

SKOGSINDUSTRIELLA PROGRAMMET

1057

Ångsläckning av kalk - kinetik och teknik

Roland Lundqvist

**Ångsläckning av kalk
- kinetik och teknik**

**Ny energieffektiv teknik för släckning av mesakalk
i sulfatmassaindustrin**

**Steam slaking of lime
- kinetics and technology**

**New energy effective lime slaking technology in
kraft pulping**

Roland Lundqvist

S5-607

Abstract

Mesakalk från bränsleeldad roterugn i sulfatprocessens kemikalieåtervinning och bränd stenkalk har släckts med vattenånga i labbförsök. Syftet med labbförsöken har varit att bestämma släckningshastighetens beroende av ångtryck och temperatur vid släckning i ångatmosfär, och är en uppföljning av gjorda pilotförsök (Värmeforsk [5]). Parametrarna tryck och temperatur har konstanthållits under försöken, men varierats mellan försöken. Vattenångtrycket har varierats mellan 0,2 och 1 atm, temperaturen mellan 120 och 300 °C.

Hydratiseringsreaktionens (släckningens) hastighet avtar både med sjunkande ångtryck och stigande temperatur. Försöken visar att roterugsbränd mesakalk reagerar betydligt långsammare än bränd stenkalk.

Släckningshastigheten avtar för båda kalksorterna exponentiellt med stigande temperatur och sjunkande ångtryck, vilket inte var helt väntat och således en missräkning i projektet.

Mesaugnskalken reagerar dessutom 3-4 gånger långsammare än stenkalken. Vid atmosfärtryck hos vattenångan och släckningstemperatur 250 °C blir släckningstiden två timmar eller mer.

Projektet innefattade även att eftersöka maskinutrustning som skulle kunna lämpa sig för att utföra ångsläckningen i fabriksskala. En sådan utrustning ska åstadkomma god kontakt mellan vattenånga och finfördelad bränd kalk, och effektivt överföra värme ifrån släckningen så att ånga kan genereras till fabriken's ångnät. Släckaren ska vara helt tät, för att undvika såväl damning mot omgivningen som inläckning av luft. Vidare måste utrustningen förhindra att kalken bildar beläggningar som häftar fast mot väggarna.

Marknadsinventering har identifierat två processutrustningar med intressanta egenskaper. Preliminära dimensioneringar och ekonomiska kalkyler visar att ekonomin kan bli rimlig om kalken kan släckas vid 250 °C på 40 minuter. Det tycks man kunna uppnå med stenkalken, men inte med mesaugnskalken. För att bekräfta antagandena behöver testkörningar göras i maskinleverantörernas pilotutrustningar och laboratorier.

Sammanfattning

Kalk används i stora kvantiteter som hjälpkemikalie för regenerering av koklut vid pappersmassaframställning enligt sulfatprocessen. Släckt kalk (kalciumhydroxid) används för att omvandla natriumkarbonat i grönlut till natriumhydroxid (kausticering) varvid kalciumkarbonat (mesa) faller ut. Kalciumhydroxiden regenereras i kalkcykeln genom ombränning av mesa i mesaugnen, följt av hydratisering (släckning) i grönlut under stark värmeutveckling.

Problem med traditionell släckningsmetod är att värmets utvinns vid låg temperatur. Med den i rapporten beskrivna metoden för kalksläckning finns potential att både utvinna värmets vid högre temperatur, företrädesvis som ånga till fabriken s ångnät, och att utvinna en väsentligt större mängd värme.

Den föreslagna metoden innebär att kalk släcks med ånga (eller fuktig luft) exempelvis i kombination med en indirekt ångvärm d mesator k och en bränsleeldad mesaugn med avgaspanna.

Detta projekt utgör en uppföljning av tidigare gjorda pilotförsök med en specifik utrustning, inom Värmeforsks Skogsindustriella Program för 2004-2005 (Värmeforsk [5]). Målgrupp är främst pappersmassaindustri som använder sig av sulfatprocessen.

Projektagare har varit Carnot AB, och projektet är utfört inom "Värmeforsks Skogsindustriella Program för år 2006-2008". Övriga partners och rådgivare i projekt- och referensgrupp har, förutom KTH Energiprocesser, varit personer från CTH, LTH, SMA Svenska Mineral AB, Stora Enso Skoghalls Bruk, Södra AB, M-Real AB Husum, SCA Packaging AB i Munksund, samt ÅF Process AB i Stockholm.

Uppdraget i denna etapp har omfattat laborieförsök för att bestämma kalkens reaktionshastighet vid släckning med vattenånga. Labförsöken har utförts som ett examensarbete vid KTHs institution för kemiteknik i Stockholm, avdelning för energiprocesser. Kompletterande labförsök har utförts hos Carnot AB.

Efter att marknaden genom sökts på lämpliga utrustningar har kontakter med maskinleverantörer tagits. De utrustningar som utvalts för närmare studium är en Paddle Dryer från det holländska företaget GMF Gouda, samt en utrustning HoloFlite (från Denver Pennsylvania) som ingår i Metso Mineral ABs produktportfölj.

Preliminära dimensioneringar av utrustningarna har gjorts, och budgetofferter har inhämtats. Ekonomiska kalkyler har gjorts utifrån offerter och jämförts mot känd teknik.

Ångsläckning vid atmosfärstryck i kombination med mesator k ser ut att vara tekniskt möjlig i de föreslagna utrustningarna. Labförsöken visar dock att släckningshastigheten blir betydligt lägre, och släckningsutrustningen därmed större och dyrare, än förväntat.

För att verifiera preliminära resultat behöver materialet testas i leverantörernas testlab och pilotutrustning. Offerter på sådana provkörningar har inhämtats.

Nyckelord: kalk, ångsläckning, hygroskopisk släckning, kinetik, kausticering, mesa, mesatorn, avgaspanna.

Summary

Lime stone is widely used in chemical recovery for regeneration of white liquor in kraft pulping. Slaked (hydrated) lime is used to convert (causticize) sodium carbonate into sodium hydroxide, whereby lime mud (calcium carbonate) precipitates from the solution. Lime mud is dried and reburned in a lime kiln, where burned lime (calcium oxide) is formed. The circle is closed when lime is slaked (hydrated) in green liquor in an exotherm reaction.

Problems with traditional lime burning and slaking methods are that heat recovery is bad and heat is recovered at low temperatures. With the method described in this report there is potential to increase heat recovery in the causticizing plant, and to recover heat at higher temperatures.

The forecasted method means that lime is slaked with water vapour, for example combined with an indirect heated lime mud drier and a lime kiln.

This project is a follow-up to pilot tests performed in a specific machine equipment at year 2006 (Värmeforsk ref [5]). The target group is pulp and paper industry using the kraft process. The owner of this new project is Carnot AB and the project is performed inside the Värmeforsk Program for Pulp and Paper Industry 2006-2008. Partners and advisers in project group have been KTH Energy Processes, CTH Energy and Environment, LTH Chemical Technology, SMA Mineral AB, and reference group from STORA Enso Skoghall, Sodra Cell, M-Real Husum and SCA Packaging Piteå.

The task in this stage has included market investigations and laboratory tests. Contacts have been made with suppliers, preliminary dimensioning of process equipment and budget offers are received. Economic calculations have been made out of the offers. The laboratory tests are done as an examination paper at KTH Energiprocesser on the reactivity of burned lime from kraft lime kiln when it is slaked with water vapour instead of green liquor. The vapour intended to be used is at atmospheric pressure or even down to 0,2 atm. Complementary addition to these laboratory tests are performed at Carnot AB.

The evaluation indicate that a combination of lime slaking with water vapour from indirect heated lime mud dryer could be technically possible in the evaluated/studied equipments. The laboratory tests show however that the reaction speed is considerably lower than expected, leading to need for larger and somewhat more expensive equipment.

Tests in the suppliers pilot test plants are necessary to guarantee the process and to determine the capacity. Such tests are offered.

Key words: lime, lime mud dryer, steam slaking, hygroscopic slaking, kinetics, causticizing, exhaust gas boiler.

Innehållsförteckning

SUMMARY	V
1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 BESKRIVNING AV FORSKNINGSOMRÅDET	2
1.3 ELMESA	4
1.4 FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSOMRÅDET	8
1.5 MÅL OCH MÅLGRUPP	8
2 LABFÖRSÖK OCH LITTERATURSTUDIE	9
2.1 BESKRIVNING AV LABFÖRSÖK	9
2.2 RESULTAT	10
3 MASKINUTRUSTNING PÅ MARKNADEN	11
3.1 HOLO-FLITE	11
3.2 PADDLE DRYER/COOLER	12
3.3 Roterande tubulär	13
3.4 Släckningsutrustning, konventionell	14
3.5 MESATORK	15
3.6 AVGASPANNA	15
3.7 OFFERTER	15
3.8 MESATORKNING	18
3.9 ÅNGSLÄCKNING	19
3.10 TESTKÖRNING HOS LEVERANTÖR	20
4 RESULTATANALYS	21
4.1 LABFÖRSÖK OCH LITTERATURSTUDIE	21
4.2 MESATORK	21
4.3 ÅNGSLÄCKARE	21
4.4 ENERGIJÄMFÖRELSE	22
4.5 EKONOMISKA JÄMFÖRELSE	25
5 SLUTSATSER	29
6 REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	30
7 FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE	31
8 REFERENSER	32

Bilagor

- A EXAMENSARBETE "ÅNGSLÄCKNING AV KALK"**
- B KOMPLETTERANDE LABFÖRSÖK**
- C KOMMENTARER TILL LABFÖRSÖK**

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Kalk används i stora kvantiteter som hjälpkemikalie för regenerering av koklut (s k vitlut) vid pappersmassaframställning enligt sulfatprocessen. Bränd kalk, kalciumoxid, blandas (släcks) under stark värmeutveckling i grönlut, varvid kalciumhydroxid bildas.

Grönluten innehåller natriumkarbonat som omvandlas till natriumhydroxid med hjälp av kalciumhydroxiden, det kallas att grönluten kausticeras, varvid kalciumkarbonat faller ut ur lösningen som ett finkornigt slam ("mesa"). Mesan avvattnas, torkas och bränns igen i mesaugnen till kalciumoxid.

Natriumhydroxidlösningen som erhålls vid kausticeringen kallas vitlut, och de sista resterna av mesa filtreras bort innan vitluten används i kokeriet.

Grönluten, som håller temperatur nära kokpunkten, kyls före släckningen för att inte kokning ska inträffa, eftersom släckningsreaktionen är starkt exoterm. Värmet tillvaratas dels som varmvatten vid 80 °C vid grönlutskylningen, dels som het vitlut vid ca 103 °C.

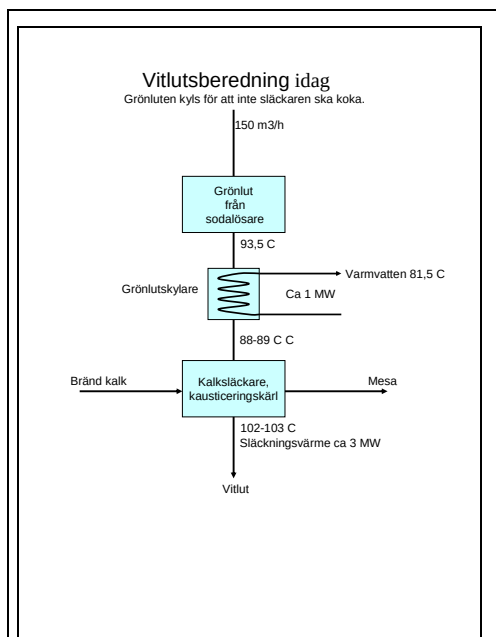
Idéen bakom ångsläckning är dels att återvinna ångbildningsvärmets ur förångat vatten från t ex en mesatorn, dels att utföra släckningen utan överskott av vatten, vilket resulterar i ett torrt finkornigt pulver av hydratkalk.

Genom att utföra kalksläckningen med vattenånga återvinns vattenångans ångbildningsvärme, vilket ökar släckningsvärmets med ytterligare ca 60 %.

Genom att utföra släckningen torrt kan värmets utvinnas vid högre temperatur. Den torra släckningens jämviktstemperatur är drygt 500 °C vid släckning med vattenånga av atmosfärstryck. Ett antagande inför projektet var att släckningen skulle gå tillräckligt fort vid 250-300 °C, och att värmets skulle kunna utvinnas t ex som ånga till fabriken 4 bars ångnät.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

I figur 1.2.1 visas nuvarande tillvägagångssätt vid kalksläckning i samband med kausticering av grönlut för regenerering av vitlut i sulfatmassaprocessen. Kalksläckningen föregås av att grönluten kyls för att undvika kokning när den brända kalken tillsätts grönluten i kalksläckaren. Släckningsvärmes tillvaratas som varmvatten och het vitlut.



Figur 1.2.1
Konventionell grönlutskyfning och kalksläckning
Conventional green liquor cooling and lime slaking

Ekdahl och Lundqvist [1] har föreslagit en metod innefattande kalcinering av mesa med hjälp av elektriskt genererat plasma samt släckning av kalk i kombination med t ex mesatorn, där ånga (eller fuktig luft) återvinns och används som släckningsmedel för bränd mesakalk.

Alternativt kan kalksläckning med ånga utföras i kombination med bränsleeldad mesaugn. Metoderna är patentskyddade i Sverige. Se vidare under rubriken 1.3 Elmesa.

Vattenfall samt KTH [2] har tidigare studerat tekniken som anses kunna ge fördelar genom lägre kostnad och minskad energiåtgång samt effektiv återvinning av värme vid högre temperaturer.

Den grundläggande kemin och fysiken som den föreslagna tekniken bygger på är känd och väl beskriven i litteraturen. Jämviktstemperaturen för hydratiseringsreaktionen är bestämd av

vattenångstryck, och kan fås ur litteraturen. Ångsläckning kan beskrivas som en kemisk värmepump, som lyfter värme från en lägre temperaturnivå till en högre.

I första hand har tanken varit att utföra ångsläckningen vid atmosfärstryck. Det har också väckts en idé om att utföra ångsläckningen vid undertryck med lågvärdigare ånga av t ex 60 °C temperatur, dvs 0,2 bar. Teoretiskt är det möjligt, då jämviktstemperaturen hos släckningsreaktionen fortfarande är över 400 °C.

Sådan ånga skulle kunna flashas av från 60-gradigt spillvatten med lågt ekonomiskt värde, och uppgraderas till högre temperatur och värde i ångsläckningen. Tanken är motiverad med att 100-gradig (spill)ånga av atmosfärstryck kan antas ha en alternativ användning och ett värde, även om ångsläckningen har potential att uppgradera den till högre temperatur och tryck.

Hastigheten med vilken vattenånga upptas beror dock på flera olika parametrar, av vilka en viktig parameter har antagits vara kalkens historia i mesaugnen.

Det har gjorts en del arbeten avseende reaktivitet i ångatmosfär, men fokus har inte varit släckning av mesaugnskalk, utan snarare ren CaO eller bränd stenkalk för användning i t ex rökgasrening, Per Alvfors, KTH 1990 [4].

Lunds Universitet, avd Kemisk Teknologi [3], har utfört laboratoriemätningar av reaktionshastigheter och konverteringsgrader vid hydratisering av kalciumoxid vid olika temperaturer och vattenångtryck.

Kalk som fås i bränsleeldade mesaugnar kan förväntas vara mer svårsläckt pga sintring och förglasning på kristallerna av lättsmältande ämnen så som natrium mm.

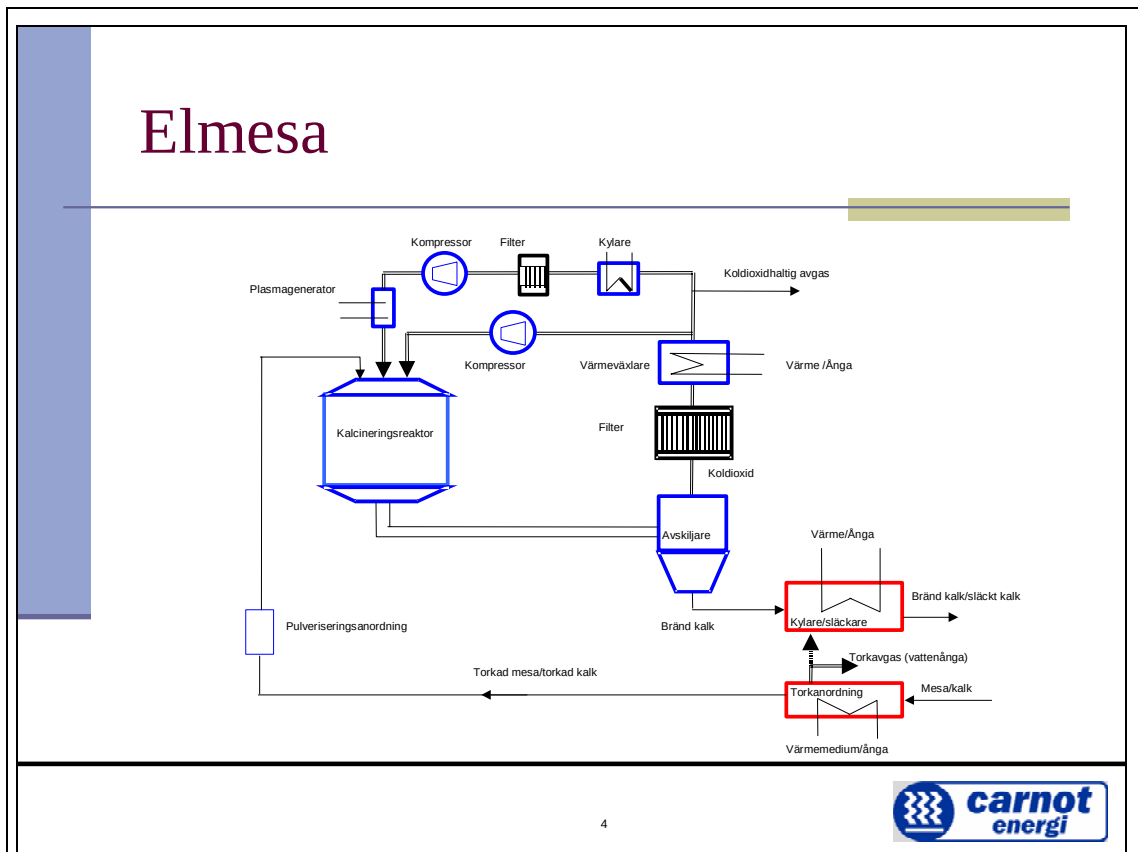
Vid pilotförsöken i Sandarne 2006 [5] identifierades ett behov av att undersöka reaktiviteten specifikt hos bränd kalk från mesaugn vid släckning med vattenånga.

