för regn samt av säkerhetsskäl inlåst på nätterna. Men en annan viktig aspekt var att detta kraftigt förenklade logistiken då i stort sett alla deltagare hade ordnat logi på gångavstånd från CBI. Följaktligen så planerades för inalles åtta väggformar på gården, se figur 1.



Figur 1: Planskiss med de åtta väggarnas lägen på CBI:s gård.

Planerna var att gjuta två väggar per dag i fyra dagar i sträck. Väggarna 1, 3, 5 och 7 är 6,6 m höga och väggarna 2, 4, 6 och 8 är 4,2 m höga. Samtliga väggar är 2,4 m breda och vägg 1-7 har tjockleken 0,2 m tjocklek. Vägg nummer 8 är dubbelt så tjock, dvs. 0,4 m. Samtliga väggar armerades med ett nät i ena sidan och detta för att kunna lyfta ner dem säkert efter att försöken avslutats. Den ringa väggdjockleken medgav inte dubbelarmering eftersom pumpslangen måste kunna sänkas ner till nära betongytan under hela gjutningen. Vidare måste väggarna vara relativt

tunna för att säkerställa att betongen från en roterbil per vägg skulle vara tillräcklig. Givetvis skulle även mycket tunga väggar bli alltför svåra att frakta bort, så totala vikten måste hållas nere.

Formarna byggdes upp av personal från JM under veckan innan försöken genomfördes och de utgörs av formpaneler typ Trio från Peri och som kan kopplas ihop i både höjd och sidled.

Figur 2 visar ett fotografi över gården där alla åtta formar är uppmonterade och pumpbilen i färd med att gjuta SKB i vägg nummer 1.



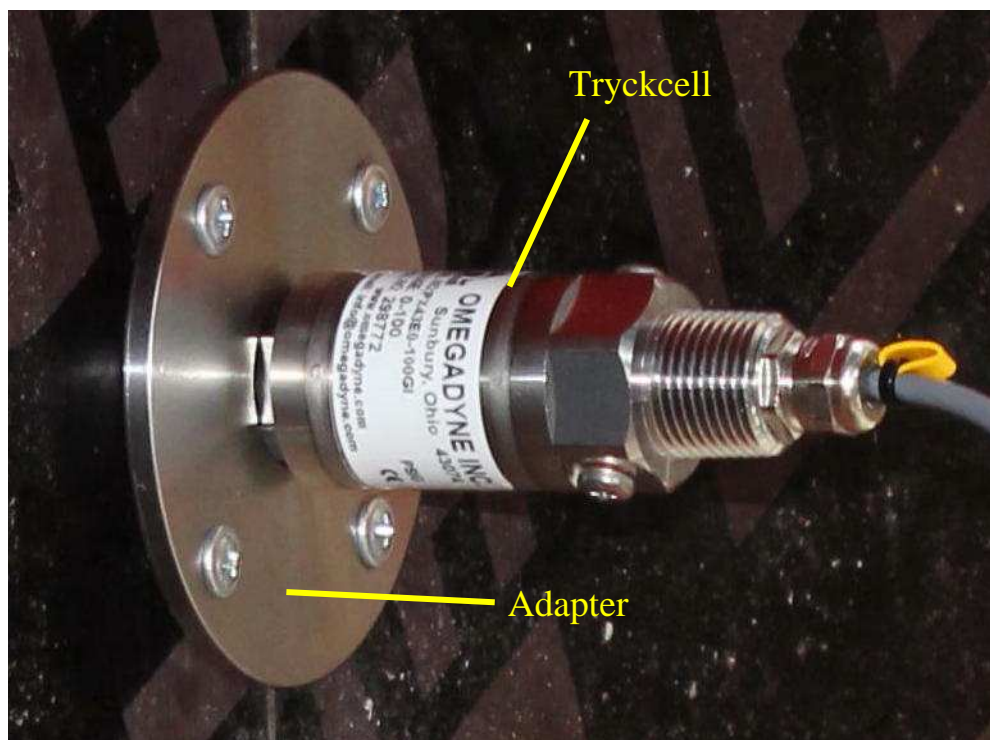
Figur 2: Foto visande försöksuppställningen samt betongpumpen. De högre (6,6 m) väggarna syns i bakgrunden och de lägre (4,2 m) i förgrunden varav den tjockaste (0,4 m) allra närmast

4.2 Instrumentering av formarna

Betongens tryck mot form uppmättes med trycksensorer monterade på fyra olika höjder över botten på formen. De exakta höjderna redovisas i Tabell 3. Tryckcellerna är av typen Omega PX43E0-100GI. De matas med 15 VDC och signalen som registreras från cellen är i mA. För montering i form tillverkades adaptrar i rostfritt stål i vilka tryckcellerna skruvas och varje cells tryckmembran hamnar i nivå med formens insida. Tryckcellen och adaptern visas i Figur 3.

Även krafterna i vissa formstag registrerades, men i denna rapport har dessa värden inte använts vid utvärderingen. Stagkraftsmätningarna har i princip utgjort "Plan B" utfall tryckcellerna skulle visa sig falla på något sätt. Dessutom är stagkrafter svåra att korrekt omräkna till tryck mot form då man rätt måste bedöma graden av statisk (o)bestämmdhet för formen samt vilken yta som skall tillskrivas respektive stag. Stagkrafter kontra tryckceller exemplifieras i Bilaga 2 där

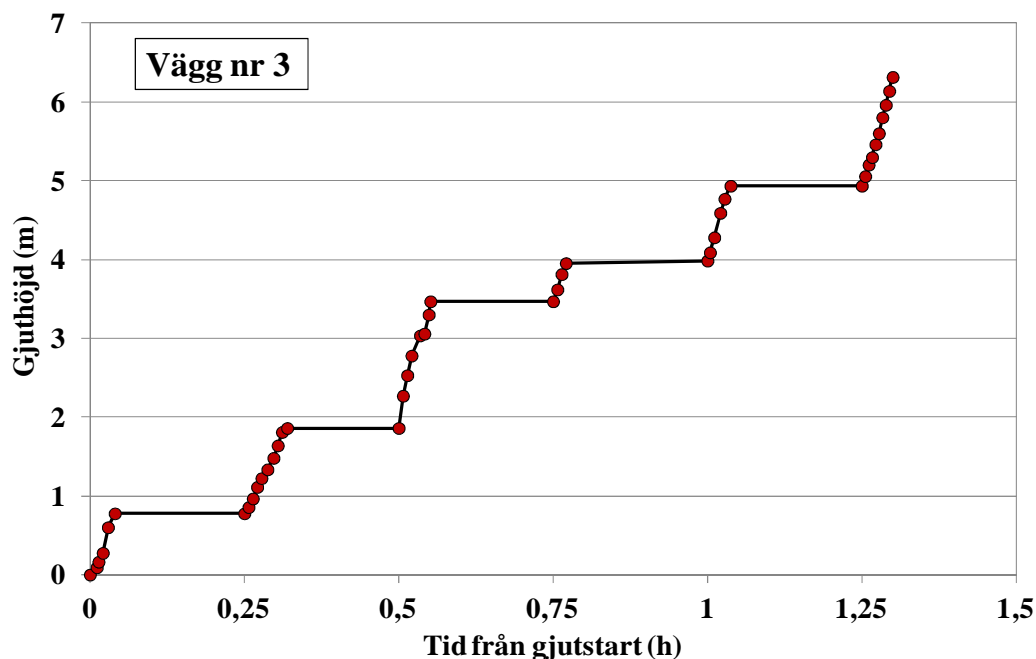
svårigheterna diskuteras vidare. I detta sammanhang bör nämnas att McCarthy och Silfwerbrand [23] utvärderat tre olika sätt att mäta formtrycket; med tryckceller, genom mätning av stagkrafter samt via spänningar i formen uppmätta med trådtöjningsgivare anbringade på formens ramverk. Samtliga tre metoder visade samstämmiga resultat och författarna rekommenderar endera sättet att värdera formtryck.



Figur 4: Tryckcell monterad i den i formen fastskruvade adaptern

4.3 Mätning av gjuthastighet

Det framgår med önskvärd tydlighet från beskrivningarna av modellerna att en mycket viktig parameter att veta vid beräkning av formtryck är gjuthastigheten, dvs. hur snabbt betongens höjd i form ökar med tiden. Betongens höjd mättes för samtliga väggar manuellt med en lasermätare och betongens höjd protokollfördes kontinuerligt. Ett exempel från gjutning av vägg 3 visas i Figur 6 och motsvarande figurer för de andra väggjutningarna redovisas i Bilaga 3. Det framgår av Figur 6 att betongen pumpades stegvis då pumpen inte förmådde pumpa tillräckligt långsamt för en långsam kontinuerlig gjutning. Efter gjutning av vägg 1 och vägg 2 bestämdes att även höjddökningen under själva pumpförandet skulle registreras. Gjuthastigheten motsvarar slutlig gjuthöjd dividerat med total tid för gjutningen (m/h).



Figur 5: Exempel på registrerad gjuthöjd med tiden från gjutstart

4.4 Betongrecept och leveranser

Betongen levererades av Betongindustri från fabriken i Värtan. Innan den skarpa veckan då alla forskare var samlade så förprovades två olika recept vid ett flertal tillfällen på fabriken. Målet var att ta fram två recept som framförallt skilde sig åt avseende tixotropi, dvs. strukturellt beteende i vila (tillstyvnande). För att slippa gjuta vissa väggar med två olika betonglass, vilka ovillkorligen skulle få olika egenskaper, och som onödigtvis skulle komplicera modellernas bedömning av formtrycken så söktes också betonger med tillräckligt öppethållande för att behålla sin flytbarhet under gjutningen av en hel vägg. Recepten framgår av Tabell 1 och de skall ses som principiella då de i praktiken varierade aningen från leverans till leverans. Recept typ 1 är det som provades fram för att vara mest tixotrop och recept 2 till en mindre grad tixotrop.

Med dessa betonger kunde två väggar gjutas per dag och således levererades två lass betong per dag. Vid varje leverans kontrollerades i första hand flytsättmålet och betongens stabilitet (se Figur 6). I förekommande fall justerades flytsättmålet med tillsats av flytmedel och vid ett tillfälle tillsattes ett viskositetsreglerande medel (VMA). Målvärde för flytsättmål var i området 600 – 720 mm.

Tabell 1: Principecept för de två använda betongtyperna

Material	Recept	
	Typ 1	Typ 2
Cement ANL, kg/m ³	420	-
Byggcement, kg/m ³	-	400
Limus 40, kg/m ³	130	100
Grus 0-8 mm, kg/m ³	1044	1152
Sten 8-16 mm, kg/m ³	645	569
Vatten, kg/m ³	161,7	188
Glenium Sky 612	Varierande mängd	
Vct	0,385	0,47
Vpt	0,294	0,376
Pastavolym l/m ³	363	351
Vägg nr.	1, 2, 5, 6, 7, 8	3, 4



Figur 6: Peter Billberg styr tömning av betong i en skottkärra för leveranskontroll och från vänster till höger syns även Kamal H. Khayat, David Lange och Ulf Sandström

4.5 Betongens färska egenskaper

I Tabell 2 redovisas samtliga uppmätta färska egenskaper hos de betonger som justerats till önskad konsistens och, som efter godkännande karaktäriserades av alla forskargrupper, göts i respektive vägg.

