

Tekniska Högskolan i Lund
Avdelningen för Bärande Konstruktioner



Lund Institute of Technology
Department of Structural Engineering

GÅR DET ATT TORKA
BETONGPROVER I
MIKROVÅGSUGN?

EXAMENSARBETE

Handledare: Anders Nilsson

LUND JANUARI 1989

JONAS ANDERSSON

FÖRORD

Föreliggande rapport är ett examensarbete utfört vid avdelningen för Bärande Konstruktioner på Lunds Tekniska Högskola. Under examensarbetets gång har jag fått stor hjälp av personer som ställt upp på intervjuer och försökt att besvara alla mina frågor. Jag vill här passa på att tacka dem för sitt engagemang. Jag vill även tacka min handledare civ ing Anders Nilsson, som har hjälpt och inspirerat mig på ett bra sätt, samt civ ing Jon Gudmundsson och övrig personal på avdelningen för Bärande Konstruktioner.

Lund i Februari 1989

Jonas Andersson

GÅR DET ATT TORKA BETONGPROVER I MIKROVÅGSUGN?

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	SIDA
0. ABSTRACT	3
1. BAKGRUND OCH SYFTE	4
2. ALLMÄNT OM MIKROVÅGSUGNAR	5
2.1 Funktionssätt	5
2.2 Vilka mikrovågsugnar går att använda?	8
2.3 Exempel på användare	9
3. TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR	10
3.1 Torkning av slamprover	10
3.2 Rekonditionering av asfaltsbetong	11
3.3 Torkning av jordprover	12
4. TORKNING AV BALLAST	13
4.1 Material	13
4.2 Försök och resultat	13
4.3 Utvärdering	17
5. TORKNING AV BETONG	18
5.1 Material	18
5.2 Försök och resultat	18
6. DISKUSSION	24
7. REFERENSER	27

BILAGOR

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate if it is possible to dry concrete samples in a microwave oven without damaging the concrete. This method could, if it is possible, facilitate the work in many laboratories today. In the beginning of the work a theoretical study over the behavior of the microwaves is done. Some different areas in the construction business where it is possible to use microwaves, is also mentioned in the text.

The practical part of the work begins with some experiments where the possibility of drying concrete aggregate is investigated. The results from these experiments were very good and the use of the microwave oven for this purpose can easily be recommended.

The results from the experiments with concrete samples are not so easy to interpret. According to the results, it is possible to dry the samples in the microwave oven but simultaneously with the drying a loss in strength has been observed. This is probably caused by the high steam pressure that occur in the concrete during the drying process. The use of the microwave oven for drying concrete samples can therefore not be recommended at this time. More investigations has to be done in order to clear the remaining questions.

1. BAKGRUND OCH SYFTE

Förmågan att komma på nya tillämpningar av känd teknik är ett sundhetstecken för mänskligheten. För ett par år sedan slog mikrovågstekniken för matlagning igenom och mikrovågsugnen kallades för årets julklapp och den perfekta bröllopspresenten. Medan djupfrysta bullar tinades i ugnen började en och annan ingenjör tänka till i fall mikrovågsugnen kunde användas till något på jobbet. Idag finns det även exempel inom byggnadsindustrin där mikrovågsugnar används regelbundet för att spara tid gentemot traditionella metoder. Avsikten med detta examensarbete är att få en första översiktlig kunskap om mikrovågsugnen och dess användande inom betongindustrin.

Examensarbetet består av följande fyra moment:

- * Beskriva hur en mikrovågsugn fungerar.
- * Samla information om användare av och tillämpningsområden för mikrovågsugnar.
- * Torka ballastmaterial i mikrovågsugn och jämföra resultaten med ballast som är torkad i vanlig ugn.
- * Torka betongkuber i mikrovågsugn och bedömma i fall betongens tryckhållfasthet minskar, d v s skador uppstår.