I föreliggande rapport beskrivs mätningar av reaktionshastighet utförda i labförsök baserade på finmald mesakalk och stenkalk från bränsleeldade roterugnar.

Vidare beskrivs förslag till maskinutrustning som finns tillgänglig på marknaden för att utföra ångsläckning i fabriksskala, samt preliminära investeringskostnader för sådan utrustning. Även indirekt värmd mesatorkning i samma typ av maskiner har undersökts.

1.3 Elmesa

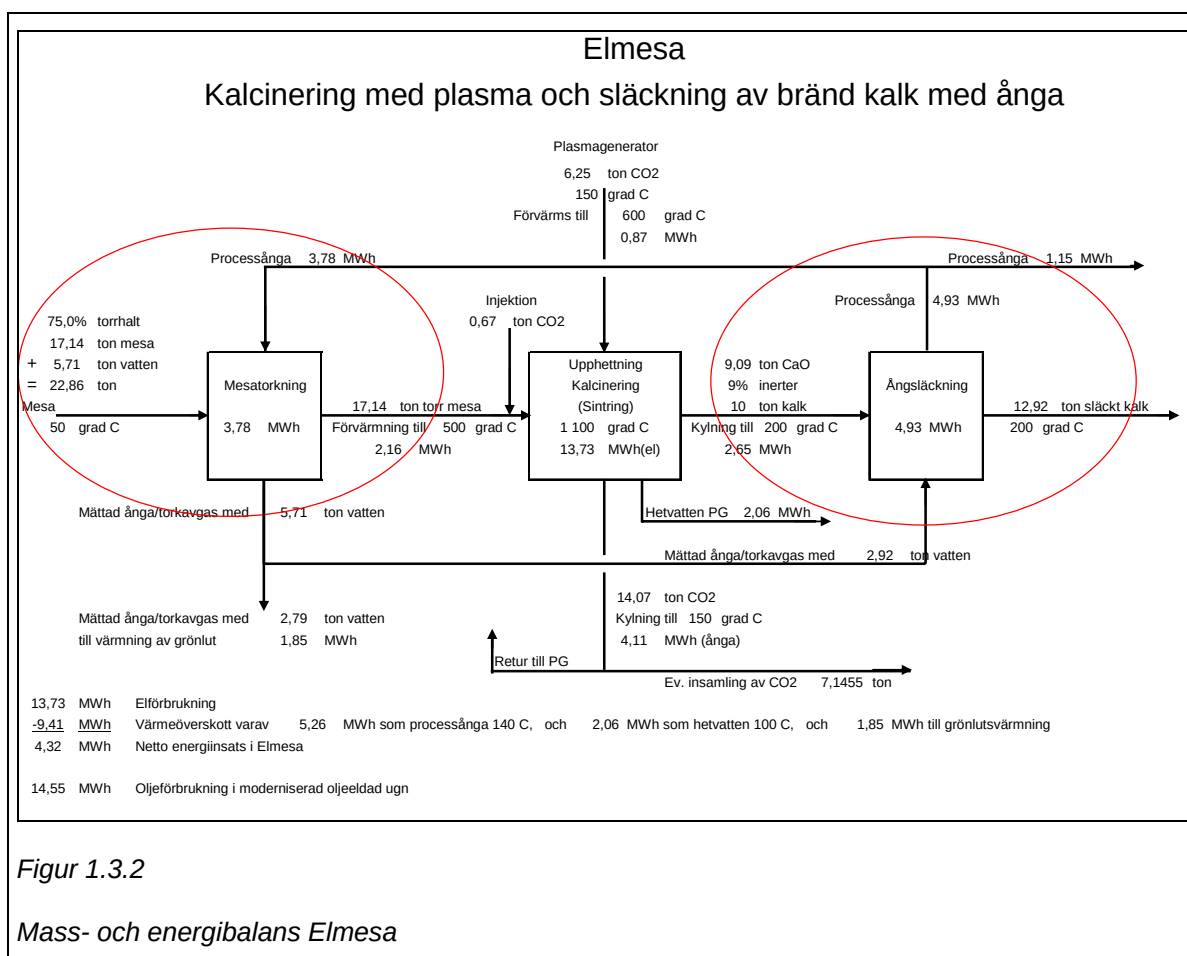
Figur 1.3.1 visar förslag till processdesign för kalcinering med elektriskt genererat plasma. Utförlig beskrivning finns i referens [2]. Kalcineringen förväntas ske sekunds snabbt.



Figur 1.3.1
Processförslag elcalcinerings i kombination med indirekt mesatorn och ångsläckare.
Plasma burner combined with indirect lime mud drier and water vapour slaker

En indirekt mesatorrk avger vattenånga som absorberas av den brända kalken. Eventuellt överskott av vattenånga från torken kan användas till exempelvis uppvärmning av grönlut. Ångsläckningen sker vid hög temperatur så att t ex 4 bar(a) ånga kan genereras.

Figuren 1.3.2 visar mass- och energibalans för komplett Elmesa – med mesatork, elkalcinering och ångsläckning.

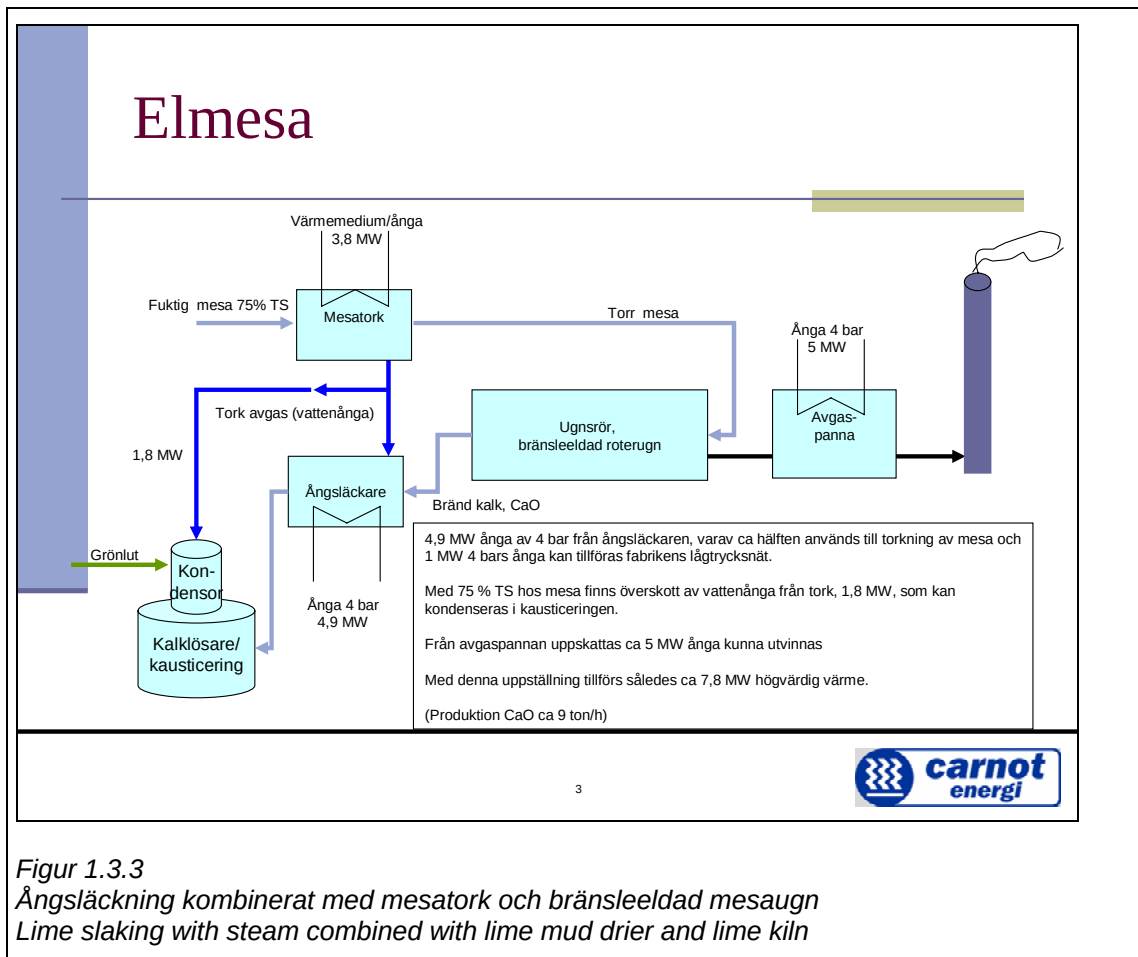


Figur 1.3.2

Mass- och energibalans Elmesa

De inringade delarna mesatork och ångsläckare tänks i detta projekt integrerade med bränsleldad mesaugn istället för elkalcineringsmodul.

Figur 1.3.3 visar schematiskt kombination med bränsleeldad mesaugn. De heta avgaserna från mesaugnen används inte längre till att torka mesa, och kan generera ånga i en avgaspanna.



Figur 1.3.3

Ångsläckning kombinerat med mesatork och bränsleeldad mesaugn

Lime slaking with steam combined with lime mud drier and lime kiln

Vattenånga som avdrivs i torkningen tillförs ångsläckaren och utgör släckningsmedium.

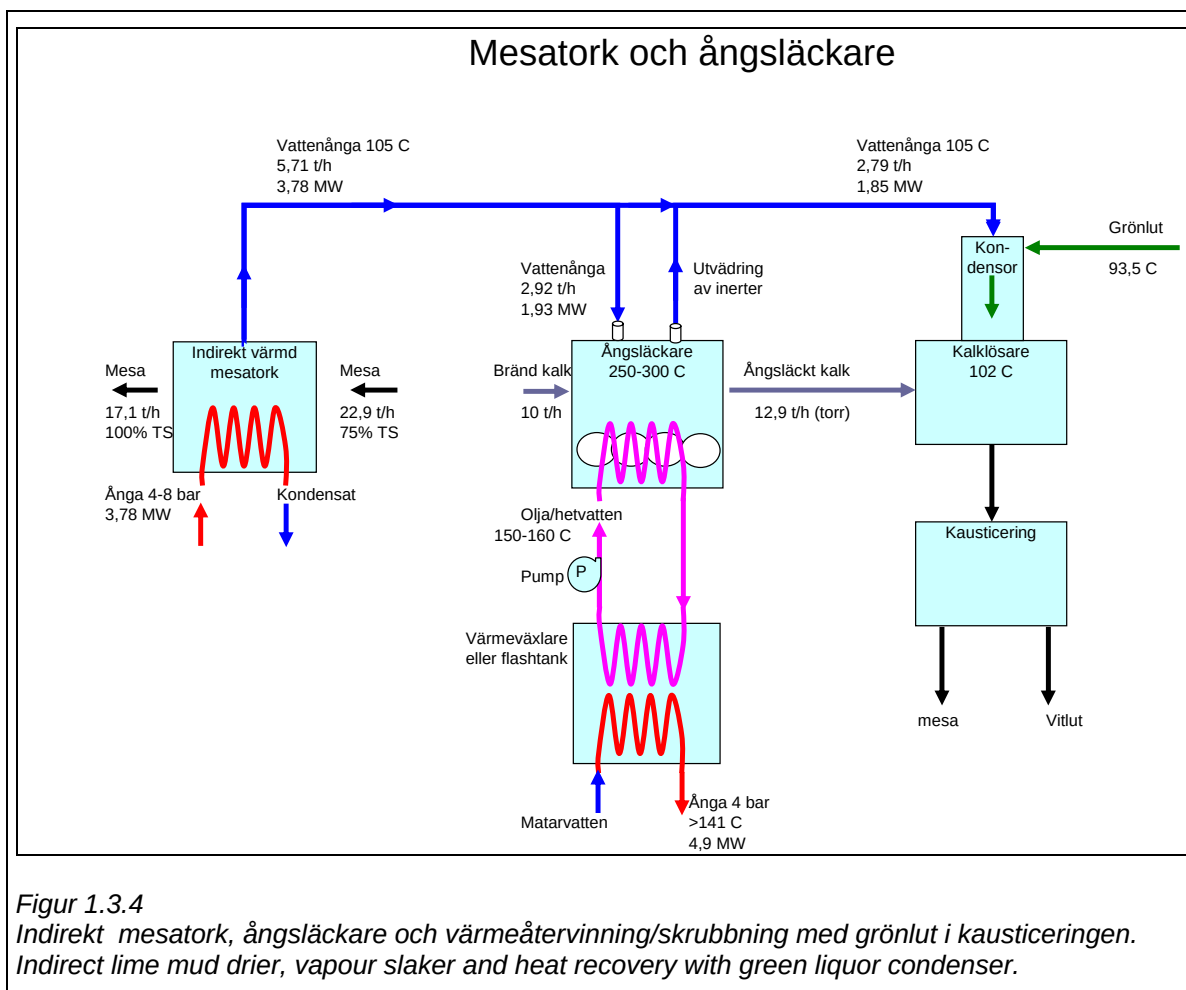
Förutom släckningsvärmets som utvecklas när den brända kalken hydratiseras, utvecklas även värme på grund av att vattenånga kondenserar. Återvinningen av släckningsångans ångbildningsvärme ökar värmeutbytet vid släckningen till 4,9 MW (figur 1.3.3), jämfört med 3 MW vid släckning i grönlut (figur 1.2.1).

Överskott av avdunstat vatten från mesatorken kondenseras i kausticeringen.

När mesaugnen förses med avgaspanna för ångproduktion kan totalt 7,8 MW tillföras fabriken som högvärdig värme i en fabrik som tillverkar 300 000 årston massa. Det kan jämföras med traditionell mesatorkning och kalksläckning, vid vilken återvinns ca 3 MW som varmvatten och het vitlut.

Om kalksläckningen sker med vattenånga av atmosfärstryck (ånga utan inblandning av inerta gaser, luft), var förhoppningen att den skulle kunna utföras med tillräcklig hastighet vid 250-300 °C.

Eftersom mesan idag avvattnas mekaniskt till 75-80% torrhalt, och att alltså avdunstat vattenånga kommer att finnas i överskott för släckningen, visas i nedanstående schema hur vattenånga från mesatorken först kan passera ångsläckaren för att därefter kondenseras tillsammans med eventuellt stoftinnehåll med grönlut i kausticeringen.



Om man släcker torrt med ånga och utvinner värme (som ånga av 4 bara tryck) så finns det utrymme för att kondensera överskottet av avdunstat vatten i grönluten i kausticeringen. Då vet man att värmeåtervinningen spar ånga i kokeriet, och därmed bränsle.

I stället för grönlutskylare kommer man att ha grönlutsvärmare.

1.4 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Kalksläckning kommer att utföras i stor omfattning inom sulfatmassaprocessen under överskådlig tid. Svartlutsförgasning som är en lovande teknik i kemikalieåtervinningen bedöms komma att öka behovet av kausticering, och därmed kräva ytterligare kapacitet i kalkcykeln.

Energianvändningen inom massa- och pappersindustrin utgör en stor belastning på resursanvändning och ekonomi. Om den beskrivna ångsläckningen kan implementeras i fabriksskala tillsammans med bränsleeldade mesaugnar finns möjlighet till stor energibesparing i denna del av sulfatmassaprocessens kemikalieåtervinning, och som kan komma hela branschen till del. Potentialen i Sverige är ca 140 MW fördelat på ett tjugotal fabriker, i världen ca femton gånger större. Dessutom utgör kalksläckning en betydande verksamhet i andra branscher än skogsindustrin.

1.5 Mål och målgrupp

Den föreslagna tekniken med hygroskopisk släckning av kalk i samband med kausticering av grönlut har såvitt vi känner till inte tidigare provats, vare sig i laboratorium eller i pilotskala, förrän försöken som gjordes i värmeforskprojektet som föregick detta (Värmeforsk [5]). Pilotförsöken bekräftade att teorierna håller principiellt, men det ansågs önskvärt och behövt att närmare bestämma hydratiseringsreaktionens kinetik i ångatmosfär hos kalk av just den sammansättning som det handlar om i sulfatmassaprocessen och som kalcinerats i bränsleeldad roterugn på just det sätt som är brukligt inom sulfatmassaindustrin.

Föreliggande uppdrag har omfattat att i form av ett examensarbete vid KTH Energiprocesser i Stockholm genomföra laboratorieförsök för att beskriva reaktionskinetiken vid släckning av finmald bränd kalk från mesaugn vid olika ångtryck och vid olika temperaturer. Kompletterande labförsök har utförts hos Carnot AB.

Den pilotutrustning som användes vid de tidigare genomförda försöken bedömdes inte uppfylla kriterierna på bland annat täthet mot omgivningen (dammtäthet och inläckning av luft) samt att på ett tillförlitligt och effektivt sätt utvinna släckningsvärmets i form av ånga vid önskat tryck och temperatur.

I föreliggande uppdrag ingår därför också att föreslå alternativ utrustning för att i fabriksskala kunna utföra ångsläckning.

Målgrupp är pappersmassaindustri som tillämpar sulfatprocessen, kalkleverantörer och maskinleverantörer.

2 Labförsök och litteraturstudie

Labförsök syftande till att bestämma specifikt bränd mesakalks reaktivitet vid släckning i ångatmosfär har utförts som ett examensarbete vid institutionen för Kemiteknik vid KTH i Stockholm, avdelningen för Kemiteknik. Kompletterande prov har gjorts hos Carnot AB. Kalk från ett par olika mesaugnar samt bränd stenkalk användes. Försöken skulle utföras vid olika ångtryck, dels lågt tryck 0,2-0,3 bar motsvarande att släckningsången utvinns genom avkokning från 60-gradigt spillvärmevatten. Dels vid atmosfärstryck motsvarande att släckningsången utvinns från exempelvis en indirekt värmad mesatorn. Vidare skulle släckningen utföras vid temperatur upp till 300 °C, dvs tillräckligt hög temperatur för att det bedömdes rimligt att kunna utvinna 4 bar(a) ånga (mättnadstemperatur drygt 140 °C) i en fabriksläckare.