Tabell 2: Färska egenskaper för de levererade betongerna

Vägg	Flytsättningsmått (mm)	T500 (s)	Lufthalt (%)	Densitet (kg/m ³)	Temperatur (°C)
1	610	2,10	4,2	2238	25,2
2	710	2,6	5,8	2264	21,2
3	600	1,1	7,0	2261	22,6
4	630	1,4	4,7	2334	21,6
5	615	2,4	6,2	2267	22,0
6	650	1,9	7,0	2261	20,8
7	710	2,2	4,0	2343	21,2
8	620	2,5	4,0	2311	20,3

5. RESULTAT

5.1 Väggarnas geometri och tryckcellernas placering

Efter att formarna rivits och väggarna, en efter en, lagts ner på marken så mättes de upp noggrant med lasermätare, avseende såväl väggarnas geometri som sensorernas exakta lägen i förhållande till väggarnas underkant. Dessa mått redovisas i Tabell 3 vid sidan av gjuthastigheten. Notera att vissa mått skiljer sig åt jämfört med formarnas mått. Exempelvis styvnade betongen till under gjutning av vägg 1, och i efterhand kunde konstateras att betongen inte var tillräckligt flytande från 3,75 m och uppåt i formen. Det beslöts då att endast utvärdera denna del av gjutningen under vilken betongen verkligen var självkompakterande. På samma sätt justerades höjderna för vägg 5 och 7. Följaktligen så räknades då gjuthastigheterna om i relation till dessa höjder och de tider då dessa uppnåddes. Detta innebär att den översta tryckcellen (cell 4) för vägg 1 inte räknas med, och inte heller tredje cellen nerifrån för vägg 6, då denna visade ett värde som var mycket dubiöst (långt över hydrostatiskt tryck). De två översta tryckcellerna strejkade vid gjutning av vägg nr 8 men som tur var fungerade de två lägst monterade vilka teoretiskt registrerar de högsta trycken. Det kan alltså konstateras att inalles 28 tryckvärden kan användas vid utvärderingen av modellerna.

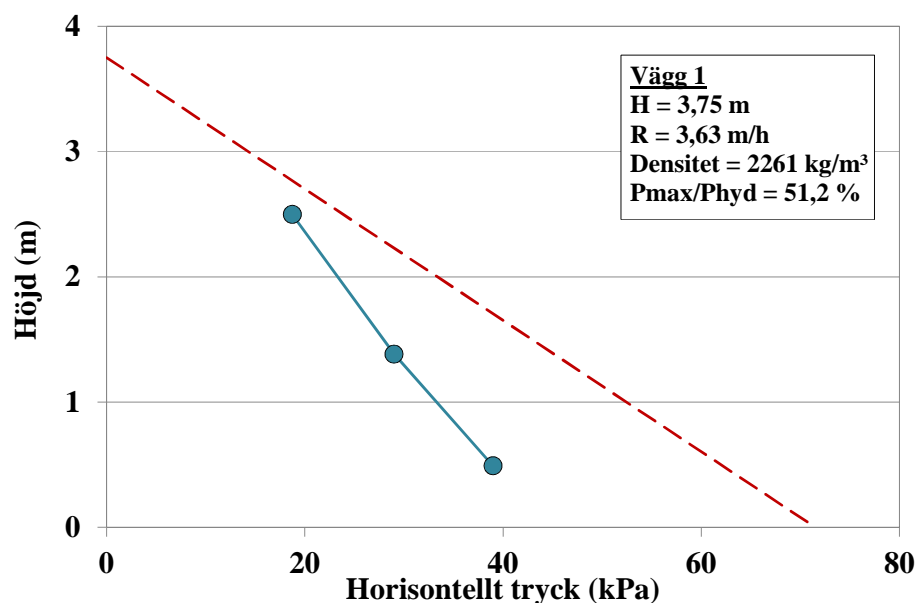
Tabell 3: Väggaras geometri samt gjuthastighet

Parameter	Vägg nummer							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Höjd (m)	3,75	4,11	6,58	4,15	5,51	4,2	5,52	4,15
Tjocklek (m)	0,203	0,201	0,198	0,203	0,2	0,202	0,203	0,4
Gjuthastighet* (m/h)	3,63	5,13	5,06	2,71	6,44	3,27	5,09	3,19
Sensor 1 (m från botten)	0,492	0,497	0,491	0,495	0,493	0,493	0,504	0,500
Sensor 2 (m från botten)	1,384	1,028	1,389	1,008	1,373	1,019	1,384	0,999
Sensor 3 (m från botten)	2,499	2,008	2,503	2,006	2,487	-	2,496	-
Sensor 4 (m från botten)	-	3,105	4,003	3,104	3,994	3,111	4,004	-

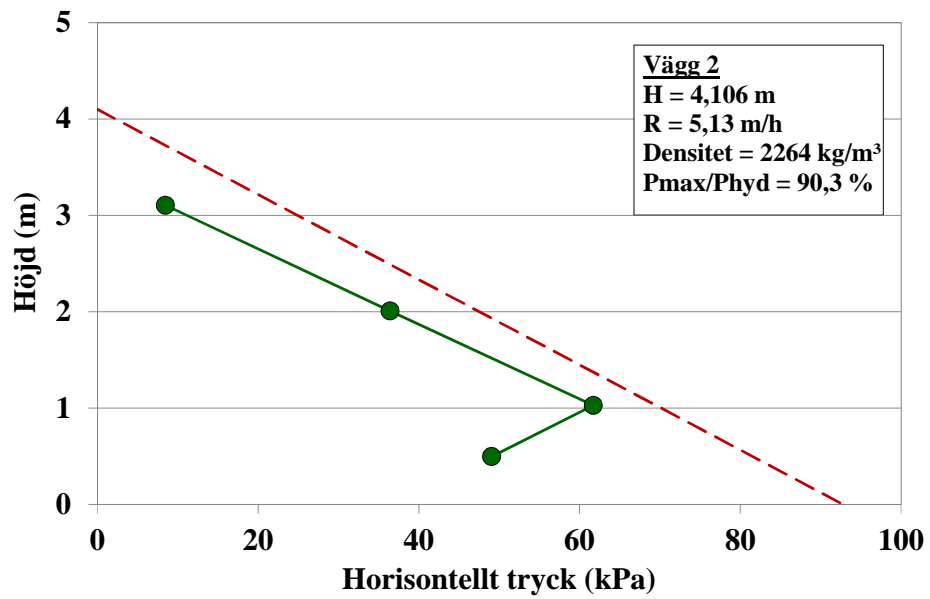
* Gjuthastighet = vägghöjd/tid till fylld väggform

5.2 Formtrycksprofiler och relativa tryck

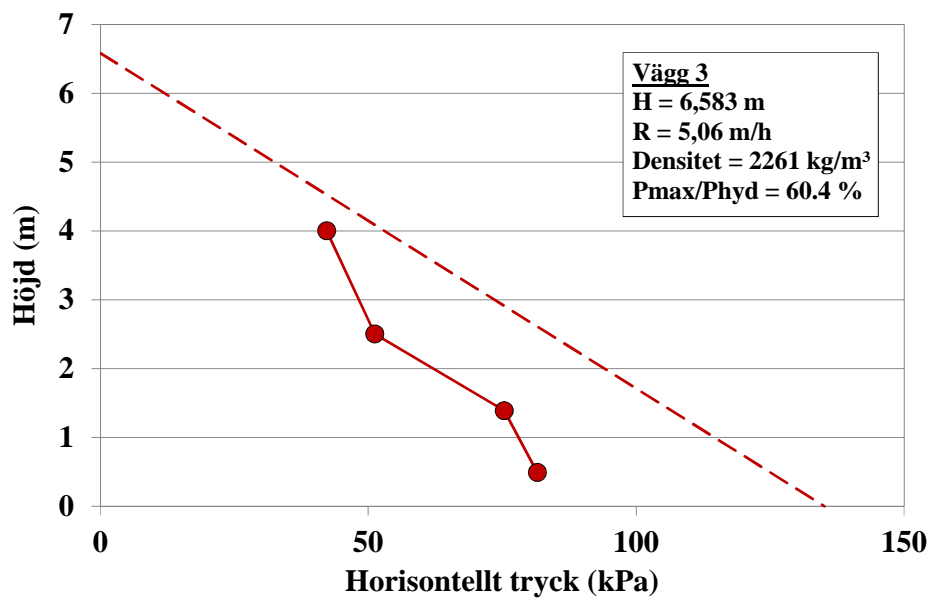
Samtliga uppmätta tryckprofiler redovisas i Figur 7 t.o.m. Figur 14. I samtliga fall motsvarar trycken de högsta uppmätta någon gång under gjutningen. I figurerna redovisas också betongernas densitet, gjuthastigheten och det relativa formtrycket, dvs. det högsta uppmätta trycket relativt det hydrostatiska trycket.



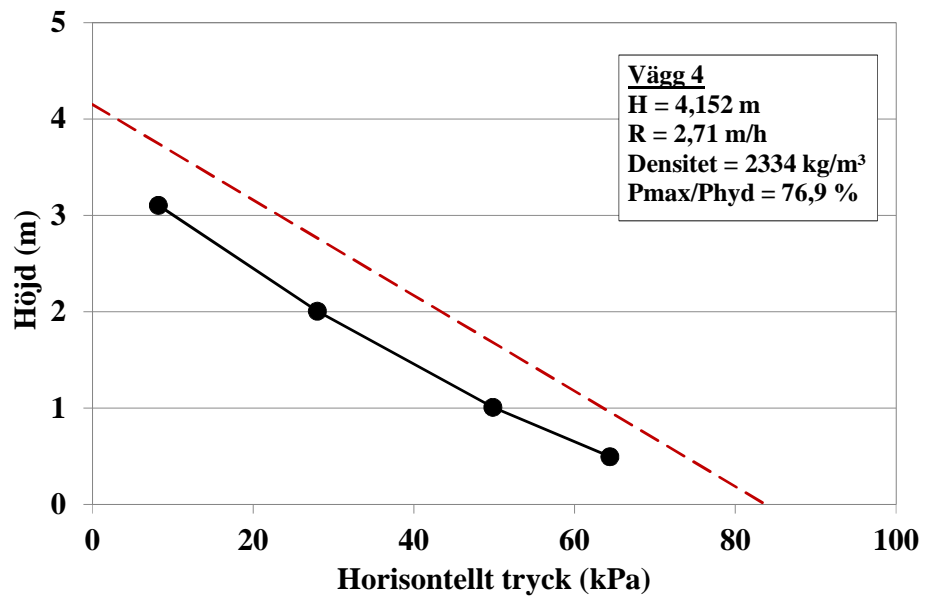
Figur 7: Tryckprofil för vägg 1 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



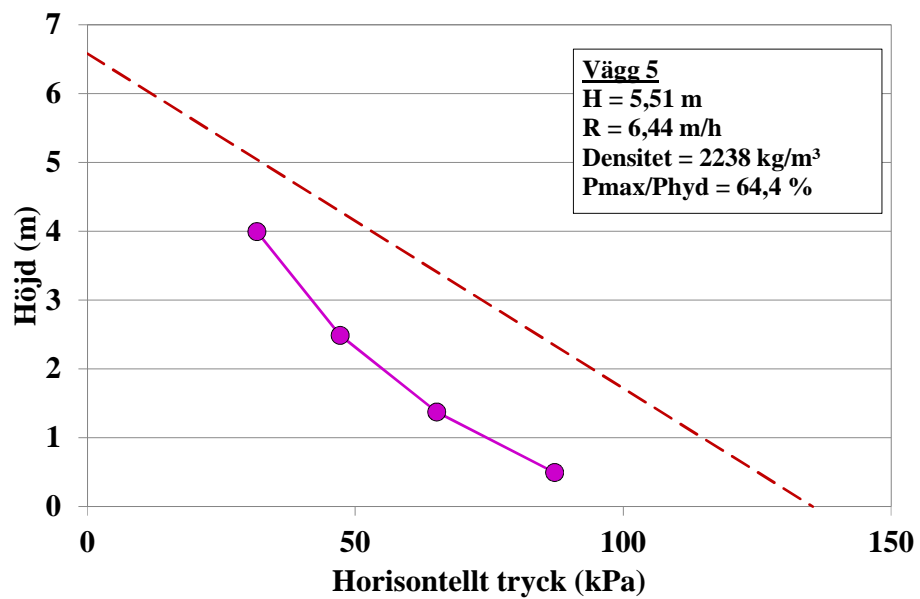
Figur 8: Tryckprofil för vägg 2 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