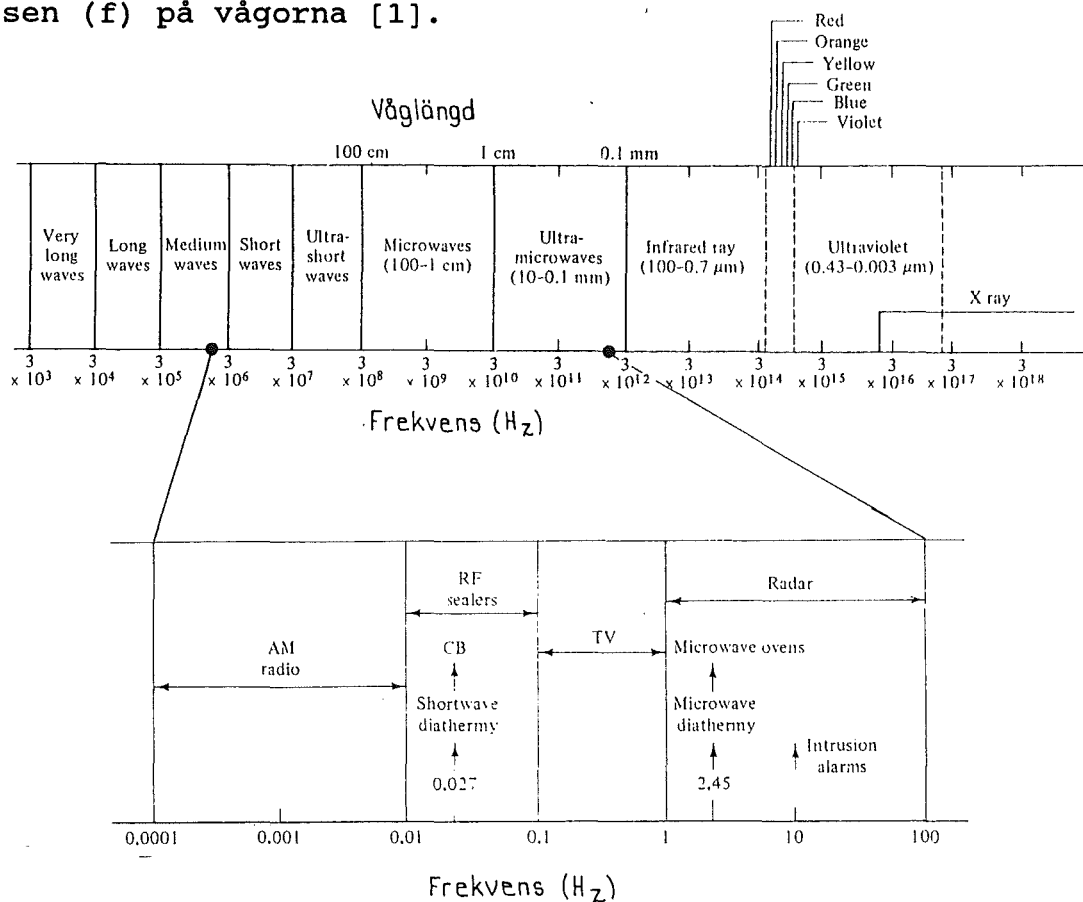
Syftet med de tre första momenten är uppenbart, men det fjärde momentet behöver förklaras lite närmare. Betongkonstruktioner påverkas av laster och miljö. Denna påverkan kan leda till en skadeackumulering och olika nedbrytningsprocesser. I en utvärdering av en konstruktions beständighet behöver båda dessa aspekter beaktas var för sig men också i samverkan. Vid avdelningen för Bärande Konstruktioner på Lunds Tekniska Högskola bedrivs forskning inom detta område och det skulle ge stora tidsvinster ifall en mikrovågsugn kunde användas t ex vid cykeltester.