2.1 Beskrivning av labförsök

Reaktorn vid försöken hos KTH bestod av ett metallrör i en horisontell rörugn. I ena gaveln var reaktorn öppningsbar så att provet av bränd kalk kunde införas.

En liten mängd finmald bränd kalk placerades i reaktorn som evakuerades med vacuum pump innan försöken startades.

Temperaturen i reaktorn har konstanthållits, avsikten har varit att hålla temperaturen så konstant som möjligt under försöket genom att förvärma reaktorn innan försöket startade och använda så pass små kalkmängder att temperaturen helst inte steg märkbart av reaktionsvärmets.

Vid försöken hos KTH har använts ånga utan luftinblandning vid 0,2 och 0,3 bar(a). Ånga tillsattes kontrollerat så att konstant tryck/undertryck upprätthölls i reaktorn. Tillsatt ångmängd registrerades under försökets gång. Tillförd ångmängd användes som mätare på släckningsreaktionens förlopp.

Labförsöken vid KTH finns utförligare beskrivna i rapporten från examensarbetet, bilaga[A].

Försöken hos Carnot AB har utförts på två olika sätt, men alltid vid atmosfärstryck. Försöken har utförts vid 125, 150, 200, 250 och 300 °C och redovisas i bilaga [B].

- a) Termogravimetriskt (TGA). En liten provmängd har omspolats av ånga. Provet har varit upphängt i en noggrann våg, och viktökningen har registrerats under försökets gång.
- b) I en sluten reaktor (stålflaska som vacuum pumpats inför försöken). Vattenånga har genererats genom att släppa fram vatten från en fingeraderad byrett via en förångare/överhettare till reaktorn. Släckningsgraden har beräknats ur vattentillförsel genom att avläsa byretten under försöket. Under denna variant av försök har provet skakats om genom att reaktorn utsatts för en excentrisk rörelse med hjälp av en motor.

2.2 Resultat

Försöken visar att:

1. Reaktiviteten ser ut att vara cirka en tredjedel hos bränd kalk från mesaugn jämfört med bränd stenkalk vid släckning i ångatmosfär.
2. Släckningshastigheten avtar kraftigt vid låga ångtryck. Hastigheten avtar exponentiellt med trycket.
3. Släckningshastigheten är starkt temperaturberoende. Vid atmosfärstryck och 125 °C uppmättes 30 minuters släckningstid för bränd mesakalk, vid 300 °C omkring 8 timmar.
4. Vid släckning under omskakning reduceras släckningstiden till ca en tredjedel.

I ångsläckningsförsök vid 300 °C och partialtryck hos vattenången 1 atm (K. Laursen et al, ref [8]) anges 13,3 minuter för att uppnå fullständig släckning. Här kan vi anta att man använt ren och porös CaO.

Från litteraturstudie kan särskilt nämnas försök som gjorts vid LTH Kemiteknik [3]. Dessa styrker observationerna ovan angående släckningshastighetens beroende av vattenångans partialtryck. Försöken är gjorda vid ångtryck 0,1 – 1 atm och temperatur 100 – 180 °C. Vid atmosfärstryck och 180 °C erhöles släckningstid 22 minuter.

Av litteraturen vet man att släckningsreaktionens jämviktstemperatur är ca 530 °C vid ångtryck 1 bar (atmosfärstryck), och 410 °C vid 0,2 bar. Jämviktsångtrycket vid 300 °C är mindre än 0,01 atm, vilket gör att 0,5-1 atm ger full drivande kraft för släckningen. Därmed finns också ett tillräckligt drivande tryck för släckningsreaktionen vid 300 °C och 0,2 bar [3].

Slutsatsen av en teoretisk betraktelse och litteraturstudier är att ångsläckning av kalk vid 300 °C är termodynamiskt gynnsamt och kinetiskt möjligt. Teoretiskt är kinetiken likvärdig i intervallet 250 – 400 °C, först vid 450 °C är hastigheten halverad. Det som bromsar reaktionen vid 300 °C är således inte temperaturen (termodynamiken) i sig.

Teoretiskt kan förväntas att reaktionshastigheten avtar i proportion till trycket (Hans Karlsson LTH, bilaga [C]). Således skulle förväntas fyra gånger så lång släckningstid vid vattenångtryck 0,25 atm som vid 1 atm. Experimentella data både från examensarbetet och från försöken gjorda vid LTH visar dock att reaktionshastigheten avtar något mer än så, och med ett exponentiellt förhållande till trycket.

3 Maskinutrustning på marknaden

I uppdraget ingick att identifiera lämpligt utförande av utrustning för ångsläckning i fabriksskala, och att om möjligt hitta en maskinleverantör och knyta kontakter för fortsatt samarbete. För att ta fram underlag för fortsatt arbete ingick i uppdraget även att preliminärt räkna på ekonomin hos en sådan produktionsutrustning.

För att komma fram till noggrannare beslutsunderlag ansågs det också troligt att ytterligare pilotförsök skulle komma att behöva göras. Då dessa antogs kosta mycket pengar bedömdes att en intresserad maskinleverantör skulle behöva medfinansiera ett sådant test.

Vi har hittat ett par tänkbara alternativa maskinleverantörer, och vi har inhämtat budgetofferter på både testkörningar och på produktionsutrustningar. Dessbättre visade det sig att dessa maskinleverantörer har möjlighet att till förhållandevis låg kostnad utföra testkörning i lab- och pilotskala, för att sedan med hjälp av sina beräkningsmodeller och databaser skala upp resultaten.

3.1 Holo-Flite

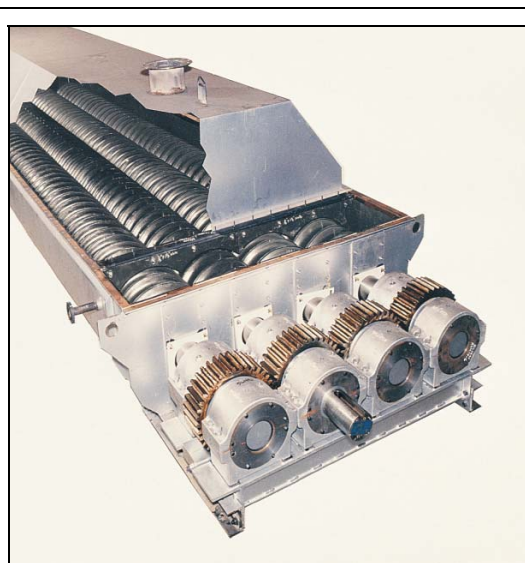


Bild 3.1.1
Hollow Flight maskin från Metso, Denver
Pennsylvania.

The Metso Holo-Flite® Thermal Processor is an indirect heat exchanger for heating, cooling or drying bulk solids, filter cakes, pastes or sludges.

Metso Mineral AB har en utrustning som de kallar Holo-Flite. Namnet anspelar på "hollow flight", eller "ihålig skruv". Den påstås finnas i ca 3 000 installationer, och används för att värma eller kyla pulverformigt eller granulerat material. Det kan handla om kylning av aska från pannor eller torkning av finkornigt eller granulerat material, den påstås kunna arbeta ända upp till 1 200 °C, t ex för kalcinering av olika material. Materialet skruvas framåt så att ett pluggflöde erhålls och uppehållstiden styrs med varvtalet på skruvarna. Kylning kan ske med termisk olja eller vatten, värmning kan även ske med ånga. Om trycksatt vatten används som värmeupptagande medium kan ånga genereras i extern flashtank.



Bild 3.1.2
Hollow Flight mobil utrustning för test.

Metso's 4" rental unit is available at a nominal charge for inplant testing.

Närmaste plats för att utföra pilottest finns hos Metso Mineral i Sala.

3.2 Paddle Dryer/Cooler

GMF Gouda i Nederländerna har en utrustning med ihåliga paddlar. Paddlarna och manteln utgör värmeväxlaryta för kylning eller värmning av materialet i Paddle Dryer. Paddlarna skär genom materialet liksidigt utan att skruva materialet framåt. Transporthastigheten och fyllningsgraden styrs genom dammar eller genom att luta tråget.



Bild 3.2.1
Paddeltork från GMFGouda i Nederländerna.

Half-filled Paddle Dryer with polished paddle shafts

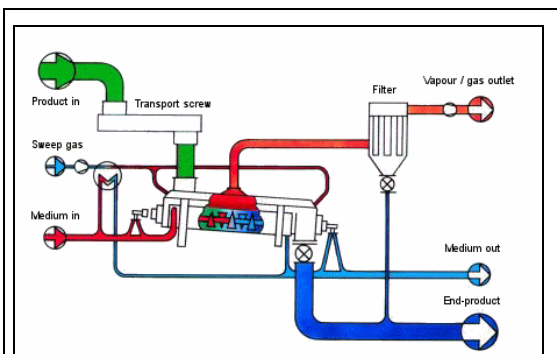


Bild 3.2.2
Paddle Dryer, GMF Gouda



*Bild 3.2.3
Paddle Dryer, mobil labtestutrustning från
GMF Gouda.*

Mobile test machine

Utrustning för lab- och pilotförsök finns hos Gouda, även mobil pilotutrustning för provkörning hos kund.

3.3 Roterande tubulär

Vid pilotförsöken 2006 i Sandarne användes en mindre modell av AB Torkapparaters roterande tubulär (bild 3.3.1). Materialet togs från intilliggande mesaugn och krossades i valskvarn till <10 mm för släckning med ånga eller fuktig luft.



*Bild 3.3.1
Torkapparaters roterande tubulär som
användes vid pilotförsök i Sandarne 2006*

Rotating tubular used in former pilot tests

Den modell som användes hade luft som kylmedium. Den hade roterande mekaniska tätningar mot halsarna i bägge ändar till rotorns kyltuber och till mantelkylningen. I utförande för torkning finns det även en modell med ångtillförsel centralt i axeln.

Även materialet som behandlas i tubulären förs in och ut via dess halsar (gavlar). För att undvika damning eller annat läckage till/från omgivningen krävs mekaniska glandtätningar mot gavlarnas in- och utmatningshalsar. Roterande mekaniska tätningar krävs således i vilket fall för både materialet som ska behandlas och för kylmediet. Eftersom det är väsentligt att

släckaren är tät mot omgivningen – inte bara för att undvika damning, utan för att undvika inläckage av luft (inertgas) som utgör diffusionshinder och sänker tillgängligt vattenångstryck – så har valts att inte ta med denna modell i jämförelsen.

3.4 Släckningsutrustning, konventionell

Den konventionella metoden är våtsläckning, vilket innebär att bränd kalk och grönlut blandas i släckaren under omrörning.



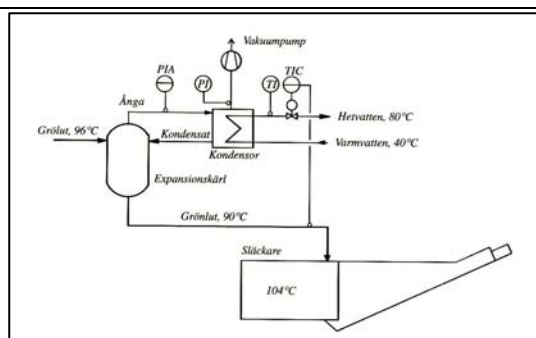
Bild 3.4.1
Grönlutskylare Iggesunds Bruk

Green liquor cooler

Släckaren är integrerad med kausticeringen, men innehåller en bottenkrapa för avskiljning av skalkgrus.

Även vid ångsläckning kommer att behöva en kalklösare som motsvaras av kalksläckaren, och grönlutskylaren ersätts med en grönlutsvärmare.

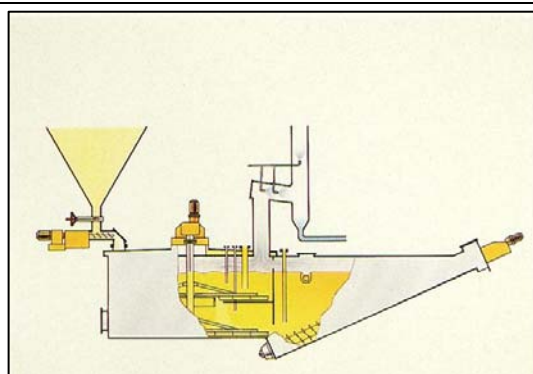
Släckaren föregås då i regel av en grönlutskylare där grönluten kyls något, typiskt från 93,5 till 88 °C, för att undvika kokning i släckaren.



Figur 3.4.2
Konventionell släckning i grönlut med föregående grönlutskylare (ref [6])

Conventional slaker with green liquor cooler

Grönlutskylaren är utformad som en kondensor i vilken tillverkas varmvatten av ånga som flashas från grönluten vid lätt undertryck, ca 0,75 atm(a).



Figur 3.4.3
Konventionell släckare/kalklösare (ref [6])

Conventional lime slaker

3.5 Mesatork

I rapporten diskuteras mesatorkning i kombination med ångsläckning. Indirekt torkning med ånga har fördelen att avdunstad vattenånga erhålls i princip utan förorening av inertgas (luft). Därmed kan den med fördel användas som släckningsmedel i ångsläckaren. Överskott av avdunstat vatten kan användas för att värma grönluten/vitluten i kausticeringen. Samtidigt renas vattenången från stoft.

3.6 Avgaspanna

Om en fristående mesatork installeras måste man kyla rökgaserna från mesaugnen för att inte elfiltret ska börja brinna. Då känns det närmast självklart att värmets ska tas tillvara i en avgaspanna. Eftersom rökgaserna är så heta (5-600 °C) kan ånga genereras. I pannsammanhang är dock tillgänglig temperatur inte särskilt hög, och pannan torde vara att jämföra med en ekonomiser. Rökgaserna innehåller varierande mängd stoft ifrån mesaugnen, men kommer inte att ha lika hög daggpunkt som när rökgaserna används för att torka mesan. För att inte riskera pluggning bör det vara typ hängande tubpaket som går att skaka av stoftet från. För att eliminera risken för kondensering och klibbning är det sannolikt att matarvattnet ska hålla minst 120 °C.

3.7 Offerter

Budgetofferter på mesatork respektive ångsläckare har tagits in från Metso Mineral AB (Holo Flite) resp GMF Gouda (Paddle Dryer).

Följande parametrar har givits som förutsättningar i förfrågningarna:

Vattenången till släckningen förutsätts vara nära mättad vid 100-105 °C, och komma från en tork, företrädesvis mesatorken.

Både mesatorkning och ångsläckning har förutsatts utföras vid atmosfärstryck och utan luftinblandning.

Reaktionsvärmets vid hydratisering (släckning) av kalk ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}(\text{liq}) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$) är 1,17 GJ/ton CaO (0,325 MWh/ton).

Till detta kommer ångbildningsvärmets ($\text{H}_2\text{O}(\text{gas}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{liq})$) som är 0,78 GJ/ton CaO (0,217 MWh/ton).

Totalt värme är således $1,17 + 0,78 = 1,95$ GJ/ton CaO (0,542 MWh/ton).

Genom att kyla ångsläckaren indirekt ska ånga av 4 bar(abs) produceras, vilket innebär att mättnadstemperaturen är omkring 141 °C. Det antas att ången behöver överhettas till ca 150 °C, så det värmeöverförande mediet i ångsläckaren – trycksatt matarvatten eller termisk olja – behöver värmas till ca 160 °C. Ånga genereras i flashtank eller värmeväxlare beroende på värmemedium. Ifall trycksatt matarvatten och flashtank används behövs en matarvattenpump som höjer trycket över mättnadstrycket (som är

6,3 bar(abs) vid 160 °C) igen efter flashtanken innan matarvattnet åter leds in i släckaren.

Reaktionstemperaturen i släckaren antas behöva vara 250-300 °C för att åstadkomma tillräcklig drivande kraft för värmeöverföringen. Den släckta kalken antas lämna släckaren vid samma temperatur, och att det cirkulerande värmemediet håller 150 grader in till släckaren.

Produktegenskaper:

Mesa

Bulkdensitet vid torrhalt 67-85%	0,5 kg torr mesa/dm ³
Bulkdensitet vid torrhalt 95 %	0,65 kg torr mesa/dm ³
Bulkdensitet vid torrhalt 100 %	0,75 kg torr mesa/dm ³
Värmeledningsförmåga	0,15 W/m,grad (preliminärt)

Bränd finmald mesakalk

Bulkdensitet	1,0 kg/dm ³
Värmeledningsförmåga	0,15 W/m,grad (preliminärt)

Släckt hydratkalk (torr)

Bulkdensitet	0,4 kg/dm ³
Värmeledningsförmåga	0,11 W/m,grad (preliminärt)

Maskinleverantörerna har fått förfrågan på följande:

1. Mesatorn alt 1: Kapaciteten bör vara 22,5 t/h mesa med ingående fukthalt 80%, Ut=18 t/h torr mesa. Antag att den drivs med 4 bar(a) ånga, annars 8 bar(a).

Mesatorn alt 2: Kapaciteten bör vara 20 t/h mesa med fukthalt 86%, Ut=18 t/h torr mesa. Antag att den drivs med 4 bar(a) ånga, annars 8 bar(a).
2. Ångsläckare med kapacitet 10 ton bränd kalk / timme. Ut=13 t/h släckt kalk. Se även nedan förutsättningar för dimensioneringen.
3. Testkörning med material från mesaugn, torrsäckning av bränd kalk med ånga av 1 bar(a) vid ca 250-300 °C.

Några tankar kring dimensionering av släckare:

- Om släckningsgraden är i närheten av 100 % hos det material som matas ut är bulkdensiteten strax över 0,4. Om genomströmningen kan beskrivas som något slags pluggflöde kan bulkdensiteten vara närmare 1,0 i inmatningsänden. Dvs medeldensitet någonstans mellan 0,4-1,0, t ex mitt emellan = 0,7. Mängden material in=10 ton/h och ut=13 ton/h, dvs medelflödet i släckaren 11,5 t/h. Om uppehållstiden ska vara 40 minuter

(0,67 h) beräknas erforderlig aktiv volym i släckaren $0,67 \times 11,5 / 0,7 = 11 \text{ m}^3$.

- Å andra sidan, om det är total omblandning så är densiteten nära 0,4 i hela släckaren. Massflödet bör då anges som 13 ton/h. Om uppehållstiden ska vara 40 minuter (0,67 h) erhålls erforderlig aktiv volym i släckaren $0,67 \times 13 / 0,4 = 21 \text{ m}^3$.