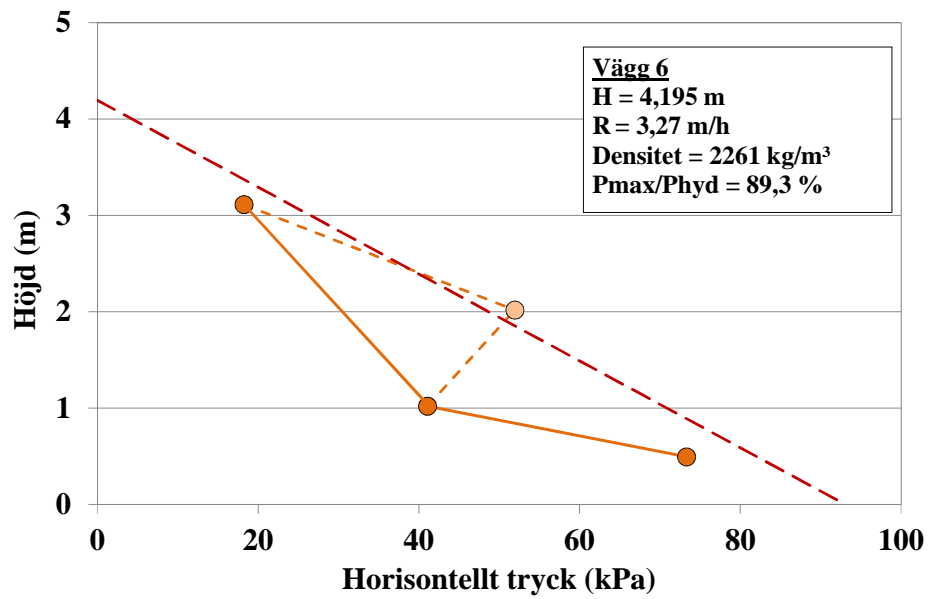
Figur 9: Tryckprofil för vägg 3 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



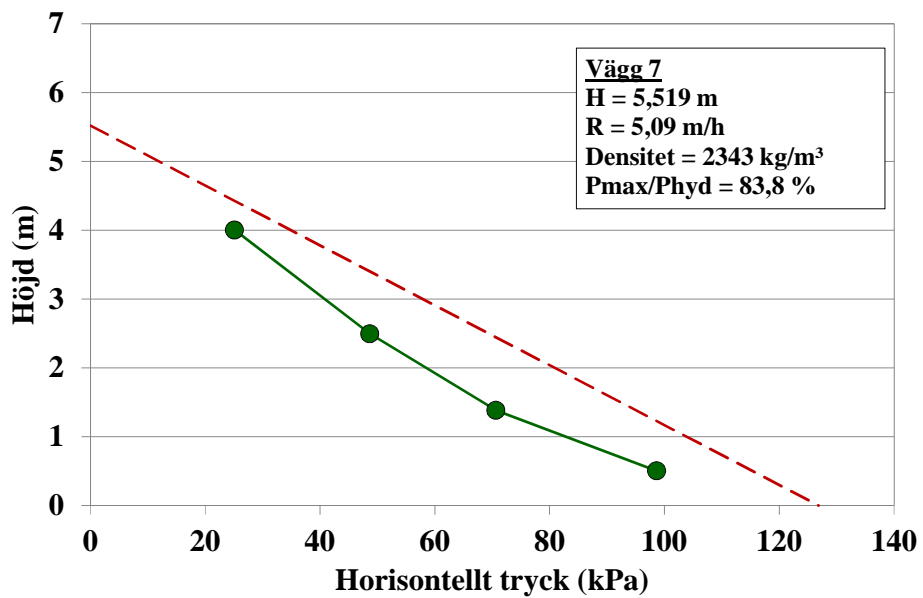
Figur 10: Tryckprofil för vägg 4 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



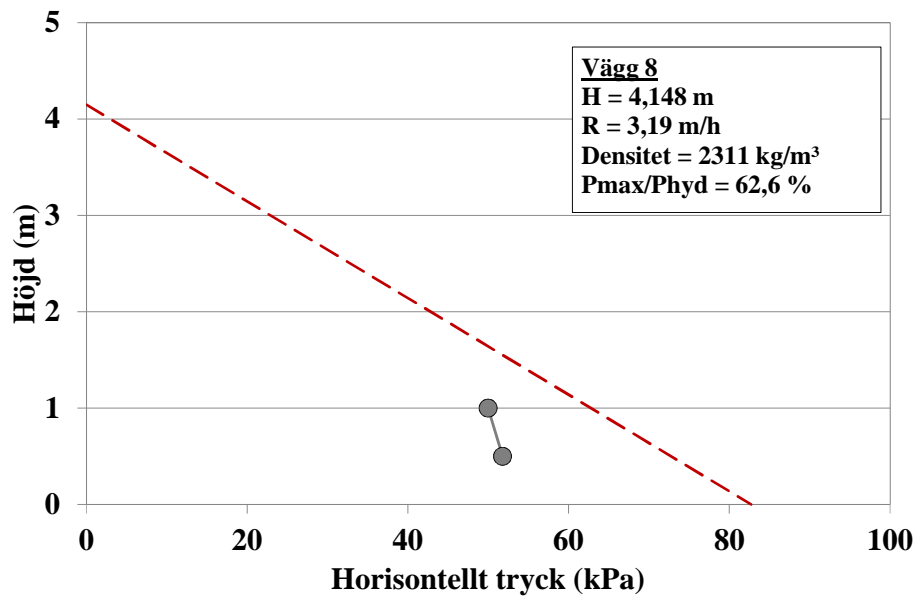
Figur 11: Tryckprofil för vägg 5 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



Figur 12: Tryckprofil för vägg 6 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet samt kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad). Notera att det dubiösa värdet för 3:e cellen nerifrån redovisats men inte medräknats.

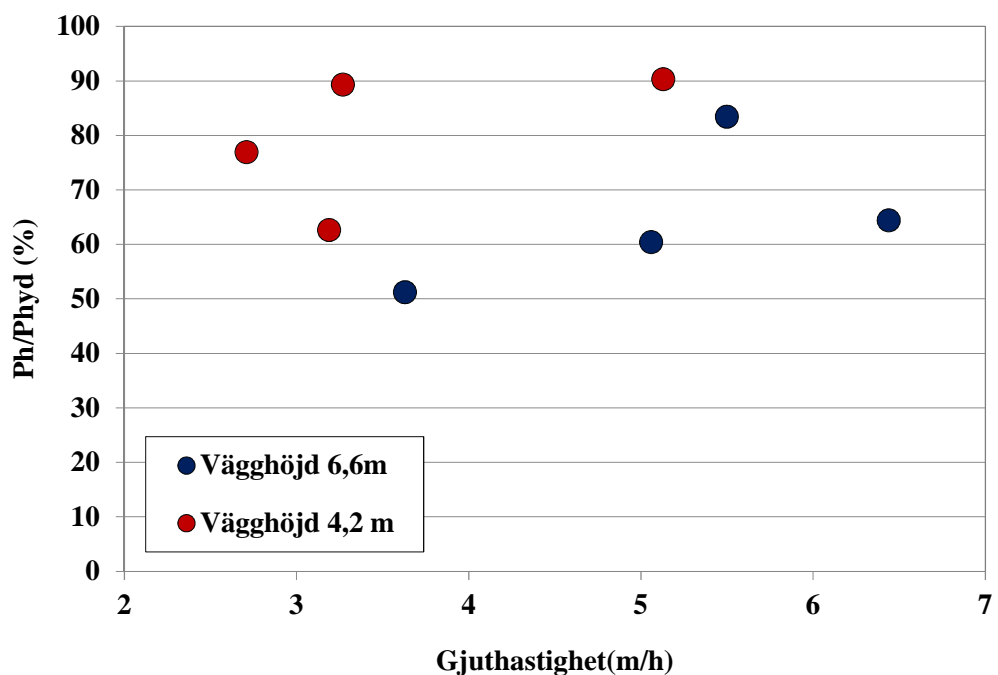


Figur 13: Tryckprofil för vägg 7 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad).



Figur 14: Tryckprofil för vägg 8 motsvarande högsta uppmätta värde i vardera tryckcellen under hela gjutförloppet kurvan motsvarande hydrostatiskt tryck = $\rho g H$ (streckad). Endast de två lägst placerade tryckcellerna fungerade.

Intuitivt så vet vi att ju snabbare vi gjuter desto mindre tid har betongerna som vilar i formen på sig att bygga upp en struktur och följaktligen bör då ett högre formtryck erhållas. Men om vi plottar det relativa formtrycket mot aktuella gjuthastigheter (Figur 15) för samtliga gjutningar så ser vi att riktigt så enkelt är det inte. Detta är faktiskt bakgrunden till frågorna om formtryck då man gjuter med SKB i det att inga enkla traditionella formtrycksmodeller håller måttet.



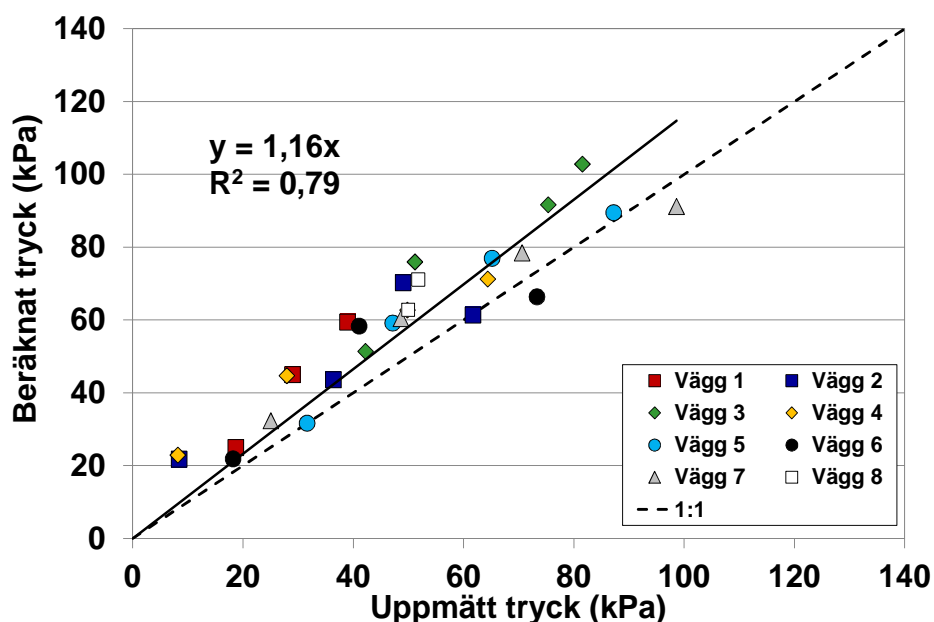
Figur 15: Uppmätta relativa formtryck i relation till gjuthastigheter

Istället är det betongernas egenskaper i vila (de tixotropa egenskaperna) som också styr vilket formtryck som uppstår och de måste tas hänsyn till i framtida formtrycksmodeller. Figur 15 visar också att väggarnas höjd inte påverkar formtrycket på ett sätt som skulle kunna förmodas (dvs. högre tryck för högre väggar). Istället kan en rad olika relativa formtryck erhållas (här mellan ca 50 och 90 % av det hydrostatiska trycket) vid gjutning med hastigheter mellan 2,7 och 6,4 m/h och oavsett vägghöjd.

5.3 Utvärdering av formtrycksmodellerna

I Figur 16 t.o.m. Figur 25 redovisas samtliga resultat för var och en av de tio i avsnitt 3.1 - 3.7 beskrivna modellerna. Utvärderingen som presenteras i figurerna är beräknade tryck för vardera tryckcellen plottade mot de uppmätta trycken. I varje diagram har linjär regression gjorts avseende samtliga värden och den har styrts mot origo. Således erhålls från regressionen dels linjens lutning vilken kan jämföras med den 1:1-linje (motsvarande 100 % precision hos modellerna) som också plottats i varje diagram, dels korrelationskoefficienten, R^2 , som motsvarar spridningen av resultaten i relation till regressionslinjen. Regressionsanalysen redovisas dessutom separat i avsnitt 5.3.