2. ALLMÄNT OM MIKROVÅGSUGNAR

2.1 Funktionssätt

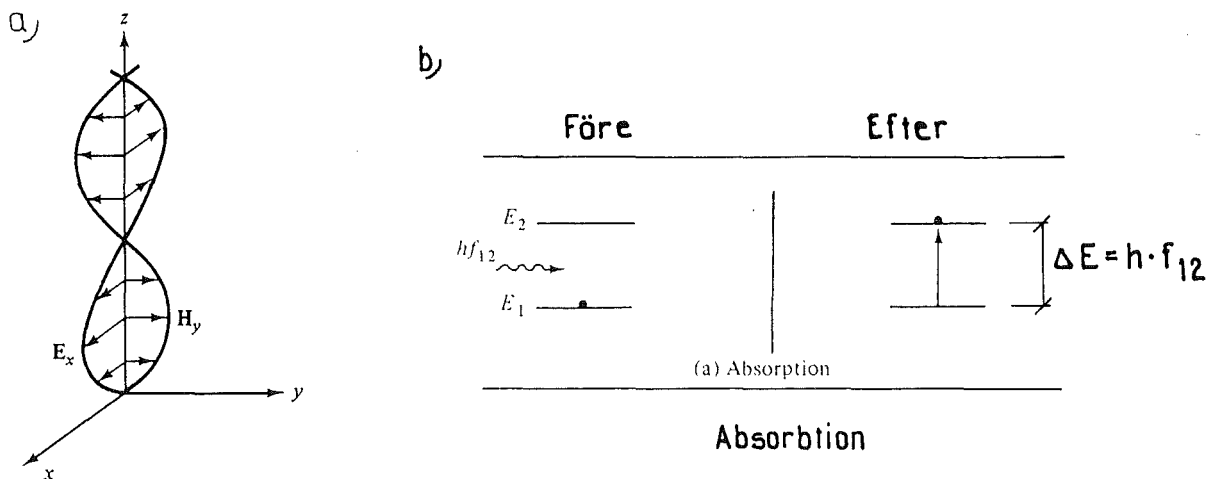
Är torkning av betong och ballastprover i mikrovågsugn möjlig? Hur bör torkningen utföras? För att kunna ge ett tillfredställande svar på dessa och liknande frågor är det viktigt att känna till det grundläggande funktionssättet hos mikrovågor och mikrovågsugnar.

I en mikrovågsugn upphettas material med hjälp utav högfrekvent elektromagnetisk strålning. Mikrovågor definieras normalt som elektromagnetiska vågrörelser med en våglängd mellan 1m och 1mm. Mikrovågor växelverkan med olika typer av materia är beroende av materialet i sig och av frekvensen (f) på vågorna [1].



Figur 1. Elektromagnetiskt spektra och tillämpningsområden för mikrovågor [1].

Speciellt i mikrovågsugnar använder man sig av vågrörelser med frekvenser runt 2450 MHz vilket motsvarar en våglängd på 0.12 m (Figur 1). Mikrovågor, liksom vanligt ljus, kan ses som små energipaket med energin $E=h \cdot f$ där h står för plancks konstant och f för frekvensen. I en mikrovågsugn motsvarar frekvensen, enkelt uttryckt, den energi som krävs för att en vattenmolekyl skall förflytta sig från en energinivå, eller vibrationsmod, till en annan. Vibratio- nen i molekylen ökar, vilket är detsamma som att tempera- turen ökar. Frekvensen på vågorna i mikrovågsugnen är speciellt anpassad så att vattenmolekyler skall absorbera dessa och gå över till en högre vibrationsmod (Figur 2). Denna frekvens (2450 MHz) kallas en resonansfrekvens. Paralleller till egenmoder och resonansfrekvenser hos byggnader, byggnads dynamik, kan dras. En byggnad svarar, som bekant, med stora vibrationer då den utsätts för svängningar med en för byggnaden speciell frekvens. Det- samma gäller för vattenmolekylen som även kan betraktas som en liten byggnad. Vatten molekylers absorbtion av våg- rörelser med olika frekvenser kan utläsas ur ett absorbans spektrum. Det kan även inträffa att molekylen spinn förändras då en viss energimängd tillförs. Rörelsen i molekylen, temperaturen, ökar även då och frekvensen som motsvarar denna energimängd kallas också resonansfrek- vens [1,2].