Mesatorken behöver avge ånga vid atmosfärstryck till släckningen, för att erhålla tillräcklig släckningshastighet. Ångan förutsätts vara i princip fri från inerter, men det kommer ändå att vara nödvändigt att vädra ut lite ånga ur släckaren för att inte få en anrikning av inertgaser (luft).

Idag håller mekaniskt avvattnad mesa ca 75-80 % TS när den går till mesatork, men om man skulle i en framtid kunna avvattna till 86% TS så har man stökiometrisk mängd ånga för att precis släcka den brända kalken.

3.8 Mesatorkning

Jämförelse av utrustningar för mesatorkning från Metso Mineral AB och GMF Gouda.

Mesatork	HoloFlite	Paddle Dryer/Cooler
Leverantör	Metso Mineral AB	GMF Gouda Nederländerna
Beteckning		17W300
Antal skruvar	4 skruvar	2 paddlar
Diameter skruv		1,7
Rotationshastighet, rpm		4
Motoreffekt, kW		175
Värmeöverförande yta, m ²		295
Värmeöverförande medium		Ånga 8 bar(a), 170 C
Mesa CaCO ₃ till tork, våtvikt ton		20
Torrhalt mesa, CaCO ₃		86% → 100%
Bulkdensitet, kg/m ³		0,75
Temperatur mesa		T _{in} =50 C, T _{ut} =105 C
Effektiv produktvolym, m ³		32,7
Uppehållstid, minuter		min 62
Vikt, ton		115
Total längd, m	4-11	16,4
Total bredd, m	0,3-2,7	3,98
Höjd, m	0,3-1,1	4,03
Uppgift om antal anläggningar	3 000	>1 000
	Pilotanläggning finns i Sala	Pilotanläggning och testlab finns hos GMF Gouda i Gouda, Nederländerna
		Pilottest krävs för att garantera processen och fastställa kapaciteten.
Prisinformation		EUR 2.300.000
	Offert försenad	GMF har även offererat en lite mindre modell för 12 bara ånga.

3.9 Ångsläckning

Jämförelse av utrustningar för ångsläckning.

Ångsläckare	HoloFlite	Paddle Dryer/Cooler
Beteckning	Q3628-8	12W120
Antal skruvar	4 skruvar	2 paddlar
Diameter skruv, m	0,90 (35,5")	1,20
Rotationshastighet, rpm	0,6 – 6,0 (inverter)	6
Motoreffekt, kW	55	75
Värmeöverförande yta, m ²	210	120
Värmeöverförande medium	Trycksatt vatten Tin 150C Tut 160 C (prel) Pmax 10,3 bar (170 C)	Olja 6 bar(g), 160 C
Bränd kalk in, ton/h	CaO 9 ton Inert 1 ton	CaO 9 ton Inert 1 ton
Släckt kalk ut, ton/h	12,9	12,9
Bulkdensitet, kg/m ³	1000 → 400	400
Temperatur produkt	Tin=Tut=300 C	Tin=ambient, Tut=250-300 C
Effektiv produktvolym, m ³	~24?	10,8
Uppehållstid, minuter		30
Vikt, ton		53
Längd tråg, m	8,53 (28")	6,88
Bredd tråg, m	3,07	2,22
Höjd, m	1,03 (tråghöjd) 2,52 (totalhöjd)	2,85 (totalhöjd)
Uppgift om antal anläggningar	3 000	>1 000
	Pilottest krävs för att garantera processen och fastställa kapaciteten.	Pilottest krävs för att garantera processen och fastställa kapaciteten. Prisinformation EUR 8.000.
Prisinformation	US Dollars \$ 1.000.000 (~6,5 Mkr)	EUR 1.200.000 (~11,4 Mkr)

3.10 Testkörning hos leverantör

Offerter har även infordrats för testkörning i leverantörernas pilotanläggningar.

GMF Gouda har offererat testkörning som tar en vecka i anspråk, totalt inklusive rapportering. 250 – 1000 kg produkt behövs för ett försök. Att försöken är genomförbara ska bekräftas av deras av GMFs laboratorium innan offerten fastställs.

Metso har en Holo Flite testutrustning i Sala. De föredrar att utföra eventuella pilotförsök hos kund på grund av känslig bebyggelsemiljö runt deras anläggning i Sala. De har uppgett självkostnadsersättning som princip för testkörning.

4 Resultatanalys

Nedan redovisas resultat av labbförsök och jämförelse av maskinutrustning från leverantörer i text, tabeller och diagram. Olika aspekter diskuteras, såsom erhållna temperaturer, släckningsgrader, energi och ekonomi.

4.1 Labbförsök och litteraturstudie

Resultaten från labbförsöken stöds i princip av litteraturstudien som utförts inom examensarbetet vid KTH. Försöken visar att 0,2 bar(a) ånga, som t ex kan flashas från 60-gradigt avloppsvatten, kommer att kräva orimligt lång släckningstid för att vara ett realistiskt alternativ i fabrikstillämpning med nuvarande energipriser. Släckaren måste ha orimligt stor aktiv volym för att nå tillräcklig uppehållstid. Förfrågningar till maskinleverantörer är därför baserade på att ångsläckningen ska ske vid atmosfärstryck. De kompletterande labbförsöken visar dessutom att släckningshastigheten kommer att bli lägre än vad som antogs då offerterna inhämtades.

4.2 Mesatork

En ångdriven indirekt mesatork skulle kunna motiveras med att vattenånga kan avdunsta vid atmosfärstryck, lätt överhettad till t ex 105-110 °C, och användas som släckningsmedium vid ångsläckning av den brända kalken. Om vattenångan avdunsta vid denna temperatur kan överskott som inte behövs i kalksläckningen tillgodogöras effektivt i annan uppvärmning, exempelvis värmning av grönlut i kausticeringen.

Om mesan torkas i fristående tork minskar rökgasflödet från mesaugnen genom elfilter och rökgasfläkt. Förmodligen blir mesaugnen lättare att styra genom att rökasmängden inte varierar med mesans fukthalt. Det är också en fördel för elfiltret efter mesaugnen att rökgaserna är torrare och daggpunkten blir högre.

Om torken drivs med 12 bars ånga istället för med 8 bar minskar erforderlig storlek hos värmeöverförande yta med ca 20 %.

4.3 Ångsläckare

Som sagts ovan är tanken att utnyttja spillvärme vid låg temperatur för att generera ånga vid undertryck till ångsläckningen svår att motivera när släckningstiden avtar med ångtrycket så som har visats. Erforderliga volymer och dimensioner hos utrustningarna blir orimligt stora med dagens förutsättningar. Offerterna baseras därför på att ångsläckningen ska ske vid atmosfärstryck.

Den offererade ångsläckaren har ungefär en tredjedel av effektiva volymen hos den offererade mesatorken. Med hänsyn till ny kunskap som kommit fram i de kompletterande labbförsöken efter att offerterna inhämtades måste släckarens volym dimensioneras upp till minst samma storlek som den offererade mesatorkens för att få tillräcklig uppehållstid vid 250 °C.

De båda maskinfabrikat som har undersökts i detta projekt har möjlighet att arbeta vid över- eller undertryck. Det är viktigt att utnyttja detta att konstruktionerna är täta även när man släcker vid atmosfärstryck, att inget läckage av tjuvluft in i släckaren ska behöva förekomma.

Om kalken är ångsläckt utvecklas inget släckningsvärme i kalklösaren/kausticeringen. Istället kan överskott av avdunstad vattenånga från mesatorken kondenseras och värma grönluten innan kausticeringen. Då vet man att värmeåtervinningen spar ånga i kokeriet, och därmed bränsle.

I jämförelserna nedan av energi och ekonomi har inte ångsläckning vid undertryck diskuterats.

4.4 Energijämförelser

Tabellen 4.4.1 visar de olika delprocesserna, men också möjliga kombinationer.

Konventionell släckare avger värme som nyttiggörs i form av het vitlut. Dock förstörs energikvalitet i grönlutskylningen för att förhindra kokning i kalksläckaren – Om man har ångsläckare slipper man kyla grönluten.

Cyklontork använder mesaugnens rökgaser.

Indirekt värmd mesatorrk avger förångat vatten vid atmosfärstryck och temperatur strax över 100 °C, dvs lågvärdig ånga med förorening av mesa som duger bra till att ångsläcka kalk med, men även till att värma grönlut/vitlut etc.

Ångsläckare använder lågvärdig ånga från företrädesvis mesatorken som släckningsmedium, och producerar ånga av högre kvalitet. Om vattenångan som används för att ångsläcka kalken inte har hittat någon alternativ användning kan den betraktas som spill-ånga.

Avgaspanna utviner värme ur rökgaser 500-600 °C från mesaugn och genererar ånga eller förvärmer matarvatten.

MW	EI	Ånga 4-8 bar	Vatten- ånga från mesatorck	Het vitlut	Varm- vatten från grönluts- kylning	Netto värme
Konventionell släckare	-0,10			1,96	1,00	2,96
Kalklösare	-0,10					
Cyklontork	-0,09					
Ångsläckning	-0,05	4,93	-1,93			3,00
Ångsläckning med spillånga	-0,05	4,93				4,93
Mesatorck, 75 → 100%	-0,17	-3,78	3,78			0,00
Avgaspanna efter mesaugn	-0,05	5,00				5,00
Konv. släckare + cyklontork	-0,19			1,96	1,00	2,96
Konv. Släckare + Mesatorck + Avgaspanna	-0,32	1,22	3,78	1,96	1,00	7,96
Ångsläckare + Kalklösare + Mesatorck + Avgaspanna	-0,37	6,15	1,85			8,00
Ångsläckare med spillånga + Kalklösare + Mesatorck + Avgaspanna	-0,37	6,15	3,78			9,93

Tabell 4.4.1

Energianvändning i olika alternativ baserat på 10 ton bränd kalk/timme, med 9% inerter.

Positivt värde = produktion, negativt värde = förbrukning

Energy usage in different alternatives, based on 10 tons/h burned lime, with 9% inerts. Positive value is production, negative value is consumption

Kombinationen Ångsläckare + Kalklösare + Mesatorck + Avgaspanna spar 5 MW ånga jämfört med konventionell Släckare + Cyklontork (8,00 MW – 2,96 MW).

Den sparade värmeeffekten kommer som vattenånga från mesatorcken samt 4 bars ånga från ångsläckaren och avgaspannan.

Vattenången från mesatorcken håller 105 °C och efter att ångsläckaren tagit sitt behov av släckningsånga återstår 1,85 MW att värma kausticeringen med (vid ”gratis” spill-ånga 3,78 MW).

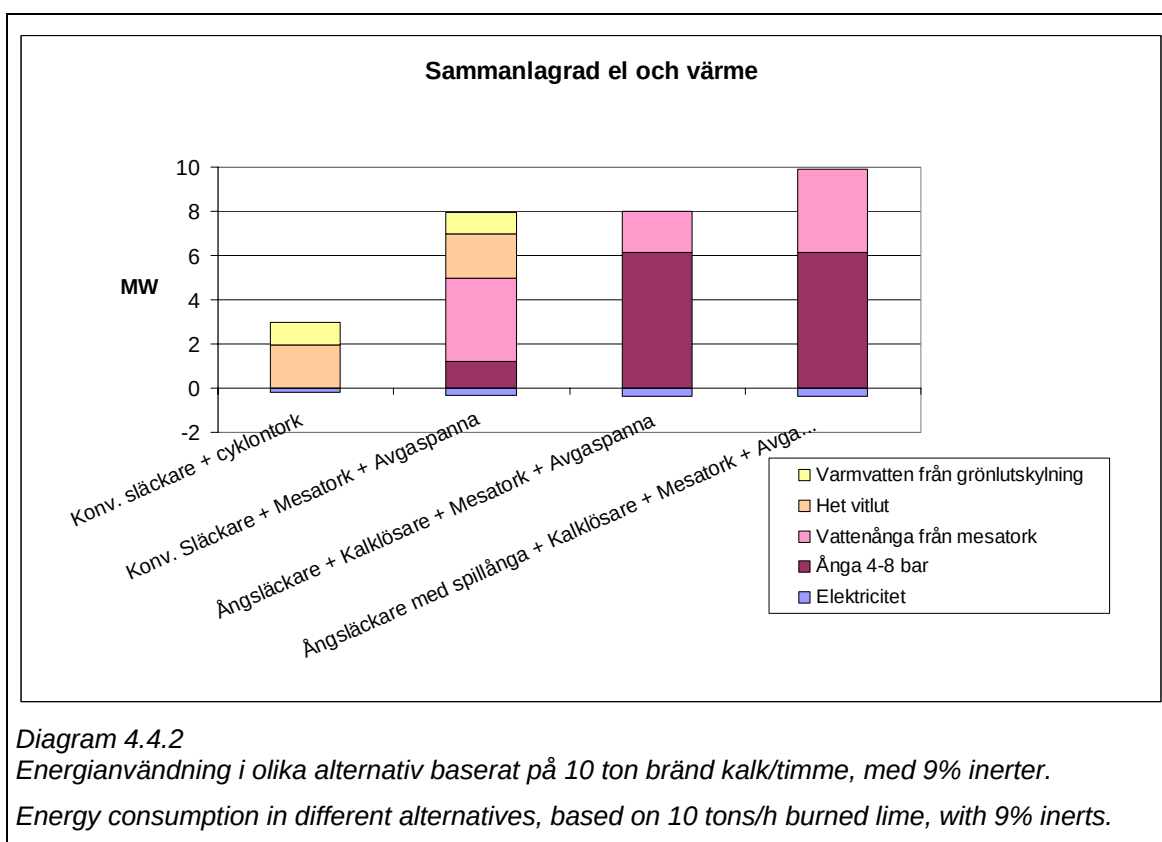
Ingen grönlutskylning behövs, och om grönluten håller 93,5 °C som idag räcker överskottet av vattenånga från mesatorcken för att värma kausticeringen upp till nära kokpunkten. Grönlutens temperatur kan också med fördel få tillåtas vara ännu högre än idag från smältalösaren i sodahuset.

Diagram 4.4.2 visar de möjliga kombinationerna grafiskt.

Konventionell släckare (och grönluts kylare) tillsammans med cyklontork värmer varmvatten och vitlut.

Konventionell släckare (och grönluts kylare) tillsammans med indirekt ångvärm� mesatorrk och avgaspanna genererar lika stor värmemängd som Ångsläckare + Mesatorrk + Avgaspanna, men med lägre temperatur och ekonomiskt värde.

Om ångsläckningen kan utföras med gratis spill-ånga t ex genom flashning från 60-gradigt avloppsvatten, kan ytterligare 1,80 MW avdunstad vattenånga från den indirekt ångvärm�a mesatorrken användas till annan värmning.



Den konventionella kalksläckaren genererar het vitlut som spar ånga i kokeriet, men nära hälften av släckningsvärm�en åtgår till att återvärma grönluten.

I alternativet Ångsläckare + mesatorrk + avgaspanna antas att mesatorrken drivs med 8 bars ånga, och att vattenånga till ångsläckningen erhålls vid 105 grader från mesatorrken till ett värde som är hälften av prima ångans. Mesatorrhållten antas i beräkningarna vara 75% till tork. Hälften av det förångade vattnet från torken åtgår i ångsläckningen och den andra hälften används till att värma grönluten innan kausticeringen, eller tillverka hetvatten.

4.5 Ekonomiska jämförelser

Utifrån offerterna har investeringskostnader, inklusive kringssystem och byggnader, uppskattats. Två alternativa nivåer på investeringbelopp visas i tabell 4.5.1.

	A Mkr	B Mkr
Ångsläckare (Holo-Flite eller Paddle Cooler)	40	30
Indirekt mesatork (Holo-Flite eller Paddle Dryer)	40	30
Konventionell släckare med grönlutskylare	40	30
Kalklösare med grönlutsvärmare (kondensor)	40	30
Cyklontork	40	30
Avgaspanna	40	30
Konv. släckare + Cyklontork	80	60
Konv. släckare + Mesatork + Avgaspanna	120	90
Ångsläckare + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	160	120

Tabell 4.5.1
Alternativa investeringar
Alternatives for investments

För alternativet med ångsläckare antas att kalklösare med grönlutsvärmare (kondensor) behövs och likställs med kostnad för konventionell kalksläckare med grönlutskylare.

Kapitalkostnader är uttryckta som annuitet under 20 år baserat på 13% kalkylränta. Kostnader och intäkter för el och ånga anges i nominella belopp eller som nuvärden, vilket anges i varje fall. Kostnader för underhåll är ej inräknade.

Jämförelserna är gjorda vid produktionsnivå 10 ton bränd kalk per timme.

De olika slagen av värme har värderats ekonomiskt i förhållande till 4-8 bars ånga:

Vattenånga 105 °C från mesatork	50%
Varmvatten från grönlutskylare	50%
Het vitlut från släckare	75%

Konventionell släckare och cyklontork ger alltid inbetalningsunderskott. Vid ångpris över 300 kr/MWh ger ångsläckare + kalklösare + mesatork + avgaspanna inbetalningsöverskott (diagram 4.5.1 och 4.5.2).

Om vattenånga till ångsläckningen kan fås "gratis" ökar årliga betalningsöverskottet med några Mkr/år.

I diagram 4.5.1 visas årligt nominellt inbetalningsöverskott (-underskott) för olika kombinationer, vid olika ångpris. Kapitalkostnad för investeringen enligt alternativ A.