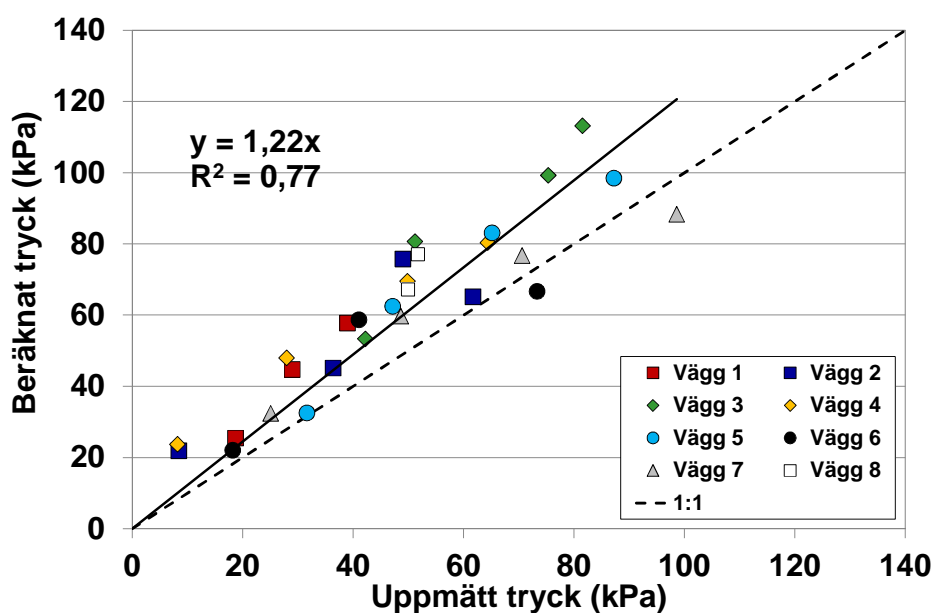
Resultat för modellen utvecklad av Khayat och Omran [4] visas i Figur 16. De beräknade trycken avviker aningen från 1:1-relationen (men på säkra sidan) och regressionslutningen blir 1,16. Med en korrelationskoefficient, R^2 , på 0,79 kan man konstatera att modellen på ett nöjaktigt sätt förutser de korrekta, och uppmätta, trycken.



Figur 16: Resultat för modell utvecklad av Khayat och Omran [4]

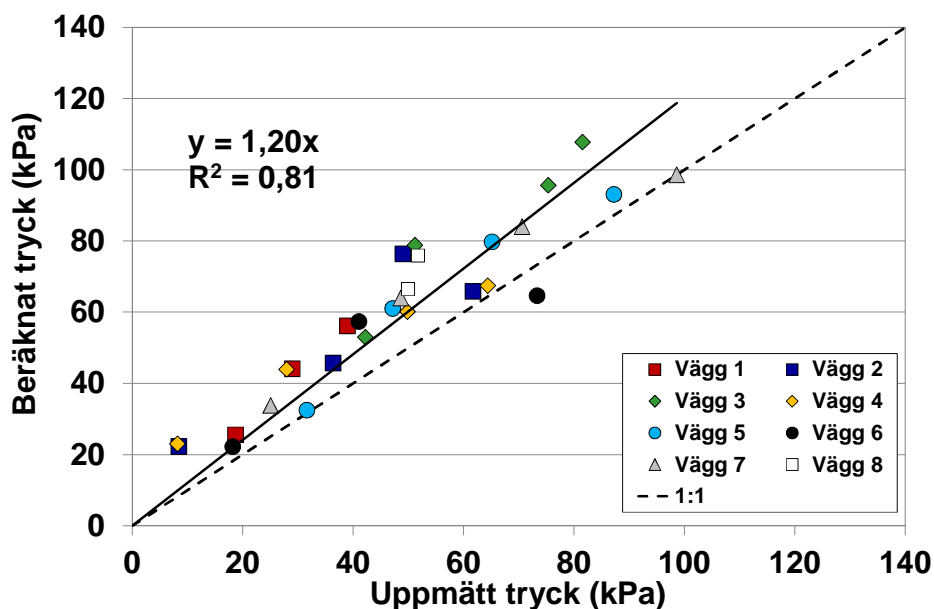
I Figur 17 ser vi resultaten där den strikt teoretiska modellen, utvecklad av Ovarlez och Roussel [6], använts för att förutse formtrycken. I detta fall skall observeras att värdena för strukturuppbyggnaden som ingår i modellen inte uppmättes av Nicolas Roussel som deltog i

försöken. Istället har han "lånat" de värden som Khayat och Omran uppmätte för deras modell. Här användes 28 resultat och regressionen ger en lutning på 1,22 och en spridning uttryckt som R^2 på 0,77.



Figur 17: Resultat för modell utvecklad av Ovarlez och Roussel [6]

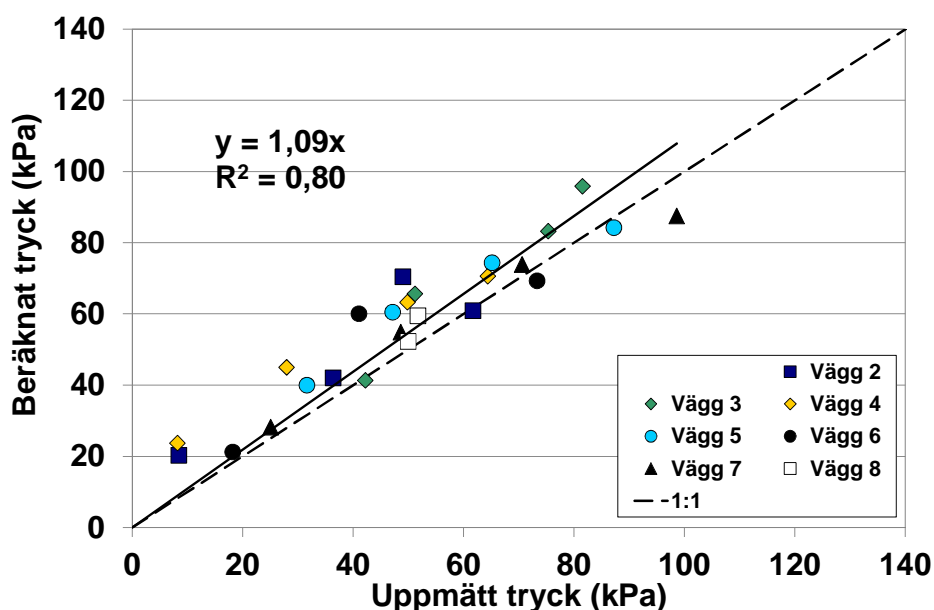
Perrot m.fl. [9] inkluderar också inverkan av armeringen i sin modell, vilken också karakteriserar strukturuppbyggnaden på sitt eget sätt (avsnitt 3.4). Resultaten för denna modell redovisas i Figur 18.



Figur 18: Resultat för modell utvecklad av Perrot m.fl. [9]

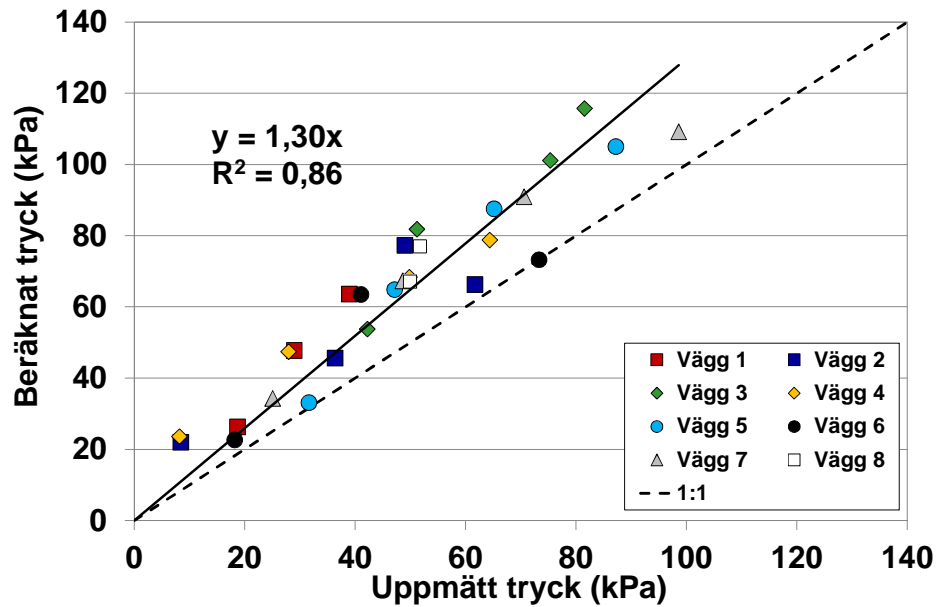
Resultaten jämfört med förra modellen indikerar att man kommer aningen närmre 1:1-linjen och ökar precisionen om inverkan av armeringen räknas in i modellen. Regressionen ger en lutning på 1,20 och en spridning uttryckt som R^2 på 0,81. Notera att även denna utrustning för strukturuppbyggnad inte fungerade som tänkt vid första dagens gjutningar (vägg 1 och 2), så de "lånade" också resultat i form av strukturuppbyggnad av Khayat och Omran för beräkning av tryck för dessa väggar.

Modellen utvecklad av Lange and Tejeda-Dominguez [5,10] är också väl fungerande, vilket framgår av Figur 19. Men tyvärr fungerade inte det instrumenterade röret vid gjutning av vägg nummer 1, så för denna modell, till skillnad från de övriga, kan endast 25 värden utvärderas. Regressionen resulterar i en lutning på 1,09 och en relativt ringa spridning som $R^2 = 0,80$ indikerar.



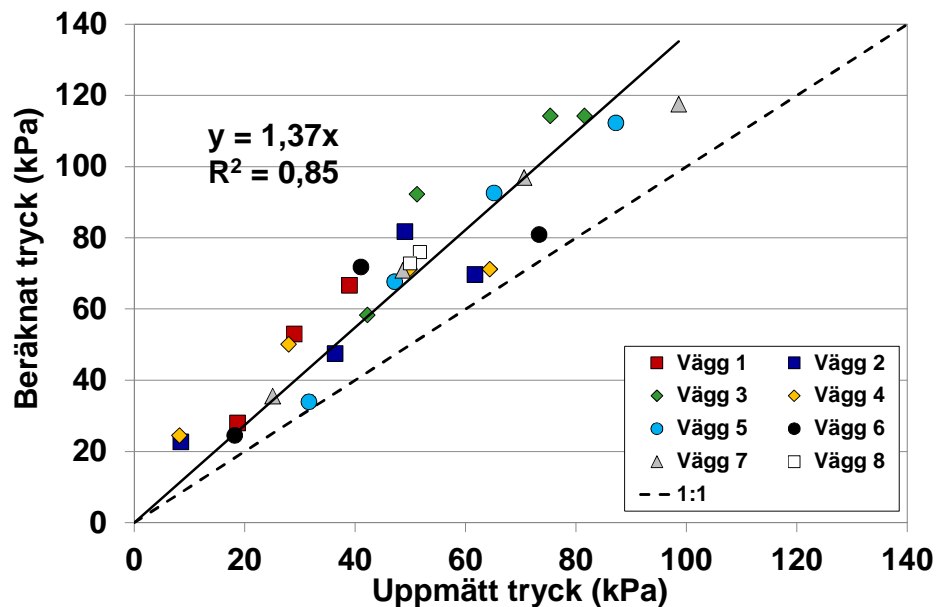
Figur 19: Resultat för modell utvecklad av Lange och Tejeda-Dominguez [5,10]

Gardner m.fl. [7] använder en helt egen metod i sin modell; tiden för ostört flytsättnått att nå noll. Inte desto mindre kan även denna modell anses tillförlitlig nog i det att regressionen, se Figur 20, ger en precision på $R^2 = 0,86$ och en lutning på 1,30. Med andra ord en konservativ modell.