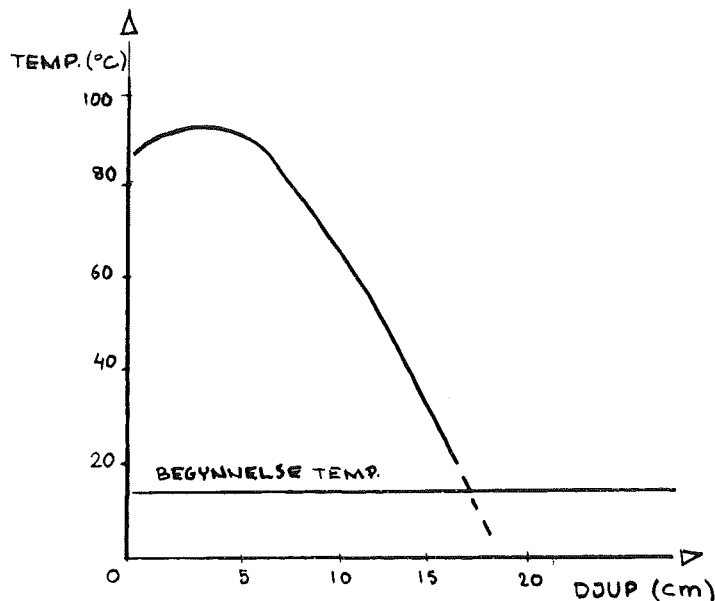
Figur 2a. Elektromagnetisk vågrörelse. H = magnetfält, E = elektriskfält.

Figur 2b. Övergång mellan olika vibrationsmoder med hjälp utav mikrovågor med energin $E = h \cdot f$.

Även andra molekyler än vatten kan ha en resonansfrekvens runt 2450 MHz och alltså absorbera dessa mikrovågor med upphettning som följd. För att ett ämne skall uppföra sig som vatten, vid växelverkan med mikrovågor, krävs dock att molekylerna är uppbyggda på ett sätt liknande vattenmolekylens [2].

Funktionssättet beskrivet ovan är bara en av de olika mekanismer som existerar för växelverkan mellan mikrovågor och materia. De flesta ledare så som metaller och släktningar till dessa växelverkar på ett helt annat sätt med mikrovågor än vad vatten gör. Metallerna kan sägas absorbera all mikrovågsenergi i sitt yttersta skikt, en sorts superabsorbans som t ex kan kortsluta en mikrovågsugn. Detta är anledningen till varför man inte kan använda föremål av metall vid matlagning i mikrovågsugn. Även vissa salter växelverkar på ett annat sätt än här beskrivet [2,6].

Mikrovågorna i en mikrovågsugn alstras av en magnetron, som bara är en utav flera förekommande mikrovågs alstrare. Som exempel på andra kan klystronen och masern nämnas. En utförlig beskrivning av dessa tämligen komplicerade komponenter finns i [1]. Vågorna, som strålar ut i ugnen genom en vågledare, absorberas antingen direkt eller reflekteras mot väggarna i ugnen och preparatet, för att därefter träffa något som absorberar energin. På så sätt uppstår ett komplicerat mönster av strålar i ugnen och energifördelningen blir därför inte helt homogen i rummet. För att uppnå en jämnare energifördelning i preparatet som bestrålas, har vissa ugnar försetts med en roterande platta att placera preparatet på. En mer avancerad utformning av vågledarelementen kan även det ge en jämnare bestråling av preparatet. På de flesta mikrovågsugnar finns det även en timer och en effektväljare så att lämplig energimängd kan ställas in [1,2,3].



Figur 3. Exempel på mikrovågors inträngningsdjup i asfaltsbetong. Temperaturfördelning efter fyra minuters bestrålning (215 kW/m^2) [4].

För att beskriva mikrovågornas inträngningsdjup kan paralleller till synligt ljus dras. Mikrovågor liksom ljus reflekteras nästan helt av vissa material, absorberas av andra och kan passera utan växelverkan genom ett tredje. Blandformer förekommer givetvis. Till skillnad från normal värmeledning angriper mikrovågorna direkt på djupet i en kropp, hur djupt beror främst på material och effekt. I kroppar bestående av olika material värms ämnen som vatten upp genom växelväxkan med mikrovågorna, vattnet värmer sedan omgivande material genom normal värmeledning ($f=2450 \text{ MHz}$). Ett exempel på temperaturfördelning vid bestrålning med mikrovågor kan ses i figur 3. I en mikrovågsgugn är inträngningsdjupet av vågorna i livsmedel ca tre cm [2,4a,5].