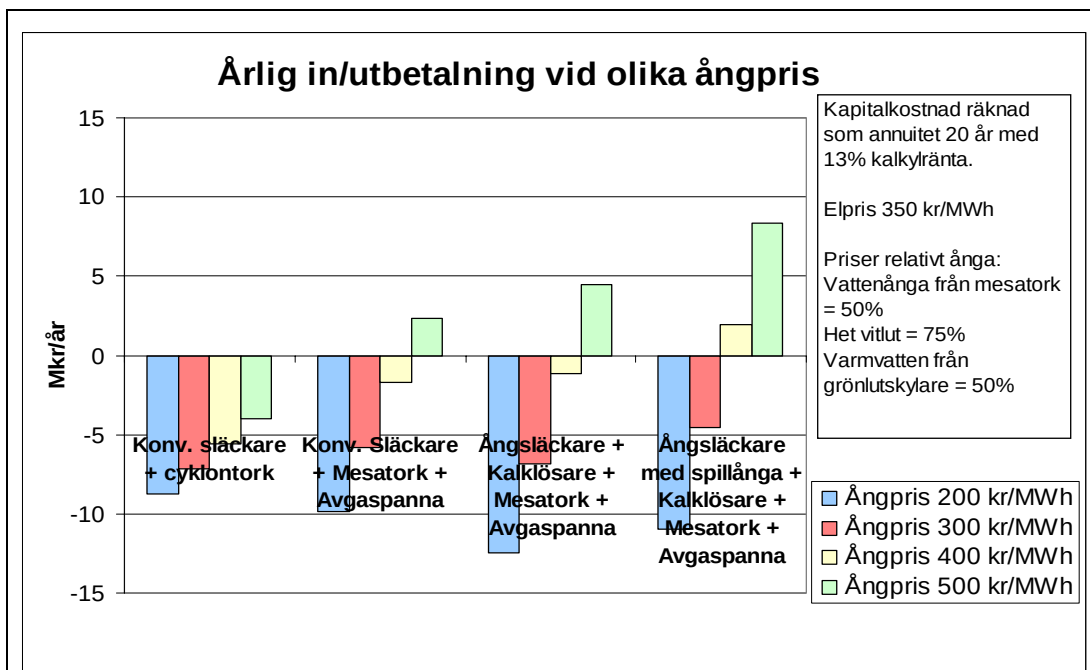


Diagram 4.5.1

Överskott eller underskott av årliga in- och utbetalningar? Kapitalkostnad alternativ A
Annual payments, surplus or deficit? Capital cost alternative A included

I diagram 4.5.2 visas årligt nominellt inbetalningsöverskott (-underskott) för olika kombinationer, vid olika ångpris. Kapitalkostnad för investeringen enligt alternativ B.

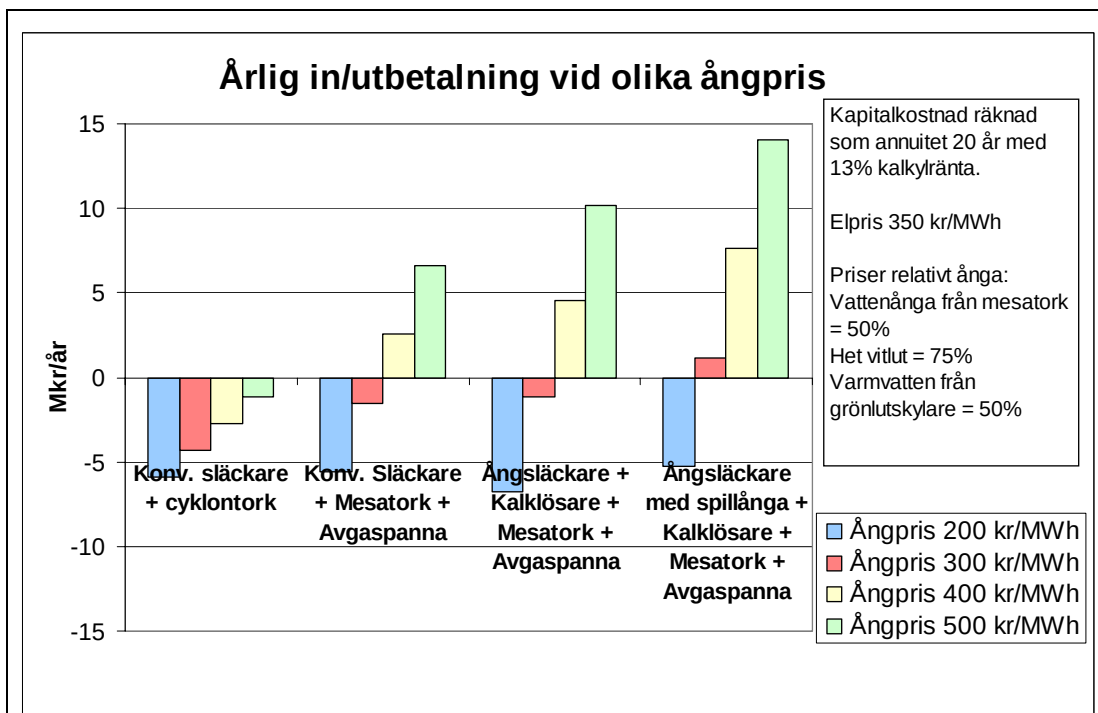


Diagram 4.5.2

Överskott eller underskott av årliga in- och utbetalningar? Kapitalkostnad alternativ B
Annual payments, surplus or deficit? Capital cost alternative B included

Diagram 4.5.3 visar känslighet för elkostnad för olika alternativ. Obs att endast elkostnaden är redovisad i diagrammet (nominella belopp).

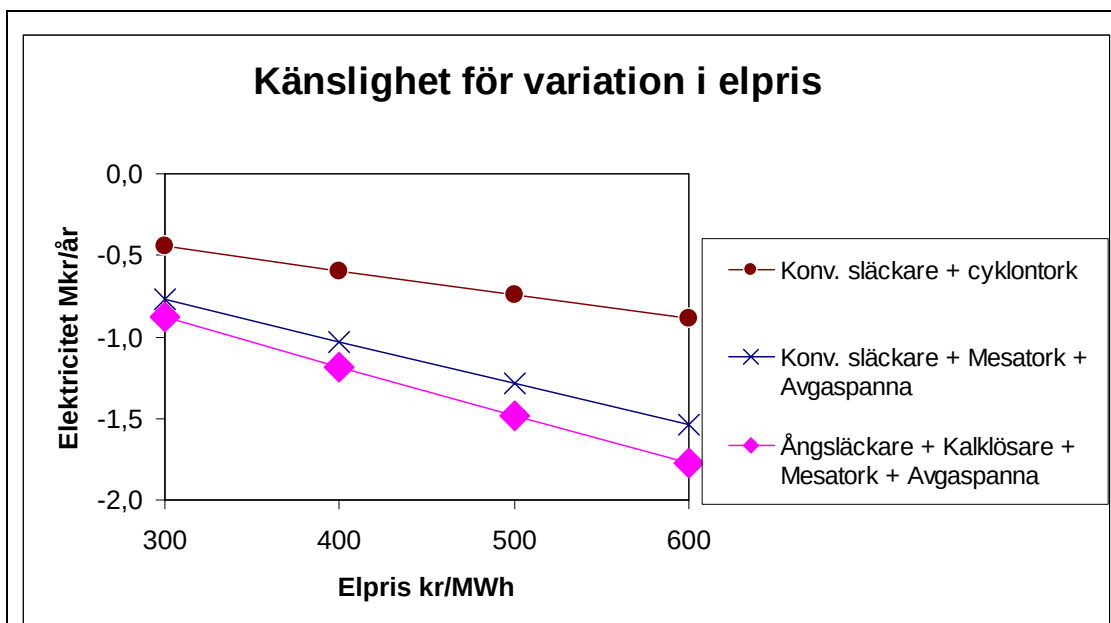


Diagram 4.5.3

Med fristående mesatork och ångsläckare fördubblas elkostnaden.

With separate lime mud dryer and vapour lime slaker the cost of electricity will increase twice.

Diagram 4.5.4 visar ångprisets påverkan på årlig besparing genom värmeåtervinning. Obs att endast ånga är redovisad i detta diagram (nominella belopp).

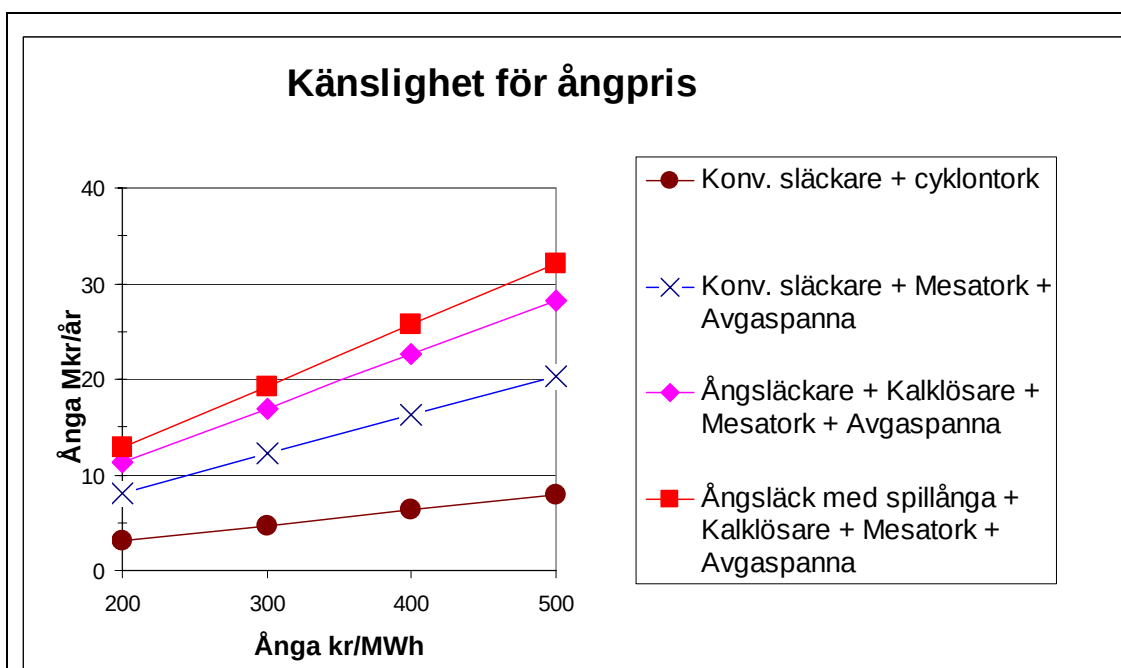


Diagram 4.5.4

Hur besparing genom värmeåtervinning påverkas av ångkostnaden

How savings by heat recovery is influenced by steam cost

Ytterligare några ekonomiska mått redovisas nedan. Alla tabellerna är baserade på elpris 350 kr/MWh.

Nuvärdeskvoterna är beräknade på kalkylränta 13%, kalkyltid 20 år och restvärde 0 kr. Nuvärdeskvoten blir positiv om investeringen är lönsam.

	Investering Mkr	Nuvärdekvot			
		Angpris 200 kr/MWh	Angpris 300 kr/MWh	Angpris 400 kr/MWh	Angpris 500 kr/MWh
Konv. släckare + cyklontork	80	-0,77	-0,63	-0,49	-0,35
Konv. Släckare + Mesatork + Avgaspanna	120	-0,58	-0,34	-0,10	0,14
Ängsläckare + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	160	-0,55	-0,30	-0,05	0,20
Ängsläckare med spillånga + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	160	-0,48	-0,20	0,08	0,37

Tabell 4.5.2

Nuvärdeskvot, investering alternativ A

Present value, ratio to initial investment alternative A

	Investering Mkr	Nuvärdekvot			
		Angpris 200 kr/MWh	Angpris 300 kr/MWh	Angpris 400 kr/MWh	Angpris 500 kr/MWh
Konv. släckare + cyklontork	60	-0,69	-0,51	-0,32	-0,14
Konv. Släckare + Mesatork + Avgaspanna	90	-0,44	-0,12	0,20	0,52
Ängsläckare + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	120	-0,40	-0,07	0,26	0,60
Ängsläckare med spillånga + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	120	-0,31	0,07	0,45	0,82

Tabell 4.5.3

Nuvärdeskvot, investering alternativ B

Present value, ratio to initial investment alternative B

Observera att payoff-tid nedan tar inte hänsyn till ränta.

	Investering Mkr	Payofftid, år			
		Angpris 200 kr/MWh	Angpris 300 kr/MWh	Angpris 400 kr/MWh	Angpris 500 kr/MWh
Konv. släckare + cyklontork	80	30	19	14	11
Konv. Släckare + Mesatork + Avgaspanna	120	17	11	8	6
Ängsläckare + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	160	16	10	7	6
Ängsläckare med spillånga + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	160	14	9	6	5

Tabell 4.5.4

Pay Off tid, Investering alternativ A

Pay Off time, Investment alternative A

	Investering Mkr	Payofftid, år			
		Angpris 200 kr/MWh	Angpris 300 kr/MWh	Angpris 400 kr/MWh	Angpris 500 kr/MWh
Konv. släckare + cyklontork	60	23	14	10	8
Konv. Släckare + Mesatork + Avgaspanna	90	12	8	6	5
Ängsläckare + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	120	12	8	6	4
Ängsläckare med spillånga + Kalklösare + Mesatork + Avgaspanna	120	10	7	5	4

Tabell 4.5.5

Pay Off tid, Investering alternativ B

Pay Off time, Investment alternative B

5 Slutsatser

Maskinutrustning

Projektet har arbetat med frågan hur en ångsläckare bör vara konstruerad med utgångspunkt i tidigare förvärvade erfarenheter och nya idéer som uppkommit under projektarbetets gång.

Inventering av marknaden har lett fram till att två, för oss tidigare okända konstruktioner, har hittats och undersökts.

Utvärderingen, så långt som denna etapp har medgett, kommer fram till att båda konstruktionerna kan ha potential att utföra både mesatorkning och ångsläckning.

Ångsläckningen bör i första hand ske vid atmosfärstryck. Om släckning ska ske vid lägre tryck krävs orimligt stora dimensioner hos de studerade maskinerna.

Man kan återvinna upp emot 8 MW värme med kombinationen Mesatork + Ångsläckare + Avgaspanna, jämfört med ca 3 MW idag. Det återvunna värmets värme är varmare och beräknas ha ett ekonomiskt mervärde av 7 – 20 Mkr/år beroende på ångpris.

Ångsläckning ger högsta nuvärdeskvot och kortast payoff-tid. Konventionell teknik ger stort underskott, ångsläckning ger minsta underskottet.

Sparad energi kan inte drabbas av prisökningar på bränsle. Kostnadsfördelen ökar vid prisstegringar på bränsle eller ånga.

Rökgasflödet varierar idag med mesans fukthalt och hur torkhastigheten är i varje ögonblick. Med fristående mesatork blir rökgasflödet och även daggpunkten jämnare och lägre. Driften av mesaugnen, vilken lätt drabbas av störningar, bör ha förutsättning att bli jämnare om mesatorken flyttas ut ur rökgasströmmen.

”När du gör en besparing ska du se till att samtidigt göra en kvalitetsförbättring”

(Curt Nicolin)

Labförsök

Labförsöken har bekräftat att släckningshastigheten varierar med kalkkvalitet och historia. Mesakalken reagerar långsamt jämfört med stenkalk. Släckningshastigheten avtar kraftigare än väntat vid högre temperatur och lägre ångtryck.

Tester i leverantörernas pilotlab krävs för att få säkra svar på dimensionering och tillämpbarhet i deras specifika utrustning.

Utifrån genomförda egna labförsök samt litteraturstudier bedöms att ångsläckning vid atmosfärstryck och vid högst 250 °C bör vara tekniskt rimligt och ekonomiskt möjligt om energipriserna fortsätter att stiga.

6 Rekommendationer och användning

Följande anledningar kan anföras för att arbeta vidare med indirekt mesatork och ångsläckning:

- Med antagna investeringsnivåer och fortsatt stigande energipriser finns signifikanta kostnadsfördelar för alla redovisade alternativ, jämfört med konventionell släckning och torkning
- Det finns en signifikant energivinst att göra med ångsläckning jämfört med konventionell släckning – mer värmeåtervinning och högre energikvalitet
- Ångsläckning vid atmosfärstryck i kombination med indirekt ångvärmd mesatork har bästa lönsamheten och verkar tekniskt möjligt även om anläggningens komplexitet ökar
- Även konventionell släckare tillsammans med indirekt mesatork och avgaspanna uppvisar god lönsamhet och har mindre teknisk risk. Det är ett naturligt steg på vägen även om man skulle vilja gå vidare till ångsläckning senare
- Styrningen av mesaugnen gynnas av extern mesatork genom jämnare rökgasflöde. Lägre daggpunkt i elfilter är också positivt.
- Projektet har identifierat maskinutrustningar med potential att fungera som mesatork och ångsläckare
- Maskinleverantörernas pilotlaboratorier kan kostnadseffektivt utföra tester som behövs för att bekräfta deras utrustningars tillämplighet och dimensionering

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

- Utföra tester hos maskinleverantör för att få bekräftat att processen fungerar i deras utrustning, och för att kunna göra noggrann dimensionering av mesatorn och ångsläckare
- Projektera en anläggning, ta in fullständiga offerter och ytterligare utvärdera teknik och ekonomi

8 Referenser

- [1] T Ekdahl, R Lundqvist, patenträttsinnehavare
- [2] Projektgrupp KTH Energiprocesser: S Bjotveit, A Gordon, K Ohlsson, E Rutqvist, E Williamsson, "Förstudie Eldriven kalcinering", KTH Kemiteknik/Energiprocesser, Stockholm, juni 2003
- [3] I Bjerle, S Kiuru, "CaO-hydratisering i ångatmosfär", Avd för Kemisk Teknologi, Lunds Universitet
- [4] P Alvfors, "On the high temperature sulphur capture by calcium based sorbents", Avdelningen för Värmeteknik, KTH, Stockholm, 1990
- [5] R Lundqvist, "Hygroskopisk släckning av kalk med ånga eller fuktig luft", Värmeforsks Skogsindustriella Program 2004-2005
- [6] M Kassberg, B Pettersson, "Vitlutberedning", Skogsindustrins Utbildning i Markaryd AB, Markaryd, september 1997
- [7] Liming Shi, Xuchang Xu, "Partially Sulfated Lime-Fly Ash Sorbents Activated by Water or Steam for SO₂ Removal at a Medium Temperature"
- [8] K Laursen, P Mehrani, C J Lim, J R Grace, "Steam Reactivation of Partially Utilized Limestone Sulfur Sorbents"
- [9] K. Laursen et al, "Sulfation and reactivation characteristics of nine limestones", Univ. of British Columbia

Bilagor

- [A] Examensarbete J. Forsberg, "Ångsläckning av kalk", KTH Avd för Kemiteknik, Stockholm, 2007
- [B] Roland Lundqvist, "Kompletterande labförsök, ångsläckning av mesaugnskalk och stenkalk vid atmosfärstryck", Carnot AB, Hudiksvall 2008
- [C] Hans Karlsson, "Kommentarer till ångsläckning av kalk", Avd för Kemisk Teknologi, Lunds Universitet

Bilaga B

Kompletterande labförsök. Släckning av mesaugnskalk och stenkalk vid atmosfärstryck, i ångatmosfär

Försöken har genomförts hos Carnot AB, Hudiksvall, i februari – mars 2008, och utgör en komplettering till de försök som genomförts hos KTH inom Värmeforsksprojektet Ångsläckning av kalk.