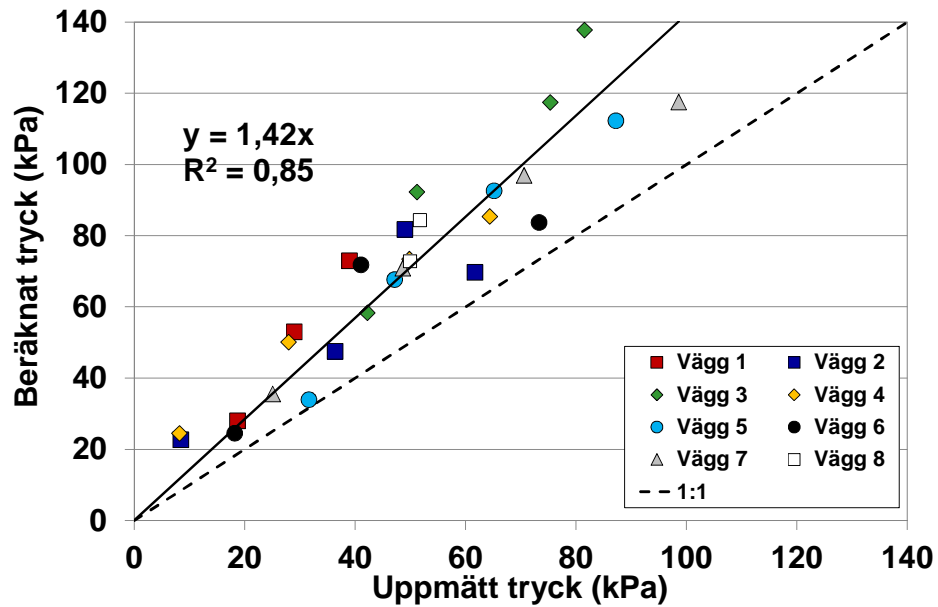


Figur 20: Resultat för modell utvecklad av Gardner m.fl. [7]

Resultaten från de båda sätten att förutse formtryck enligt DIN 18218 [8,13] redovisas i Figur 21 (medelvärden) och Figur 22 (dimensioneringsvärden). Liksom de tidigare redovisade modellerna kan konstateras att även dessa modeller fungerar nöjaktigt. För båda modellerna hamnar R^2 på samma höga värde 0,85, medan lutningarna överensstämmer med vad som tänkts, dvs. den ökar för konstruktionsvärdena eftersom där ingår ökad säkerhet i form av en partialkoefficient för diverse osäkerheter. Lutningarna blir 1,37 för medelvärden och 1,42 för konstruktionsvärden.

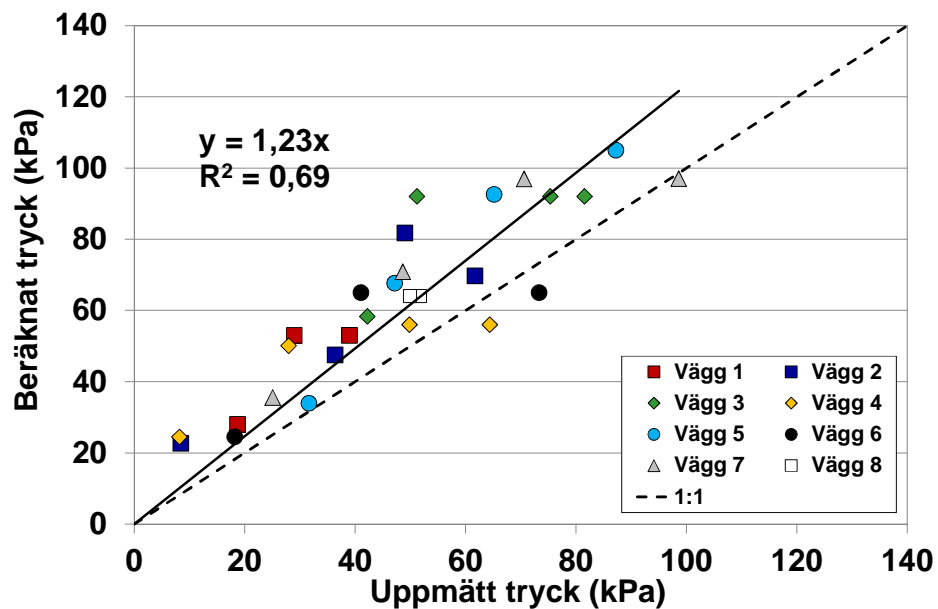


Figur 21: Resultat för modell representerande DIN 18218 – medelvärden [13]

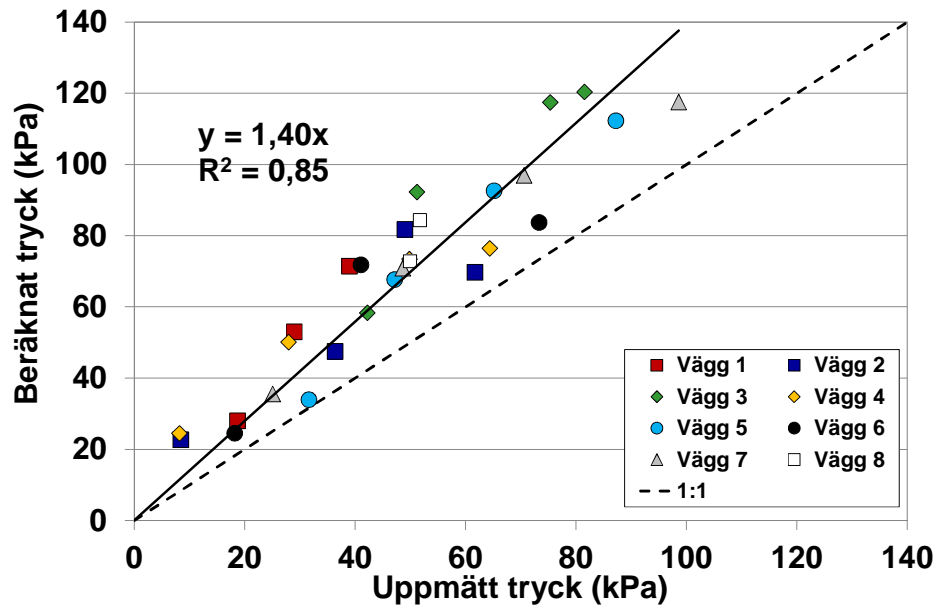


Figur 22: Resultat för modell representerande DIN 18218 – Dimensioneringsvärden [8]

De två modellerna som utvecklats av Proske [11,12] baseras också på den siloteori som härrör från 1885 [17] och resultaten visas i Figur 23 (medelvärden) och Figur 24 (konstruktionsvärden). Liksom för DIN 18218 ökar regressionslinjen från 1,23 för medelvärden till 1,40 för dimensioneringsvärden. Dessutom ökar precisionen från $R^2 = 0,69$ till $R^2 = 0,85$ vid samma jämförelse mellan modellerna.

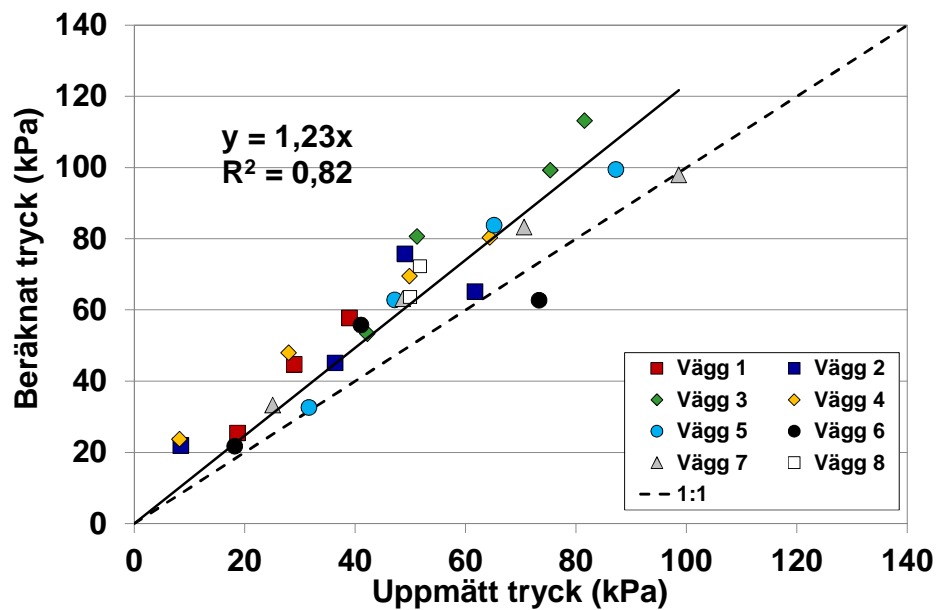


Figur 23: Resultat för modell utvecklad av Proske – medelvärden [11]



Figur 24: Resultat för modell utvecklad av Proske – Dimensioneringsvärden [12]

Modellen som utvecklats av Beitzel [11,12] baseras liksom flera andra (se avsnitt 3) på den siloteori som härrör från 1885 [16] och resultaten visas i Figur 25. Regressionslinjens lutning är 1,23 och precisionen $R^2 = 0,82$.



Figur 25: Resultat för modell utvecklad av Beitzel [14]

5.4 Sammanställning av regressionsanalyser

En sammanställning av värdena från den linjära regressionsanalysen gjord för vardera av de tio modellerna redovisas i Tabell 4. Klart är att alla modeller är konservativa (dvs. överskattar trycken) samt att de i princip är likvärdigt nöjaktiga att förutse formtrycken.

Noterbart är att de flesta modellerna, även om de över hela det studerade tryckområdet har en bra precision, förmår att bättre förutse trycken i det lägre området än i det högre området. Detta kan resultera i ett behov att i framtida standarder skapa olika säkerhetsparametrar i olika tryckintervall. Fältstudier kommer att ge statistiskt underlag för sådana nyanser.

Tabell 4: Regressionsanalys av modellernas beräknade tryck

Modell	Lutning	R ²
Khayat och Omran [4]	1,16	0,78
Ovarlez och Roussel [6]	1,22	0,77
Lange och Tejada-Dominguez [5,10]	1,09	0,80
Perrot, m.fl. [9]	1,20	0,81
Gardner m.fl. [7]	1,30	0,86
DIN 18218 - Medelvärden [13]	1,37	0,85
DIN 18218 - Dimensioneringsvärden [8]	1,42	0,85
Proske - Medelvärden [11]	1,23	0,69
Proske - Dimensioneringsvärden [12]	1,40	0,85
Beitzel [14]	1,23	0,82

5.5 Uppmätta värden för respektive metoders nyckelparametrar

För information om hur nyckelparametrarna ingår i respektive modell hänvisas till avsnitt 3 i rapporten. Nedan redovisas de värden som för vardera modellen uppmättes under försöken. Notera att de fyra tyska modellerna, DIN och Proske, alla använder sig av samma uppmätta tillstyvnadstid. Samtliga värden redovisas i Tabell 5 tom. Tabell 10. Notera att samtliga värden på strukturuppbyggnaden som ingår i modellen framtagen av Ovarlez och Roussel [6] tagits från mätningarna gjorda av Khayat och Omran [4]. Detta gäller även för modellen utarbetad av Beitzel [14] avseende vägg 1-4 samt för modellen av Perrot m.fl. [9] avseende vägg 1 och 2.

Tabell 5: Värden på statiska flytgränsspänningen och strukturuppbyggnaden uppmätta av Khayat och Omran [4]

Vägg nr	$\tau_{0rest @ 15 \text{ min}}$	$\tau_s(t), \text{ Pa/min}$
1	410	15,95
2	176	5,81
3	266	9,88
4	215	2,31
5	307	11,20
6	254	9,55
7	319	18,46
8	294	9,09

Tabell 6: Värden på strukturuppbyggnaden uppmätta av Beitzel [14]

Vägg nr	$C_{thix}, \text{ Pa/min}$
5	10,33
6	12,69
7	11,9
8	16,77

Tabell 7: Värden på strukturuppbyggnaden uppmätta av Perrot m. fl. [9]

Vägg nr	$\tau_s(t), \text{ Pa/min}$
3	11,1
4	10,1
5	14,5
6	10,2
7	10,7
8	11,2

Tabell 8: Värden på tiden till noll flytsättmått uppmätta av Gardner m. fl. [7]

Vägg nr	t_0
1	4,03
2	9,69
3	4,19
4	11,34
5	6,61
6	8,26
7	9,32
8	8,15

Tabell 9: Värden för modellen framtagen av Lange och Tejeda-Dominguez [5, 10]. Notera att utrustningen inte fungerade för vägg 1

Vägg nr	C_0	α	a
2	0,944	12	0,32
3	0,861	12	0,40
4	1,039	12	0,80
5	0,899	12	0,75
6	0,903	12	0,40
7	0,840	12	0,70
8	0,870	12	0,50

Tabell 10: Värden på tillstyvnadstiden ingående i modellerna framtagna av Proske [11, 12] samt i DIN 18218:2010-01 [13]

Vägg nr	t_E, h
1	4,1
2	5,8
3	5,5
4	5,5
5	4,6
6	5,5
7	5,6
8	5,1

6. REKOMMENDATIONER

Det framgår med önskvärd tydlighet att samtliga modeller fungerar på ett nöjaktigt sätt. Det är alltså inte rimligt att redan här och nu förkasta någon modell och inte heller framhålla någon som avsevärt bättre än någon annan. Vi kan istället fokusera på hur modellerna ser ut och hur de centrala nyckelparametrarna som beskriver betongens egenskaper i vila tas fram.

Modellernas karaktär varierar från mycket enkla till mer komplicerade. Några är dessutom formulerade med mycket intrikata formler medan andra är enkelt beskrivna. Men i och för sig tas ju idag även komplicerade matematiska modeller lätt om hand av datorer och en bra programmerare, så det kanske inte är något direkt hinder. Detta gäller kanske speciellt modellerna framtagna av Proske [11, 12], som med mycket komplicerade matematiska formler trots allt har den kanske enklaste parametern att fastställa, dvs. tillstyvnadstiden [13].

Om man fokuserar ytterligare på enkelhet så framstår även metoden framtagen av Gardner m.fl. [7] som en bra kandidat. Utrustningen är samma som för flytsättningsmätning vilket alla torde ha tillgång till, men här bör man åtminstone ha tre eller fyra sättkoner där betong kan vila olika lång tid.

Fokuserar man på precision så kan man konstatera att modellen som presenteras av Lange och Tejeda-Dominguez [5,10] är intressant. Denna metod är dessutom helt operatörsberoende vilket inte skall underskattas. Metoden innebär att man håller betong i ett instrumenterat rör och låter en sensor mäta trycket över natten. Sedan behövs ett relativt enkelt datorprogram och man är klar.

Alla modeller utom en används främst för att i förväg karakterisera betongrecept. Detta påverkar bevakningen av formtrycket i realtid då man gjuter. Betongerna kan ju variera från lass till lass relativt det som ligger till grund för formtrycksberäkningarna. Modellen framtagen av Khayat och Omran [4] har den centrala parametern statistiska flytgränsspänningen som mäts vid exakt 15 minuters vila (Ekv. 1). Denna modell medger alltså att man kan förutse trycket redan efter 15 minuter. Gjuter man extremt snabbt hinner man inte med, men om gjutning (inklusive förberedelser av pump mm.) tar bortåt 15 minuter vet man mer hur gjutningen kommer att resultera avseende formtryck.

Vi återkommer igen till frågan vad som är en bra modell. Den skall givetvis vara bra på att förutse trycket, vilket alla visar att de är. Men skall den också vara mycket enkel, och skall den dessutom vara operatörsberoende? Ingen modell svarar ja på samtliga dessa tre frågor, men i princip alla svarar ja på två av frågorna. Tyvärr är enkla modeller och billiga sätt att mäta nyckelparametern förknippade med ett starkt beroende av operatören/operatörerna. De två modeller som kräver enkel utrustning och samtidigt också enklast beräkningar, dvs. Gardner m.fl. [7] och DIN 18218:2010-01 [13] beskrivs mer i detalj i Bilaga 1.

Denna rapport skall under inga omständigheter användas såsom någon officiellt accepterad ersättning till gällande formbyggnadshandbok. Orsaken är självklar i det att detta projekt har karaktären av att utvärdera befintliga hypoteser och beräkningsmodeller med endast åtta försök. Åtta försök kan räcka för en utvärdering men däremot inte för att säkerställa modellernas

giltighetsområde, statistiska tillförlitlighet eller vilka konfidensintervall och partialkoefficienter som bör användas. För detta skulle långt fler försök behövas. Ett större, gärna nationellt, projekt skulle därför kunna ge svar på det som inte kunde besvaras i detta projekt. Nämligen hur enkelt och tillförlitligt man kan fånga upp de värden på parametrarna som ingår i respektive modell och därmed modellernas tillförlitlighet i form av ny standard.

Till dess att ny standard framtagits för beräkning av formtryck vid gjutning med SKB skall formtrycket alltid följas upp vid dessa gjutningar. Riskerna med att förlita sig på en icke statistiskt säkerställd användning av en modell kan bli mycket kostsamma och även fatala.

7. SLUTSATSER

Från detta projekt där åtta väggar med olika höjd och olika tjocklek gjutits med olika typer av SKB och med olika gjuthastigheter under fyra intensiva dagar, i syfte att utvärdera olika formtrycksmodeller, kan följande slutsatser dras:

1. Trots att väggarna göts med gjuthastigheter mellan 2,7 och 6,4 m/h, dvs. att väggarna göts färdigt på mellan 48 och 102 minuter, så resulterade alla formtrycken i att de landade på mellan 50 % och 90 % relativt hydrostatiskt tryck. Inget tryck nådde alltså det hydrostatiska trycket.
2. Betongens färiska konsistens och gjuthastigheten räcker inte för att beräkna formtryck vid gjutning med SKB. Ingen direkt korrelation mellan gjuthastighet och formtryck kunde påvisas, utan istället måste beteendet i vila också beaktas. I samtliga utvärderade metoder ingår denna parameter på ett eller annat sätt.
3. Tio olika formtrycksmodeller utvärderades, och även om de baseras på olika nyckelparametrar såsom strukturuppbyggnad, konsistensförlust, tillstyvnadstid eller tryckminskning efter färdig gjutning, så är alla kapabla att på ett nöjaktigt sätt beräkna och förutse de verkliga formtrycken. Uppenbart är att alla dessa olika parametrar på något sätt beskriver beteendet i vila.
4. Alla modeller är så jämförbara i precisionen att ingen av dem kan rekommenderas som bäst och heller finns det ingen som kan uteslutas på grund av bristande kapacitet. Detta innebär att grund för val av metod handlar om med vilken enkelhet, och tillförlitlighet, respektive modells centrala nyckelparameter kan bestämmas.
5. Tills dess att nya nationella standarder som tar hänsyn till SKB kan skrivas så kommer det att krävas fler fältförsök. Inte bara direkt för att utvärdera modellernas giltighet, utan snarare för att få grepp om modellernas operatörsberoende samt vilka partialkoefficienter för säkerhet man skall häkta på respektive modell man väljer att använda. Till detta behövs ett större statistiskt underlag än det som de åtta väggarna i detta projekt erbjuder. Inte minst bör man utreda mer hur varierande flytmedelsdoser och andra åtgärder påverkar modellerna och därmed formtrycket [20]. Notera alltså att denna rapport under inga omständigheter skall användas såsom någon officiellt accepterad ersättning till gällande formbyggnadshandbok

8. MEDVERKANDE

Det har nämnts tidigare att deltagarna under veckan då detta projekt genomfördes kommer från olika delar av Nordamerika och Europa. En del av dem syns i Figur 26 där de poserar framför formarna efter att sista gjutningen genomförts.



Figur 26: Det var många personer som var med under veckan som projektet genomfördes. Här är en del av dem uppställda framför formarna och från vänster till höger ser vi: Ahmed F. Omran, George Charitou, Stefan Trillkott bakom Rex Donahey, Robert Quattrociocchi framför Alexander Eriksson-Brandels, Yannick Vanhove, John Gardner, Tilo Proske, Björn Freund, Lloyd Keller, Marija Golubeva, Daniel Bäckman, Peter Billberg, Kamal H. Khayat, Marc Beitzel, Nicolas Roussel, Olaf Leitzbach, Guillaume Grampeix, Arnaud Perrot och Sofiane Amziane. På bilden saknas David Lange, Åke Engström och Patrick Rogers (som här agerar fotograf)

LITTERATURFÖRTECKNING

1. De Shutter, G.; Bartos, P.J.M.; Domone, P.; and Gibbs, J., "Self-Compacting Concrete", Wittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK, ISBN 978-1904445-30-2, 2008, 296 pp.
2. Daczko, J.A., "Self-Consolidating Concrete: Applying What We Know", Spon Press, New York, USA, 2012, 289 pp.
3. Billberg, P., Silfwerbrand, J. and Österberg, T., "Form Pressures Generated by Self-Consolidating Concrete", Journal of Concrete International, Vol. 27, Issue 10, October 2005, pp. 35-42.
4. Khayat, K.H., and Omran, A.F., "Field Monitoring of SCC Formwork Pressure and Validation of Prediction Models", Journal of Concrete International, Vol. 33, Issue 6, June 2011, pp. 33-39.
5. Lange, D.A.; Birch, B.; Henchen, J.; Liu, Y-S., Tejeda-Dominguez, F. and Struble, L., "Modeling Formwork Pressure of SCC", Proceedings of the 3rd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Ed. S. P. Shah, Chicago, USA, 2008, pp. 295-300.
6. Ovarlez, G., and Roussel, N., "A Physical Model for the Prediction of Lateral Stress Exerted by Self-Compacting Concrete on Formwork", RILEM Materials and Structures, Vol. 39, No. 2, 2006, pp. 269-279.
7. Gardner, N.J.; Keller, L.; Quattrociochi, R; and Charitou, G., "Field Investigation of Formwork Pressures using Self-Consolidating Concrete", Concrete International, Vol. 34, No.1, January 2012, pp.41-47.
8. Graubner, C.-A.; Boska, E.; Motzko, C.; Proske, T.; and Dehn, F., "Formwork Pressure Induced by Highly Flowable Concrete – Design Approach and Transfer in Practice", Structural Concrete Journal of the fib, Ernst & Sohn Verlag, 1/2012.
9. Perrot, A.; Amziane, S.; Ovarlez, G.; and Roussel, N., "SCC Formwork Pressure: Influence of Steel Rebars", Cement and Concrete Research, Vol. 39, Issue 6, 2009, pp. 524-528.
10. Tejeda-Dominguez, F., "Laboratory and Field Study of Self Consolidating Concrete Formwork Pressure", M.Sc. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2005.
11. Proske, T., "Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zu Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung (Formwork Pressure using Self-Compacting Concrete)", PhD-thesis, Technische Universität Darmstadt, Germany, 2007, 310 pp.
12. Proske, T., and Graubner, C.-A., "Pressure on Formwork Using SCC – Experimental Studies and Modeling", In: Proceedings of the Fifth RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, 2007, pp. 473-478.

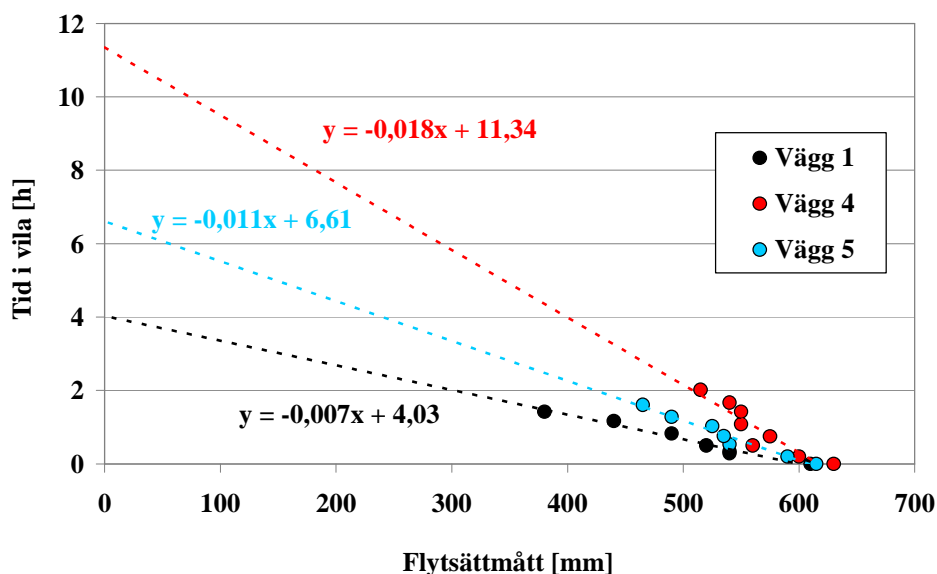
13. DIN 18218:2010-01: "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen (Pressure of Fresh Concrete on Vertical Formwork)", Beuth Verlag, 2010.
14. Beitzel, M., "Modeling Fresh Concrete Pressure of Normal and Self-Compacting Concrete", Proceedings of SCC2010, the 6th International RILEM Symposium on SCC and the 4th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Ed. K.H. Khayat and D. Feys, Montreal, Quebec, Canada, 2010, pp. 243-254.
15. Omran, A.F., and Khayat, K.H., "Portable Pressure Device to Evaluate Formwork Pressure Exerted by Flowable Concrete". Accepted in Journal of Materials in Civil Engineering. Published online (27 August 2012), 37 pp. (in press).
16. Omran, A.F., Naji, S., and Khayat, K.H., "Portable Vane Test to Assess Structural Build-Up at Rest of Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 108, No. 6, 2011, pp. 628-637.
17. Janssen, H.A., "Versuche über Getreidedruck in Silozellen", VDI Zeitschrift, Vol. 39, 1885, pp. 1045-1049.
18. Amziane, S.; Perrot A.; and Lecompte, T., "A novel settling and structural build-up measurement method", Measurements Science and Technology, Vol.19, 105702, 8 p (2008).
19. Tchamba, J.C.; Amziane, S.; Ovarlez, G.; and Roussel N., "Lateral Stress Exerted by Fresh Cement Paste on Formwork : Laboratory Experiments", Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2006, pp. 59-66.
20. Kim, J. Hong, Beacraft, M. W., Kwon, S.H.and Shaw, S.P., "Simple Analytical Model for Formwork Design of Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, Vol.108, No. 1, 2011, pp. 38 – 45.
21. Billberg, P. och Österberg, T., "Självkompakterande betong - användningsteknik", CBI rapport 2:2002, Stockholm 2002.
22. "DIN Standard on Formwork Pressures Updated", Concrete International, Vol. 32, No.6, June 2010, pp.27-29.
23. McCarthy, R. and Silfwerbrand, J., "Comparison of Three Methods to Measure Formwork Pressure When Using SCC", Journal of Concrete International, Vol. 33, Issue 6, June 2011, pp. 27-32.