Alla försök som redovisas här är gjorda vid atmosfärstryck och utan luftinblandning, men på två olika sätt:

- c) Termogravimetriskt (TGA). Provmängden har varit 3 g med ett undantag (1 g). Provet har omspolats av ånga av bestämd temperatur. Provet har varit upphängt i en noggrann våg, och viktökningen har registrerats under försökets gång.
- d) I en sluten reaktor (stålflaska som vacuumumpats inför försöken). Vattenånga har genererats genom att släppa fram vatten från en fingraderad byrett via en förångare/överhettare till reaktorn. Temperaturen hos ånga och prov har så långt det varit möjligt hållits konstant under försöket. Släckningsgraden har beräknats ur vattentillförsel genom att avläsa byretten under försöket. Under denna variant av försök har provet skakats om genom att reaktorn utsatts för en excentrisk rörelse med hjälp av en motor. Provmängden har varit 20 g med ett undantag (30 g).

Försöken har utförts vid 125, 150, 200, 250 och 300°C.

Att skaka provet gynnar diffusionen. Men en annan fundering är om det kan bildas elektriska laddningar i kalken under skakningen. Släckt kalk verkar vara elektrostatisk. Eftersom vattenmolekylen är kraftig dipol skulle elektrostatiskt laddade kalkpartiklar kunna tänkas hålla kvar vattenmolekyler som därigenom får längre tid på sig att reagera med kalken och bilda hydrat.

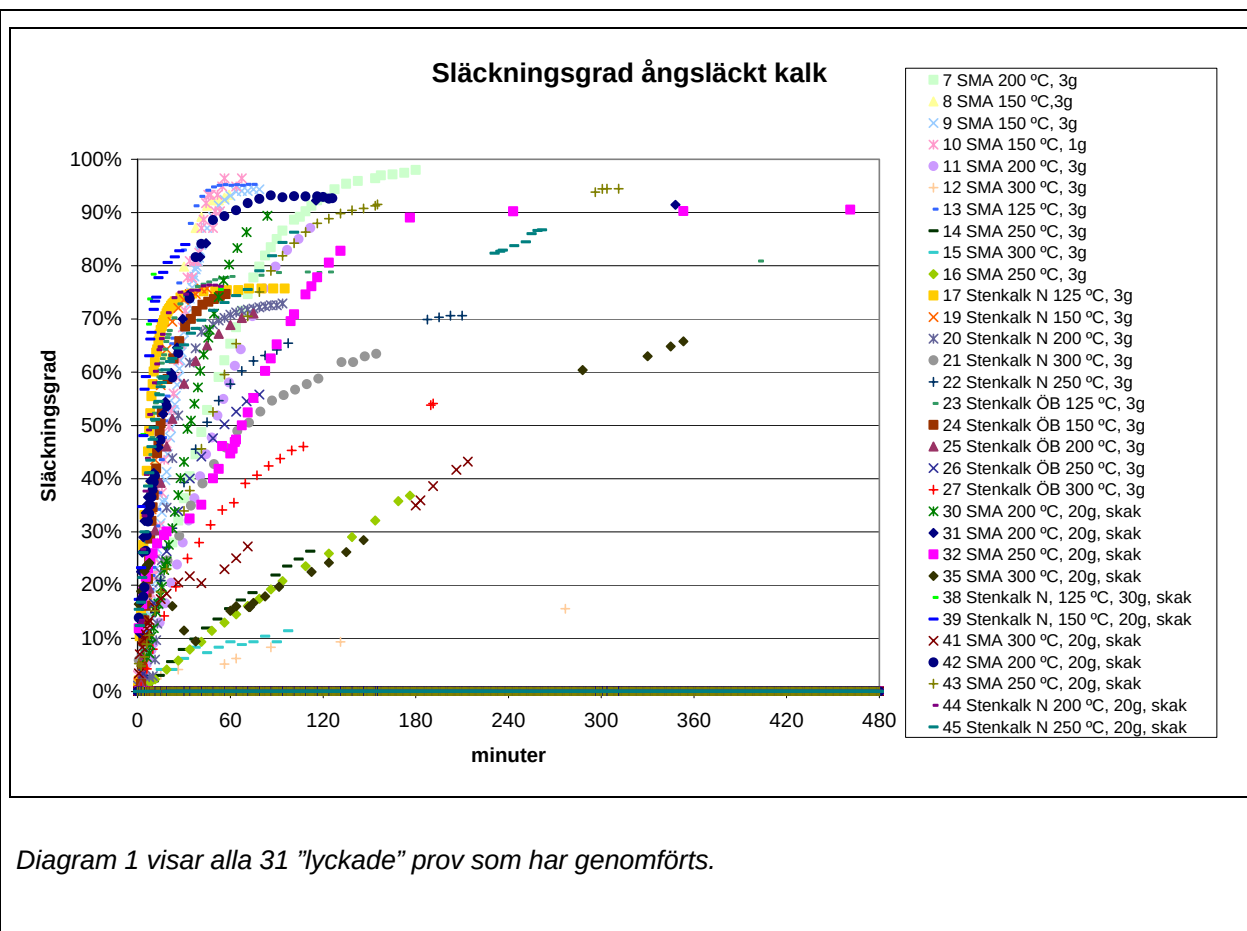


Diagram 1 visar alla 31 "lyckade" prov som har genomförts.

Diagram 1 visar alla 31 "lyckade" prov som har genomförts.

Proven 7-27 är utförda med 3g (1g i ett fall) bränd kalk upphängt i en noggrann våg som avlästs under släckningsförloppet. En kontinuerlig ström av tempererad ånga har omflutit korgen med kalk. Försöken har utförts vid atmosfärstryck.

Proven 30-45 är utförda i en stålflaska som evakuerats med vacuumpump och som har satts i omskakning med hjälp av en elmotor och excenter. Det är möjligt att utföra försöken vid övertryck eller undertryck, men av tidsskäl har försök vid atmosfärstryck prioriterats. Vattentillförseln har mätts genom att en byrett med upplösning 0,02 ml använts. Vattnet som släppts ut ur byretten har förångats och överhettats i en slinga av kopparrör som avslutats med en droppavskiljare (cyklon) för att garantera att inget vätskeformigt vatten kunnat komma i kontakt med kalken. 20 g bränd kalk har använts. Förångaren och stålflaskan har varit placerade i en ugn som hållits vid önskad temperatur under försöken.

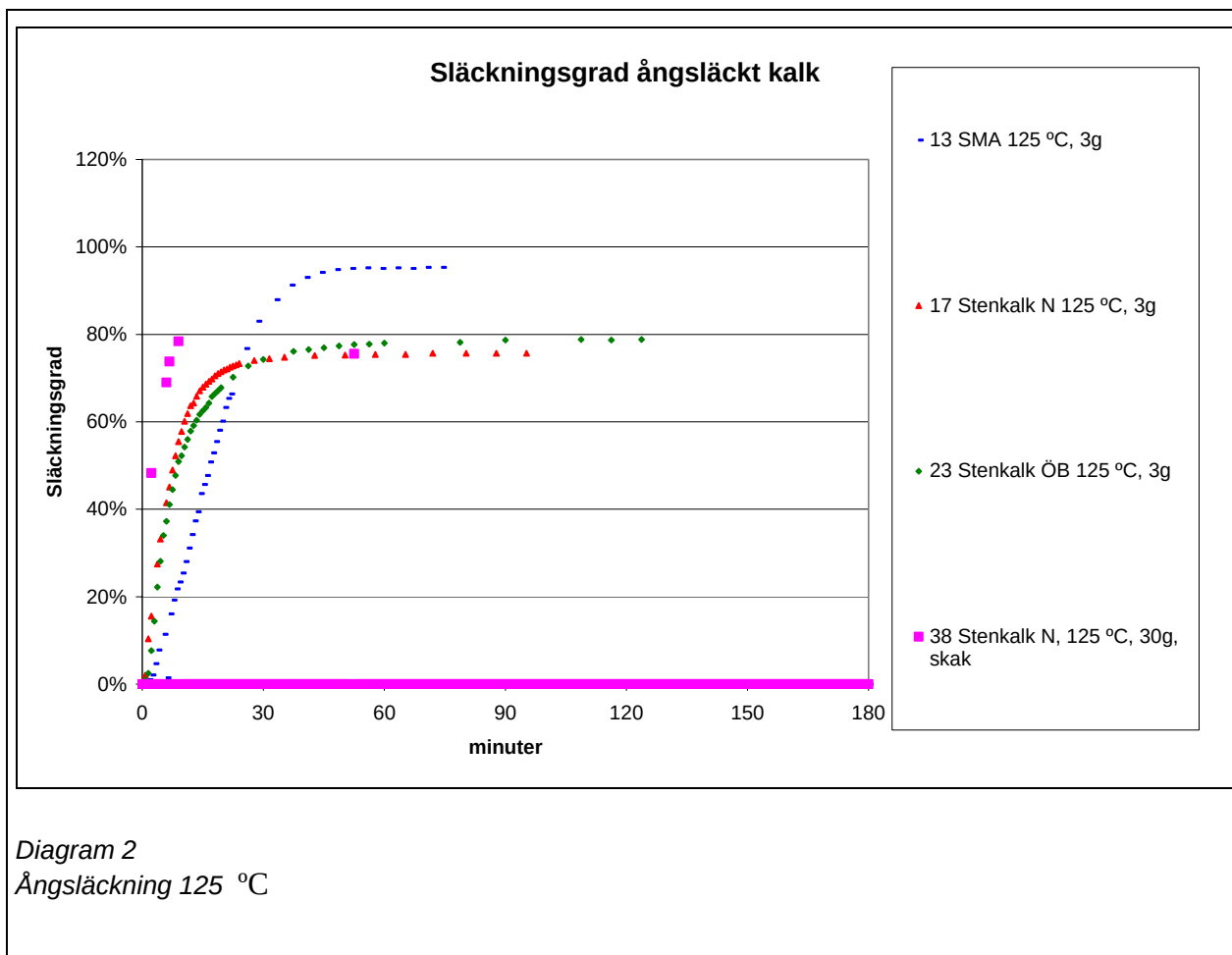


Diagram 2 visar ångsläckning vid 125°C. Mesaugnskalk från SMA (svenska Mineral i Sandarne) samt Stenkalk N (normalbränd) och Stenkalk ÖB (överbränd). Intressant att se att man får en kraftig uppsnabbning genom omskakningen.

Stenkalken reagerar ca 3 ggr snabbare än mesaugnskalken vid lika släckprocess, men kommer inte upp i mer än ca 80 % släckningsgrad, vilket jag tolkar som att den inte är renare än så. Mesaugnskalken tycks ha en gräns vid ca 95-96 % släckningsgrad.

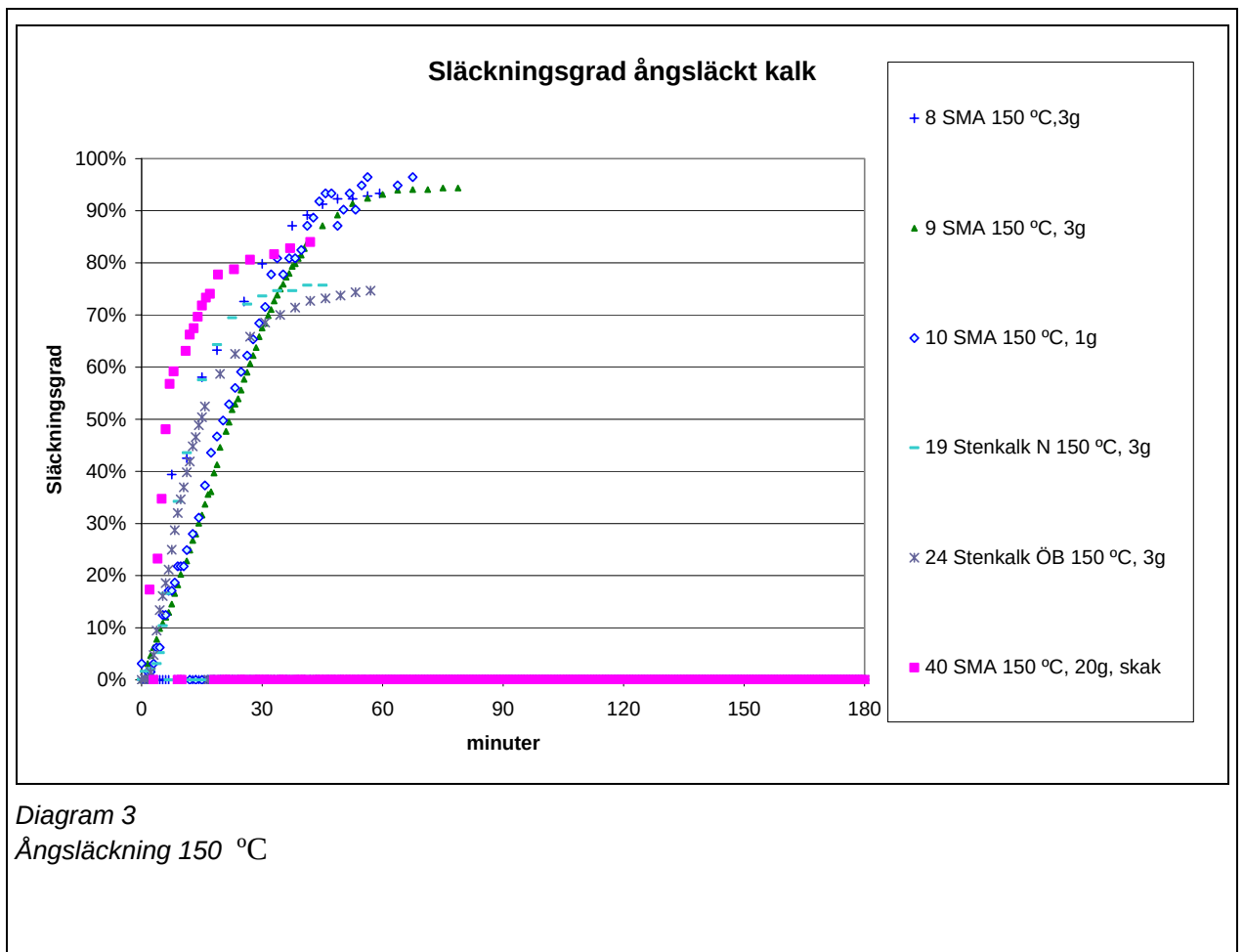


Diagram 3. Vid 150°C har man samma förhållande mellan de olika kalkprodukterna och släckningssätten, men släckningstiden har ökat med ca 50 % jämfört med 125°C

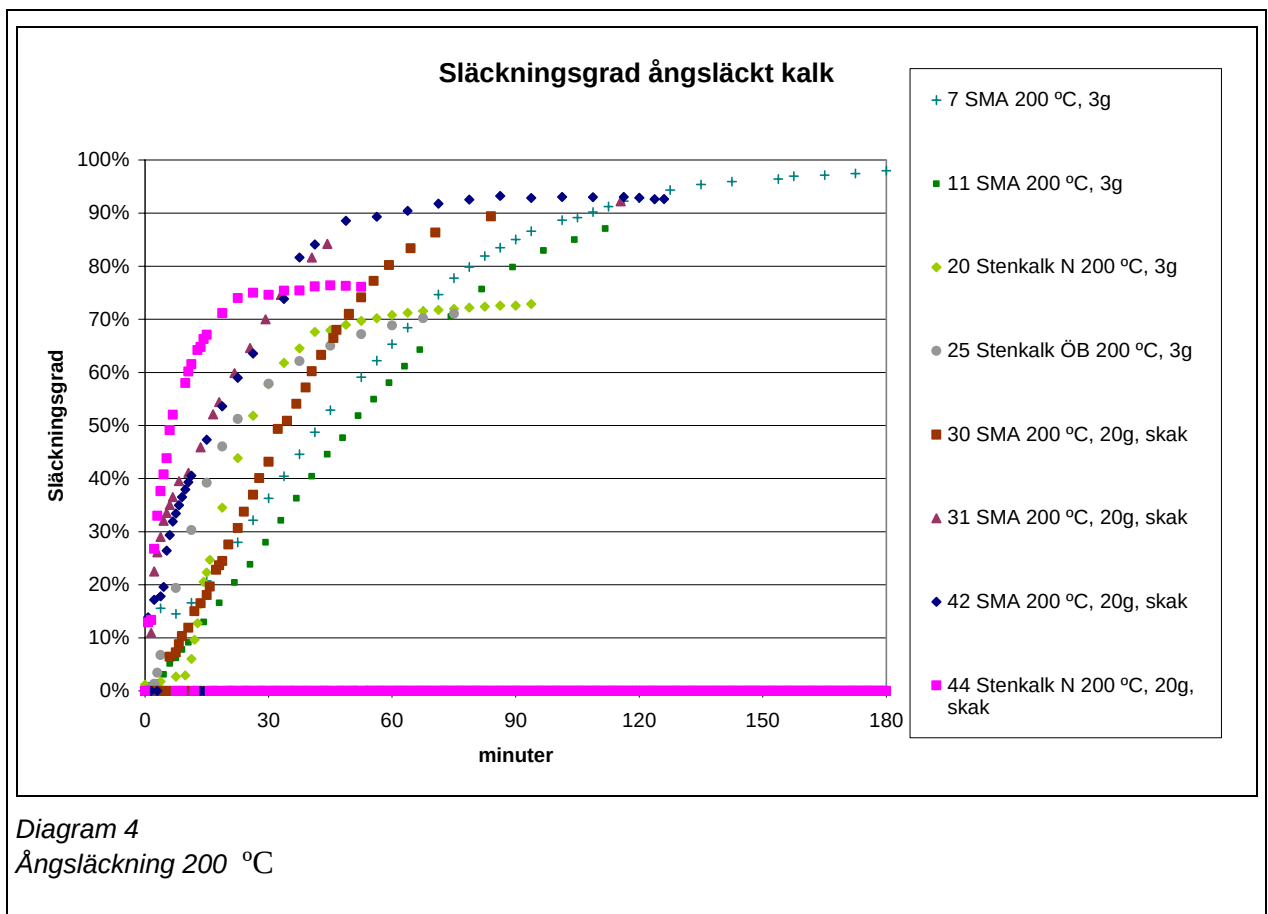


Diagram 4. Släckning vid 200°C. Släckningstiderna har ökat till det dubbla jämfört med 150°C. Vid skakning minskar släckningstiden till cirka en tredjedel jämfört med stillastående prov. Prov 30 avviker dock av okänd anledning.

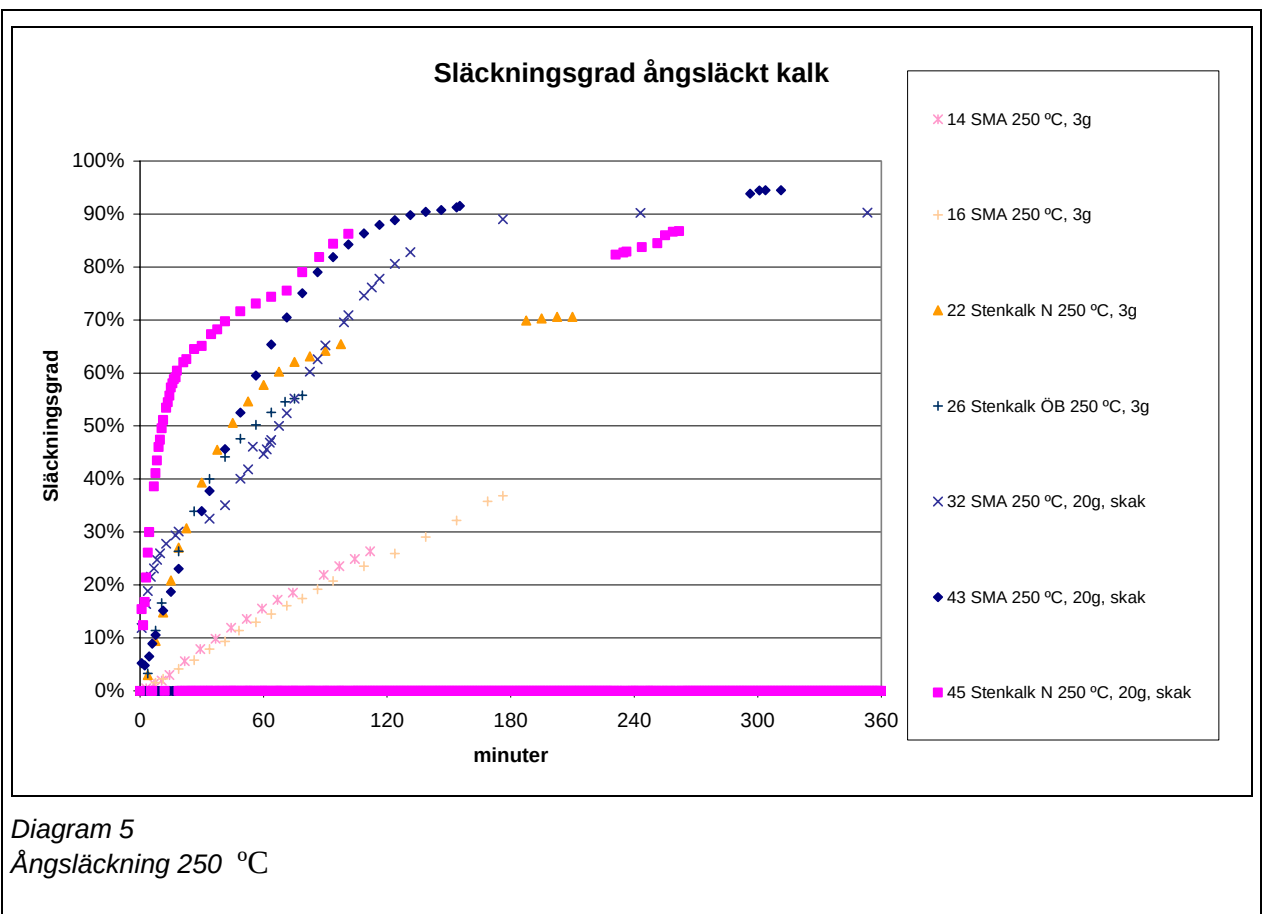


Diagram 5. Släckning vid 250°C. Släckningstiden har ökat 5 gånger för stillastående SMA jämfört med vid 200°C. Stenkalken reagerar mycket snabbare än mesaugnskalken. Omskakning av mesaugnskalken ökar reaktionshastigheten med en faktor 3, men den behöver ändå 1-2 timmar för att i huvudsak bli släckt.

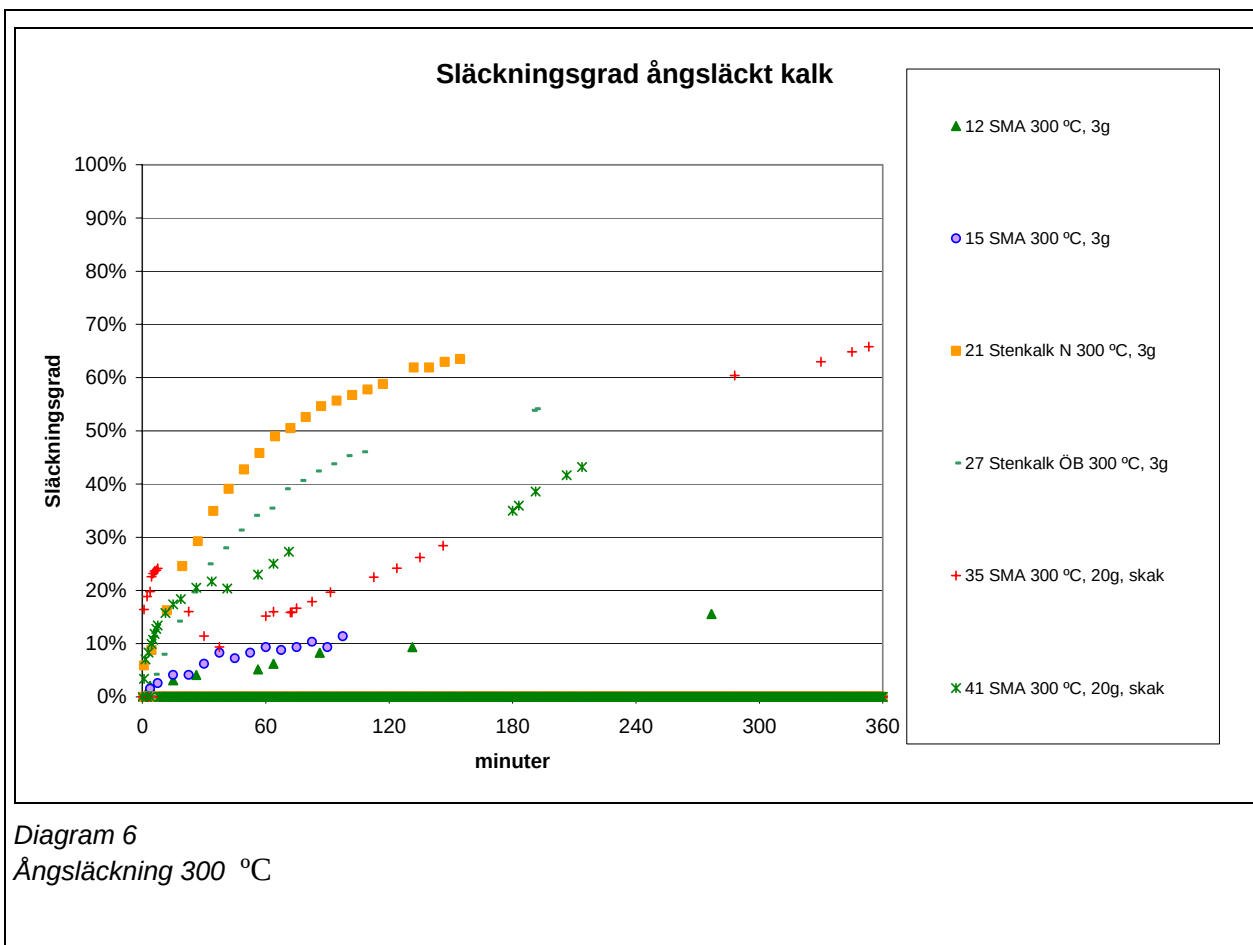


Diagram 6. Släckning vid 300°C. Stenkalken är snabbast och är med stillastående prov i huvudsak släckt efter 2-4 timmar, beroende på om det är normalbränd (N) eller överbränd (ÖB) kalk. Släckning med stillastående mesaugnskalk är mycket långsam, efter 6 timmar har den vid stillastående prov bara nått 20 % släckningsgrad. . Vid släckning med omskakning av mesaugnskalk går det dock 2-3 ggr snabbare än vid stillastående prov.

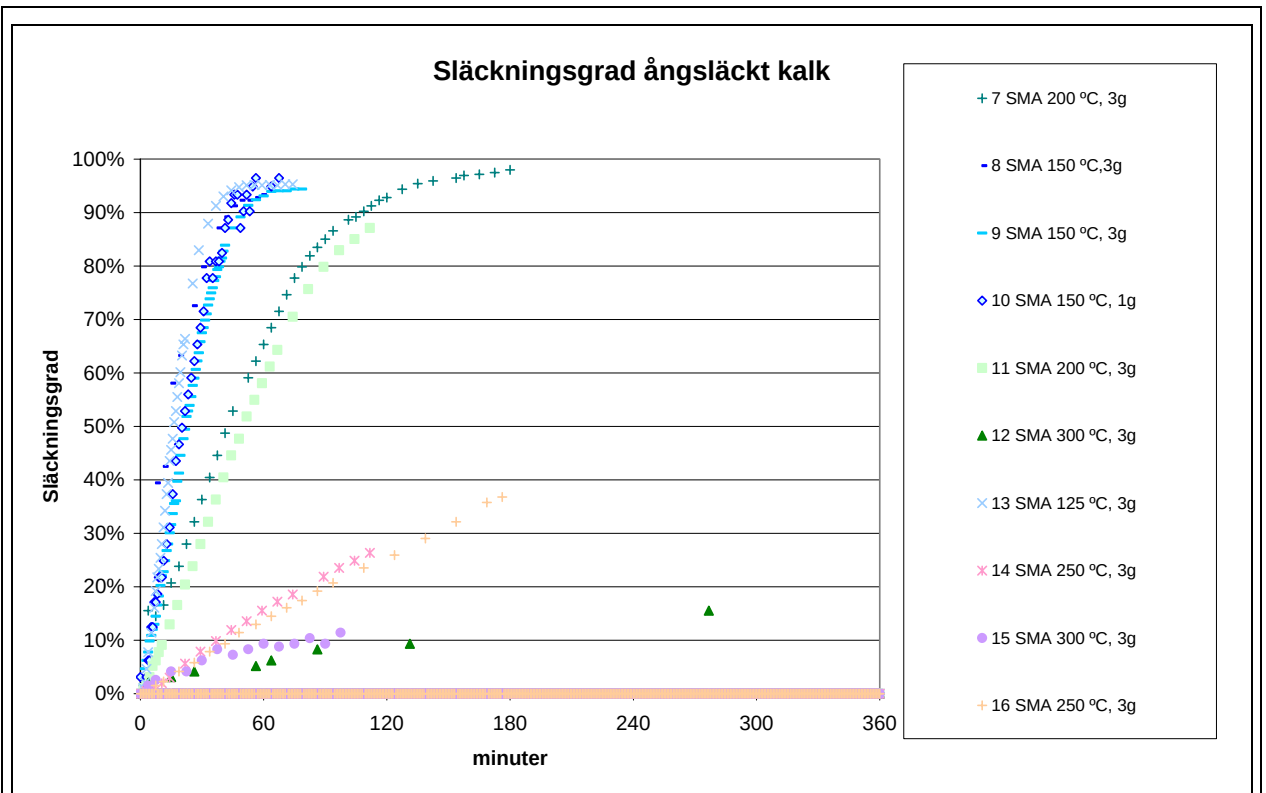


Diagram 7
visar alla SMA mesaugsprov med våg (dvs stillastående prov)

I diagram 7 ser man tydligt att släckningshastigheten avtar kraftigt med ökande temperatur.

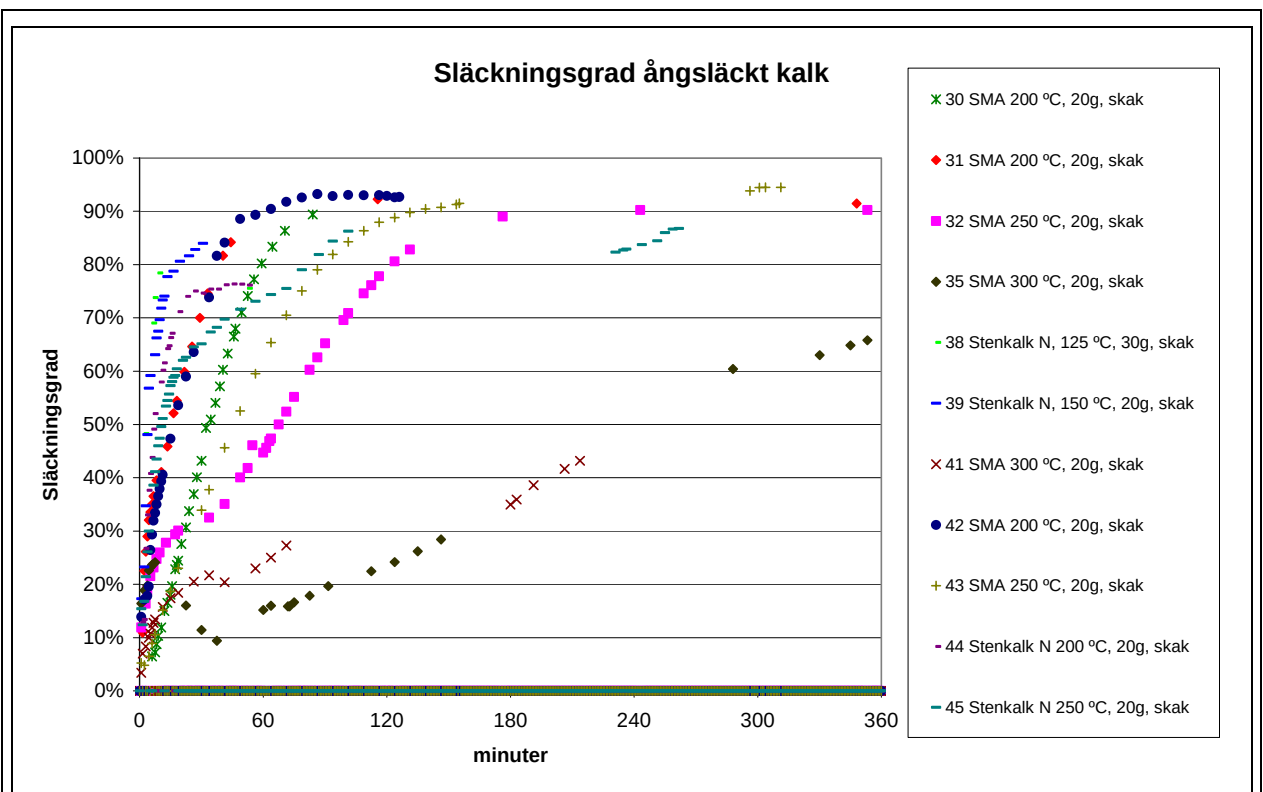


Diagram8

Ångsläckning alla försök med skak

Diagram 8. Alla försöken med skakning. Släckningshastigheten är 3 gånger så snabb som utan skakning. Stenkalken i sin tur är 3 gånger så snabb som mesaugnskalken.

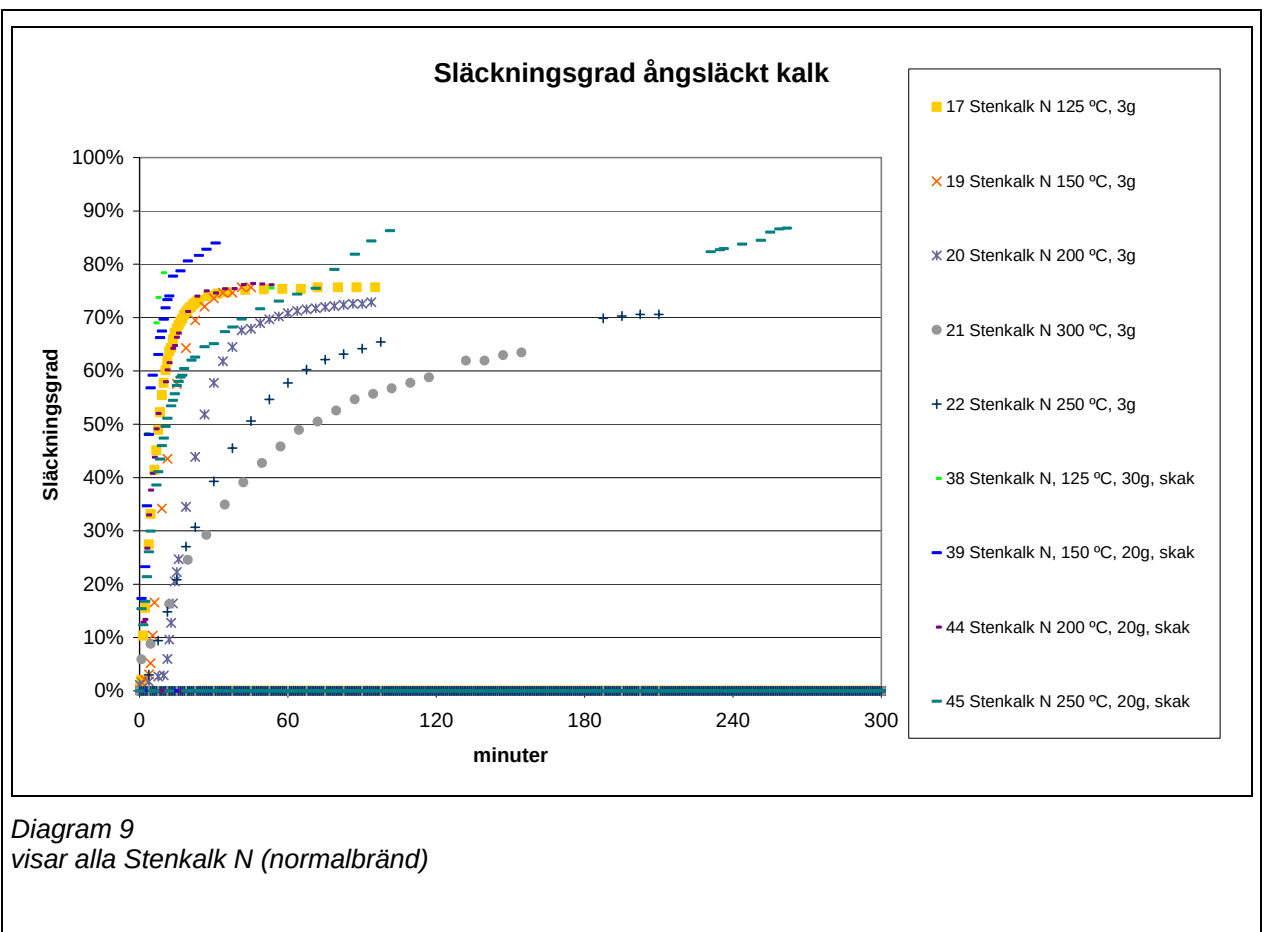


Diagram 9. Släckning av normalbränd stenkalk, stillastående prov och med skakning. Tre gånger så snabbt med skakning.