BILAGA 1 - EXEMPEL PÅ TVÅ ENKLA MODELLERS ANVÄNDNING

Denna bilaga ämnar att mer i detalj beskriva de modeller som kräver enklast utrustning. Dessa modeller är 1) den som framtagits av Gardner m.fl. [7] där i princip endast ett antal sättkoner behövs samt 2) den som beskrivs i DIN18218:2010-01 [13] och som bygger på tillstyvnadstid. Man bör hålla i minnet att båda modellerna avser att i förväg karakterisera ett betongrecept. Med andra ord bör recept alltså karakteriseras vid olika temperaturer då denna parameter inte ingår i formlerna.

1) Gardner m.fl.

Modellen utvecklad av Gardner m.fl. beskrivs i avsnitt 3.5 i rapporten. Som där anges fokuserar den på tiden som behövs för att betongens flytsättningsmått skall reduceras till noll, t_0 (h). Beroende på total gjuttid relativt t_0 så gäller olika formler vilka visas i avsnitt 3.5. De värden på t_0 som uppmättes för vardera väggjutningen redovisas i rapportens Tabell 8. I Figur B1 ges några exempel på hur flytsättningsmättet minskade med tiden för vilande betonger. Om man använder exempelvis programmet Microsoft Excel[®] så ger linjära regressioner direkt tiden för noll flytsättningsmått, dvs. t_0 (här 4,0, 11,3 samt 6,6 timmar för respektive vägg 1, 4 och 5).



Figur B1: Tre exempel på vilande betongers minskande flytsättningsmått

Själva förfarandet vid provning är enkelt. Utrustningen består av ett antal sättkoner, förslagsvis minst tre, ett horisontellt underlag samt tyngder för att dels hålla ner konerna som är fyllda med betong, dels för att täcka för betongens överyta som inte ska kunna torka. Exemplet i Figur B2 är taget från [21] och visar en typisk försöksuppställning. Man bör tillse att underlaget som konerna står på inte torkar ut så att det påverkar betongens utbredning vid respektive provning. Efter färdig blandning så mäts flytsättningsmått och tidräkningen startar. Fyll samtliga koner med homogen SKB och sätt på tyngderna. Efter olika långa tider i vila lyfts vardera konen med vilande betong och flytsättningsmått mäts. Plotta i exempelvis Microsoft Excel[®] flytsättningsmått mot tid i vila och gör en

linjär regression liksom visas i Figur B1. Härvid fås värdet på t_0 i timmar. Beroende på gjuthastighet (dvs. total gjuttid) så väljs rätt formel enligt avsnitt 3.5 i rapporten och maximalt horisontellt formtryck, P_{max} (kPa), beräknas.



Figur B2: Exempel på försöksuppställning för utvärdering av vilande betongers minskande flytsättningsmått [21]

2) DIN18218:2010-01

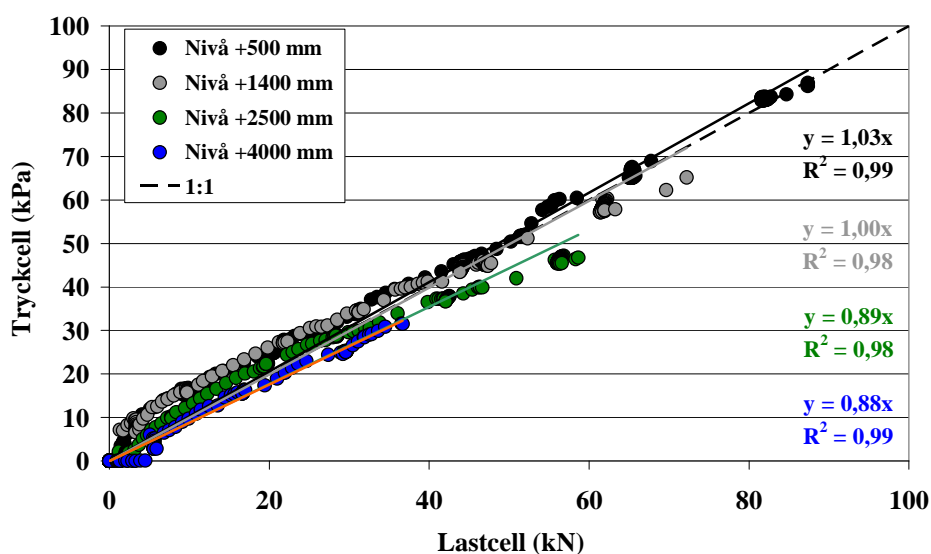
Formlerna för medelvärde respektive karakteristiskt dimensioneringsvärde som ingår i denna modell är redovisade i rapportens avsnitt 3.6. Den enda parameter som behövs för denna modell är tillstyvnadstiden, t_E (h). Istället för att använda vicatnål eller liknande skall här ett enklare förfarande beskrivas. Utrustning är en polyetylenpåse som gott och väl rymmer åtta liter betong, en hink typ en betonghink (rulle) samt en frisk tumme på endera handen. Tummen ska motsvara själva vicatnålen vid provningen. Förfarandet innebär att man fyller påsen med åtta liter färsk betong, tillsluter påsen väl och placerar den i hinken. Var 30:e minut utvärderas sedan betongens konsistens. Påsen med betong skall ligga kvar i hinken tills betongen når plastisk (formbar) konsistens vilket utvärderas på betongens överyta. När denna konsistens uppnåtts tas påsen ur hinken. Härvid provas konsistensen genom att med tummen trycka med ca. 50 N (runt 5 kilopond) på vertikala delen av påsen. Tillstyvnadstiden bedöms uppnådd då tummen förmås tryckas in mindre än 1 mm. Parametern t_E (h) beräknas som tiden från vattnets tillsättning i blandaren tills tummens intryck blir mindre än 1 mm och sedan multiplicerad med 1,25. Hur en tumme trycks in i påsen visas i Figur B3. Bilden är hämtad från [22]. Samtliga värden, uppmätta under de åtta väg gjutningarna redovisas i rapportens Tabell 10.



Figur B3: Bilden visar hur en tumme trycks in i betong som förvaras i en polyetylenpåse [22]

BILAGA 2 - STAGKRAFTER RELATIVT TRYCKCELLER

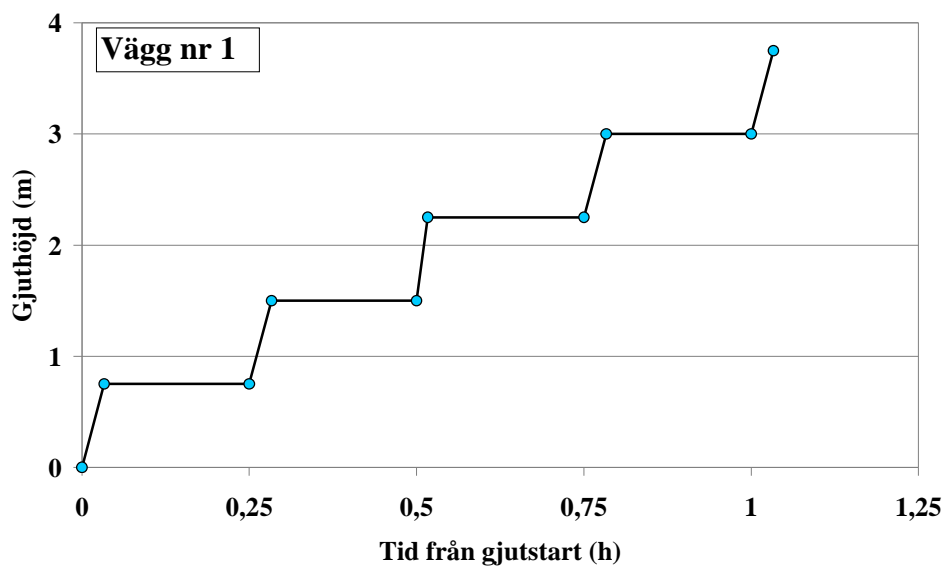
I rapporten diskuteras formtrycket endast utifrån de värden som uppmätts med tryckcellerna. Även om vissa formstag, dvs. de som befinner sig närmast tryckcellerna, instrumenterades med lastceller så har ingen utvärdering gjorts baserad på dessa krafter. Planen var att mätningarna i princip skulle utgöra en "plan B", dvs. utgöra en säkerhet om viktiga värden från tryckcellerna av någon orsak skulle falla bort. Det finns orsak till att prioritera tryckcellerna i första hand. Formarna byggdes upp av formpaneler typ Trio från Peri som kan kopplas ihop i både höjd och sidled. Formpanelerna utgörs av en ram av fyrkantrör varpå en formplywood monterats. Många oklarheter finns; systemet är flerfaldigt statistiskt obestämt, dragkrafterna förspänns innan gjutning och för att få ut krafter skall töjningsdata multipliceras med tryckarea och E-modul. Sammantaget gör detta att det är säkrare att direkt mäta trycket från betongen mot form. Ett exempel på hur de två metoderna korrelerar visas i Figur B4. Värden från lastceller har i Figur 4 plottats mot de från tryckcellerna på i princip motsvarande höjdnivå. Relativt stor samstämmighet kan urskiljas och för de två lägsta nivåerna kan man anta att lastcellen tar upp kraft från en yta nära på 1 m² (lutningskoefficient = 1). För de högre nivåerna tycks ytan vara något större, omkring 1,15 m². Men andra osäkerheter kan givetvis också spela in här. Noterbart är hur som helst att den linjära korrelationens precision (R²) för samtliga kurvor blir 0,98-0,99.



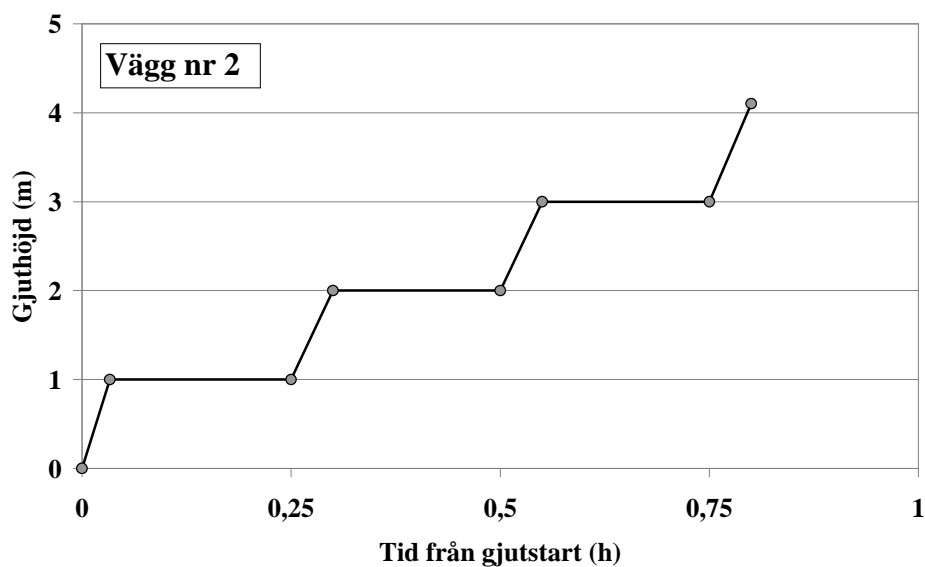
Figur B4: Stagkrafter jämförda med tryckceller vid gjutning av vägg 5

BILAGA 3 - GJUTHÖJD SOM FUNKTION AV TIDEN

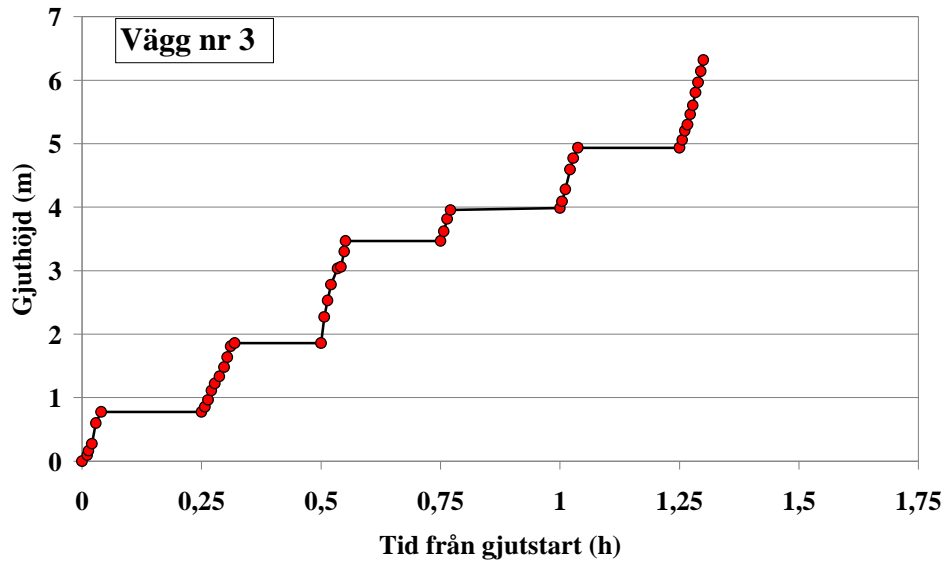
Som ett exempel så redovisas i rapporten hur den registrerade gjuthöjden ökar med tiden för vägg 3. I denna bilaga redovisas i Figur B5 - Figur B12 samtliga väggars gjuthastigheter.



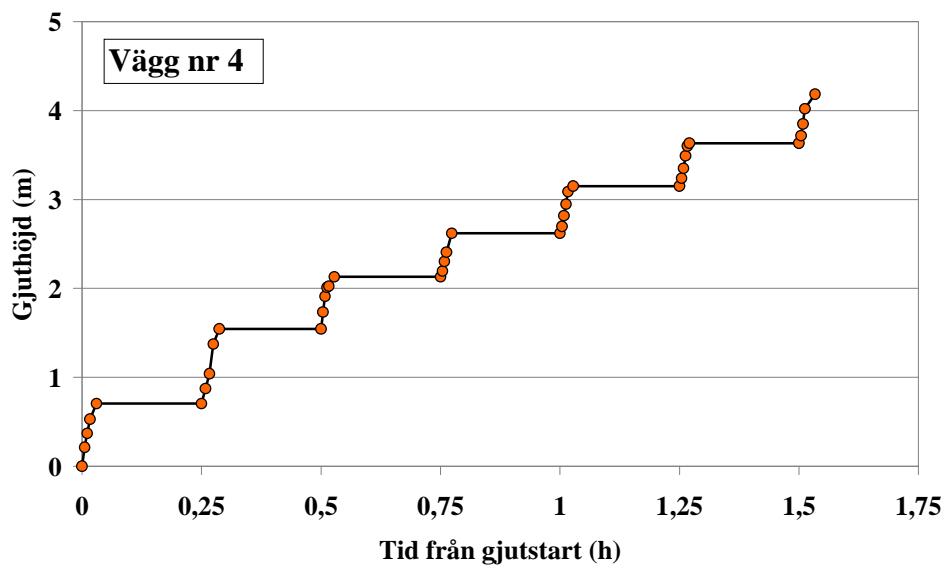
Figur B5: Registrerad gjuthastighet för vägg 1



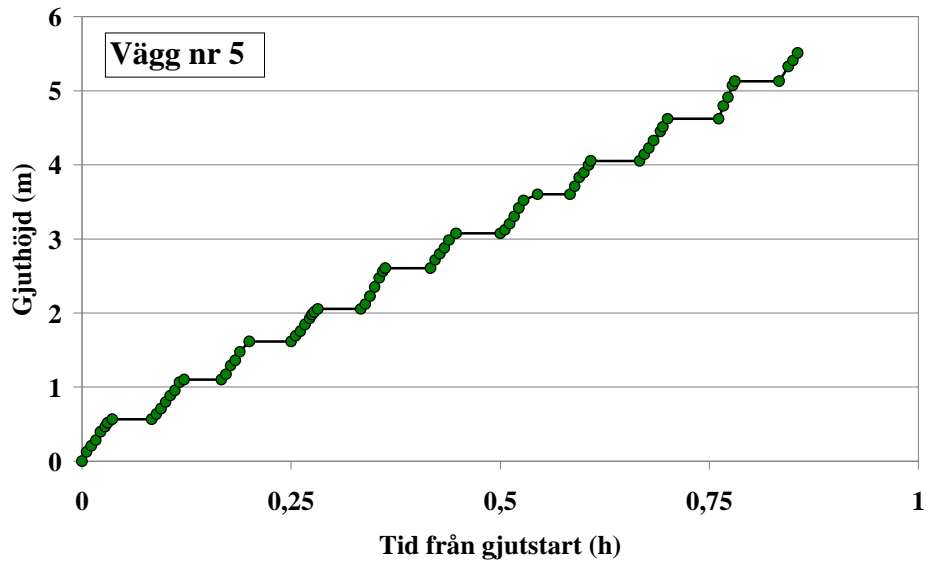
Figur B6: Registrerad gjuthastighet för vägg 2



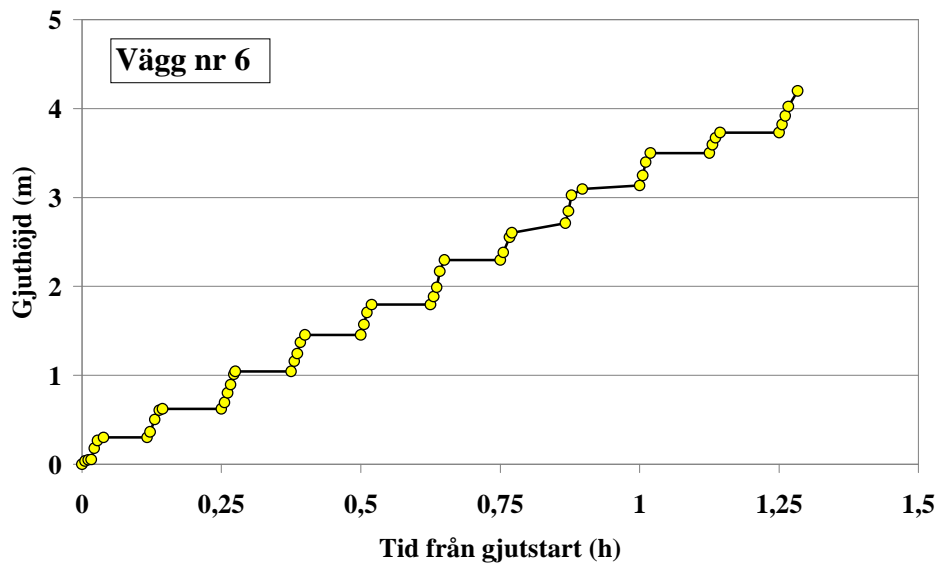
Figur B7: Registrerad gjuthastighet för vägg 3



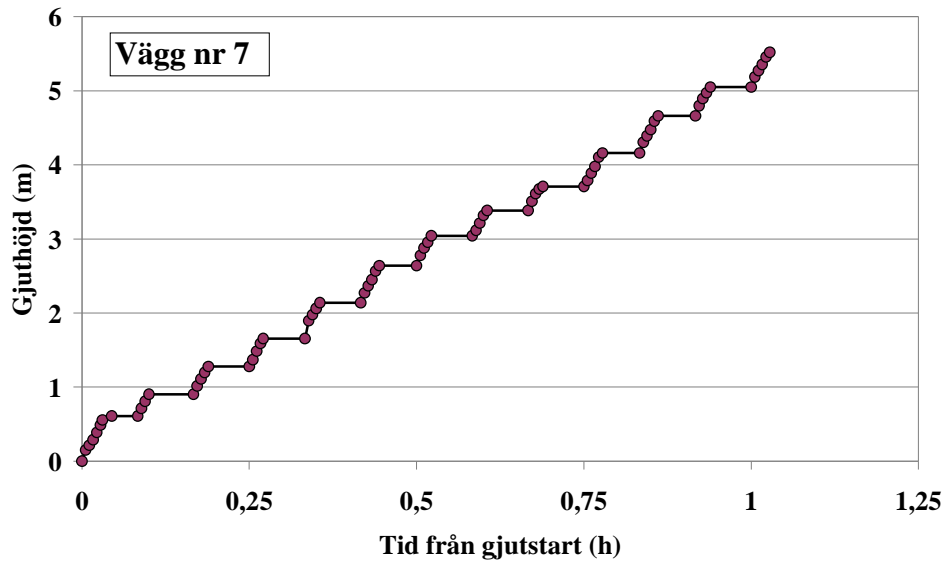
Figur B8: Registrerad gjuthastighet för vägg 4



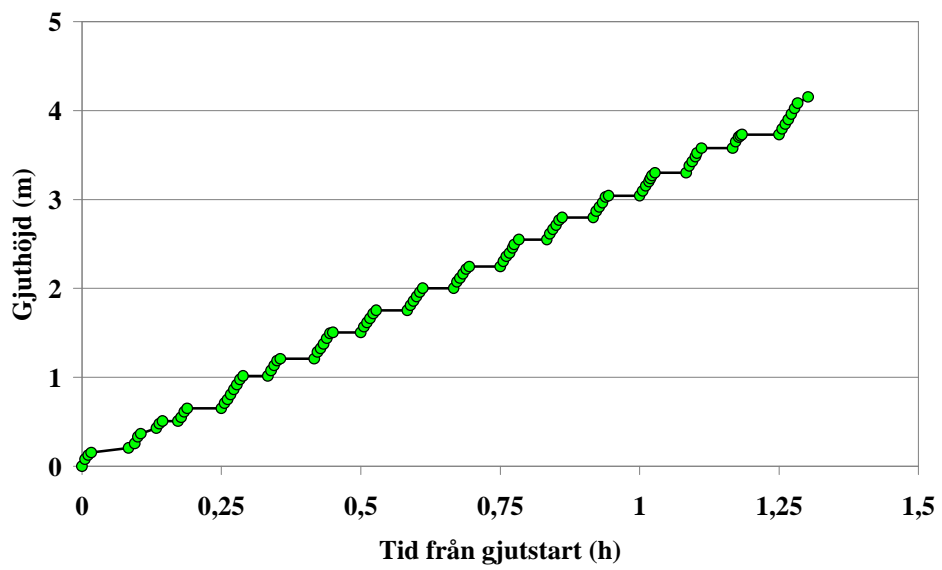
Figur B9: Registrerad gjuthastighet för vägg 5



Figur B10: Registrerad gjuthastighet för vägg 6



Figur B11: Registrerad gjuthastighet för vägg 7



Figur B12: Registrerad gjuthastighet för vägg 8