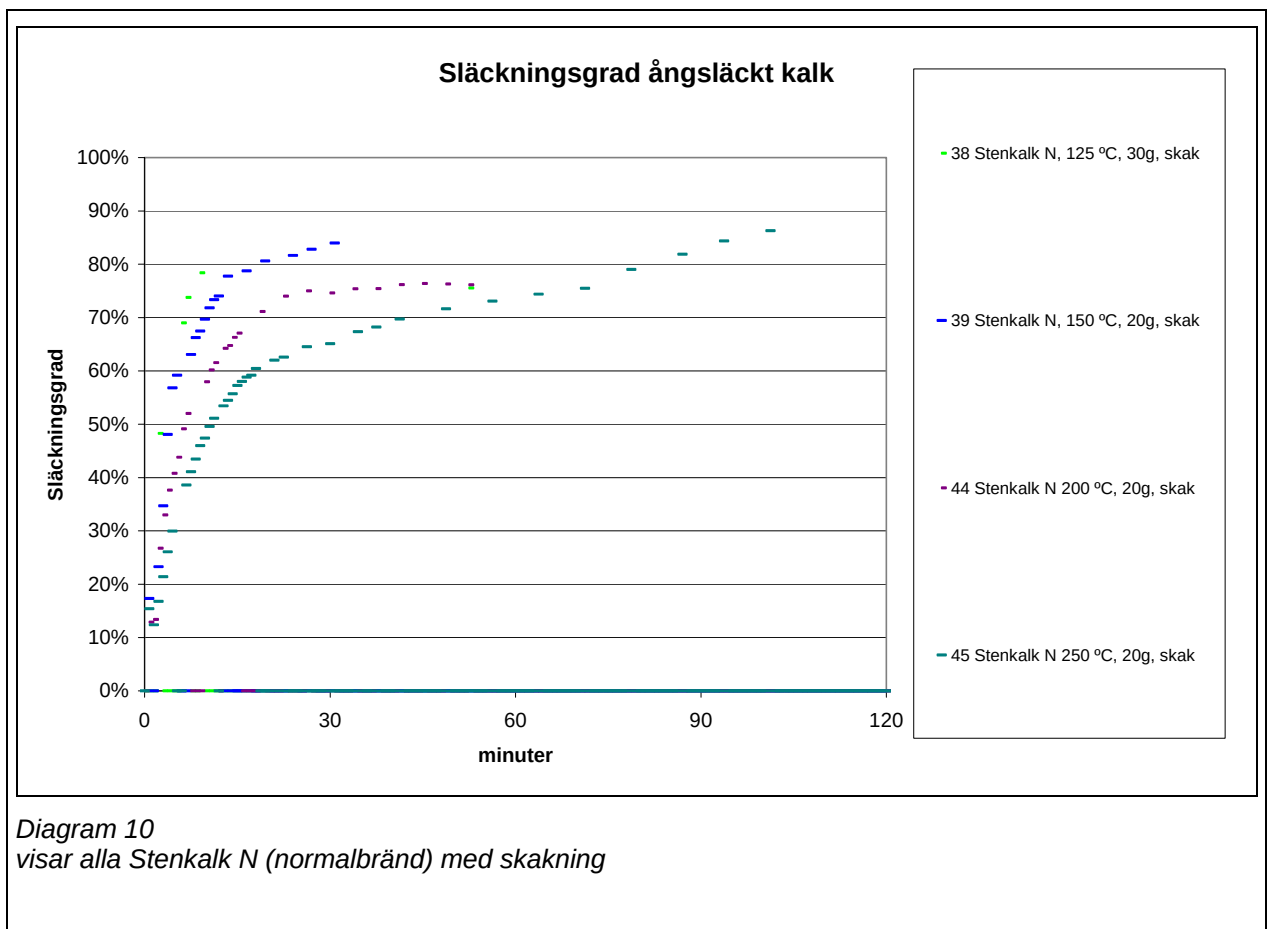


Diagram 10. Släckning av normalbränd stenkalk med skakning.

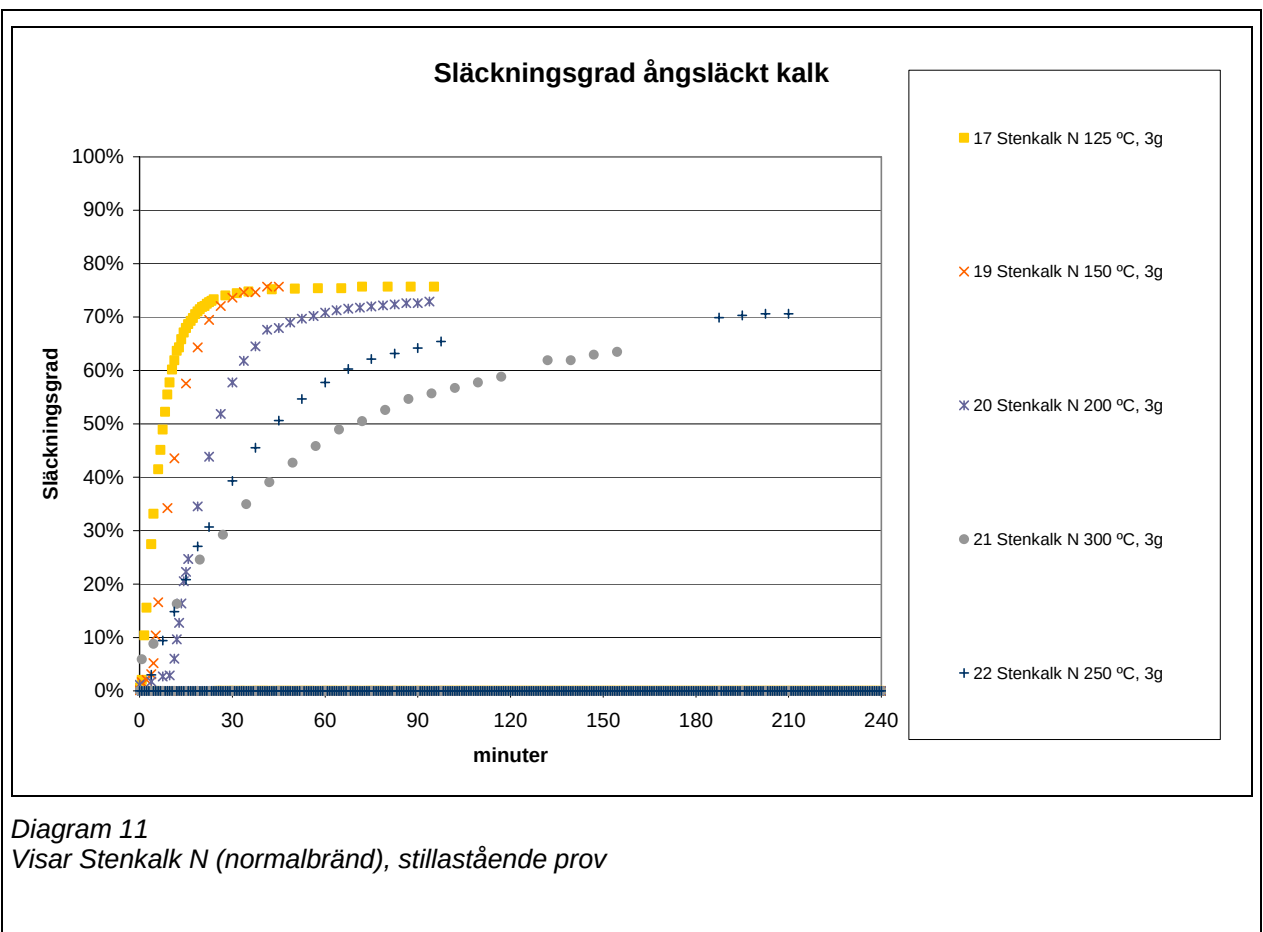


Diagram 11. Släckning av normalbränd stenkalk, stillastående prov, mätning med våg under släckningen.

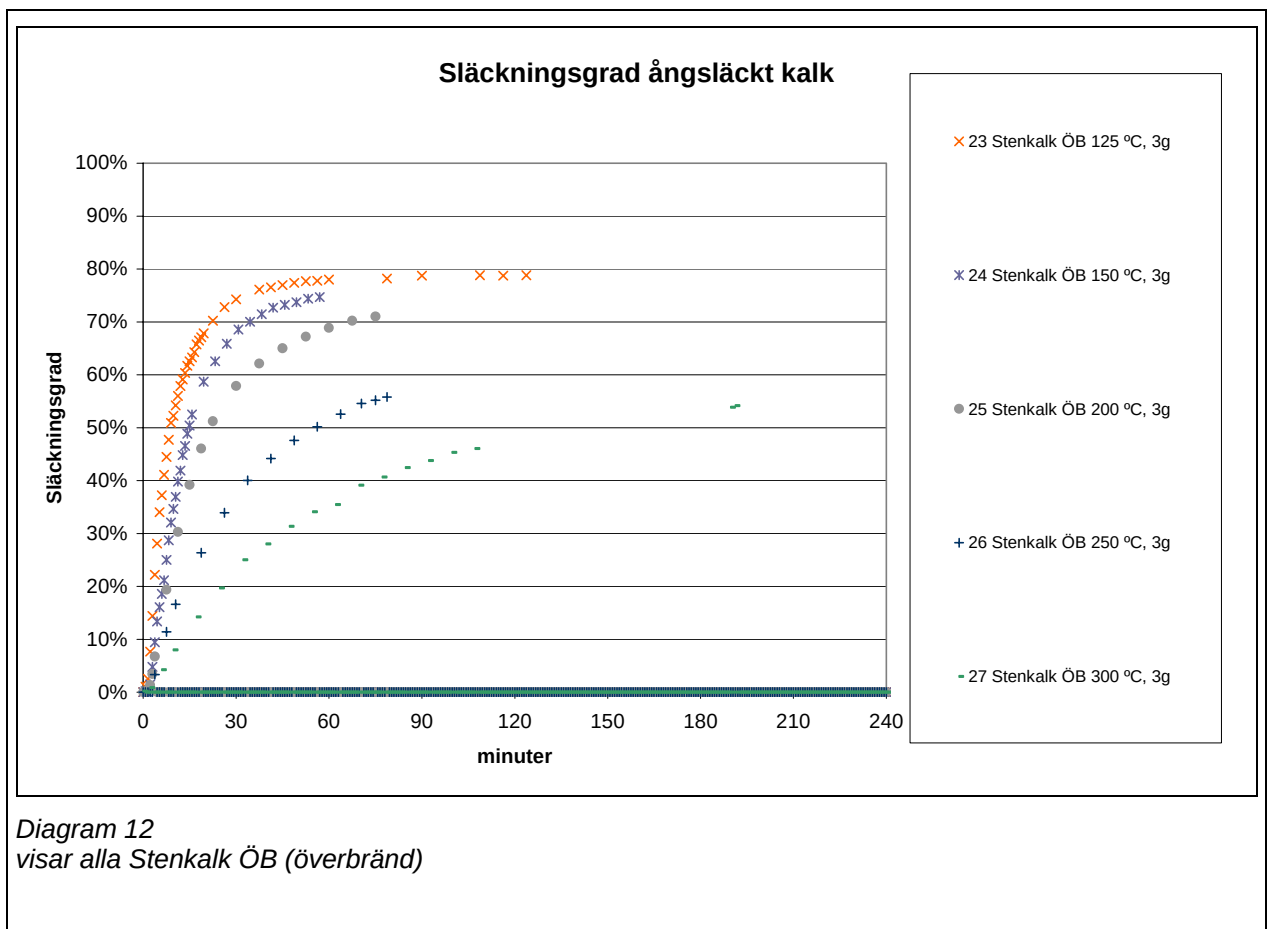


Diagram 12. Släckning av överbränd stenkalk, stillastående prov, mätning med våg under släckningen. Något längre släckningstid än för normalbränd stenkalk.

Funderingar kring ångsläckning av kalk

Hans T. Karlsson
Inst. för Kemiteknik, LTH

2007

Ångsläckning av kalk vid 300 °C är termodynamisk gynnsamt och kinetiskt möjligt. Kinetiken är likvärdig i intervallet 250 - 400 °C. Vid 450 °C är hastigheten halverad och vid 500 °C är hastigheten i princip noll (Laursen *et. al.* 2003). Vid lägre temperaturer är temperaturberoendet mer komplext (Bjerle och Kiuru), antagligen p.g.a. strukturomvandlingar vid släckningen. Hastigheten tenderar att sjunka när man går från 100 °C till 150 °C. Därefter ökar hastigheten något igen med ökande temperatur.

Satsvis släckningsförsök med Kalk A vid 300 °C (Laursen *et. al.* 2003) kan beskrivas med en Shrinking Core eller Particle-Pellet modell under antagande av att det hastighetsbestämmande steget är kinetiskt kontrollerat. Enligt modellerna är omsättningen:

$$X(t) = X_{max} \cdot [1 - (1 - t/\beta)^3] \quad (1)$$

där β är en konstant som beror av kalktyp, temperatur och eventuellt partikelstorlek. X_{max} är maximal släckningsgrad. Denna beror bl. a. av närvaro av dödbränd kalk samt metod för att analysera halten aktiv CaO. För Kalk A erhöles $\beta = 13.3$ min och $X_{max} = 0.83$, se anpassningen i figur 1.

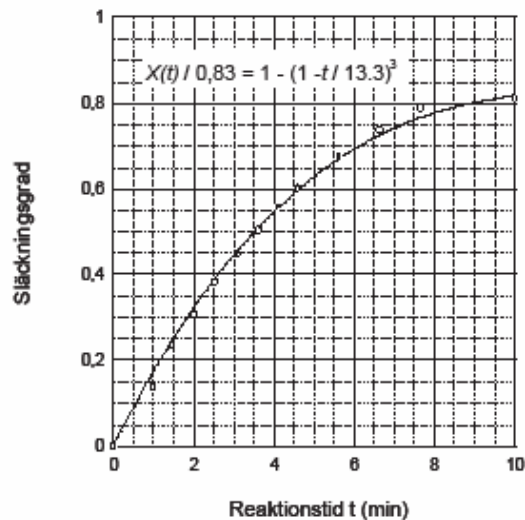
Om man känner kalkpartiklarnas åldersfördelning ($E(t)$) i den industriella ångsläckaren så kan medelomsättningen (släckningsgraden) beräknas som:

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} E(t)X(t)dt \quad (2)$$

Åldersfördelningen, som matematiskt uttryckt är ett pulssvar, kan bestämmas experimentellt, eller uppskattas utgående från geometrier och strömningsförhållanden för den industriella ångsläckaren. Under antagande av frånvaro av dödzoner och bypass i den industriella ångsläckaren kommer det att erfordras en medeluppehållstid mellan 8 och 25 minuter beroende på hur gynnsam åldersfördelningen är.

Funktionen $X(t)$ kan givetvis ersättas med experimentella rådata. Om man inte alls känner åldersfördelningen kan man få en konservativ skattning med åldersfördelningen för en idealt omblandad tank:

$$E(t) = \frac{1}{\theta} \cdot e^{-t/\theta} \quad (3)$$



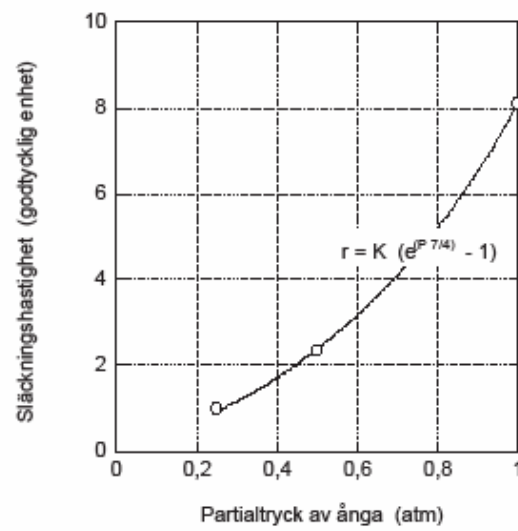
Figur 1: Satsvis ångsläckning av kalk vid 300 °C (Data från Laursen *et. al* 2003)

där θ är det fasta materialets medelhuppehållstid i släckaren.

Utvärdering av data vid 180 °C från Bjerle och Kiuru visar att släckningshastigheten har ett kraftigt beroende av partialtrycket av ånga. Hastigheten vid ca 50% släckningsgrad kan beskrivas enligt följande (se Figur 2):

$$r = K \cdot (e^{(P/4)} - 1) \quad (4)$$

där P är partialtrycket av vattenånga i atm. Släckningstiden är direkt relaterad till inversen av hastigheten. En sänkning av partialtrycket från 1 till 0,2 atm förlänger släckningstiden en faktor 10.



Figur 2: Släckningshastighetens tryckberoende vid 180 °C (Data från Bjerle och Kiuru)