2.2 Vilka mikrovågsgugnar går att använda?

I dag finns det en mängd olika typer av mikrovågsgugnar på marknaden, de flesta avsedda för matlagning. Ugnarna avsedda för matlagning skiljer sig inte på någon väsentlig punkt från de ugnar som är framtagna speciellt för laboratorieanalyser. De för vår undersökning relevanta skillnaderna bland marknads hushållsgugnar, ligger i uteffekt

, normalt 600 W, inställningsmöjligheter av effekt och tid samt i förekomsten av roterande platta eller motsvarande. De specialtillverkade mikrovågsugnarna för laboratorieanalyser kan, i motsats till vanliga, ofta dessutom erbjuda en möjlighet att bestråla preparatet med strålpulser vilkas impuls- och paustid helt kan programmeras efter användarens önskemål. Strålningseffekten hos dessa specialugnar påstås även vara mer likformig än hos vanliga mikrovågsugnar. Detta gäller mikrovågsugnen CM microtronic som är framtagen i västtyskland speciellt för torkning [3].

Vid våra försök har vi genomgående använt en vanlig mikrovågsugn för hushållsbruk med roterande platta. Denna ugn anser vi fullt tillräcklig för denna undersökning.

Sammanfattningsvis kan man säga att alla mikrovågsugnar går att använda eftersom de i grund och botten fungerar likadant. För att åstadkomma en mer skonsam torkning kan en specialugn med intervallbestrålning användas.

2.3 Exempel på användare av mikrovågsugnen

Trots avsaknaden av hänvisningar och bestämmelser inom detta område finns det redan idag statliga verk och andra företag som använder sig av mikrovågsugnen som ett hjälpmedel. Mikrovågsugnarna används då främst som ett komplement till vanliga ugnar vid fuktkvotsbestämning och andra torkningsprocesser. Ett exempel är vägverkets laboratorium i Arlöv utanför Malmö, där man använder mikrovågsugnen som ett grovt inriktningsinstrument för fuktkvotsbestämning av diverse naturmaterial. Ugnen används, enligt vägverket, dock enbart för snabba översiktskontroller och alltså inte för kvalitetsanalyser [7].

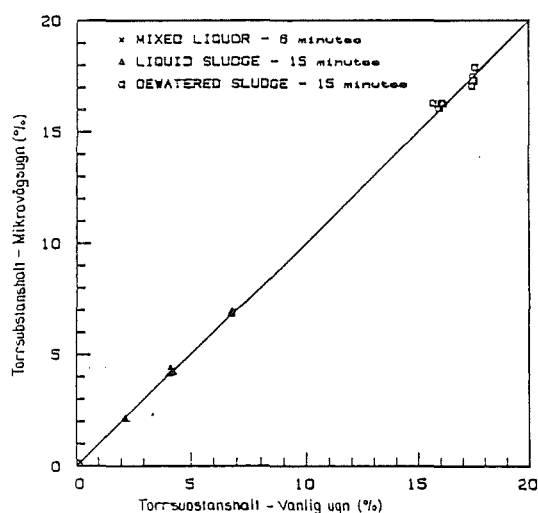
Ett annat exempel på användare av mikrovågstekniken är California Transportation Department i USA. Med hjälp av mikrovågsenergi upphettar och lagar de vägbeläggning så som asfaltsbetong och liknande material som har fått sprickskador [4a].

3. TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR

3.1 Torkning av slamprover

Möjligheten att använda mikrovågsugn vid torkning och bestämning av torrsubstans hos diverse slamprover har tidigare undersökts i två olika rapporter. De två undersökningarna, Campbell/Crescuolo [8] vid Wastewater Technology Center (WTC) i Burlington, Canada och Lumley/Kuhlin [9] vid Ryaverken/Chalmers tekniska högskola, är mycket likartade och leder båda fram till ungefär samma resultat. Försöken utfördes med mikrovågsugnar avsedda för hushållsbruk. Båda undersökningarna omfattar försök med maximal effekt (ca 600 W). Slamproverna som undersöktes av [8] hade en torrsubstanshalt mellan 0.2 % - 15 %. Slamproverna i [9] var av liknande kvalitet.

Proverna genomgick i båda fallen en filtrering före analys varvid torrsubstansen i förhållande till volymen ökade avsevärt, dessa kan därför fuktmässigt jämföras relativt bra med naturfuktig ballast. Ingen kvalitativ undersökning av de torkade produkterna gjordes. I båda fallen ger undersökningarna en mycket god överensstämmelse mellan prover torkade i värmeskåp (105 °C) och prov torkade i mikrovågsugn, under förutsättning att en roterande platta för preparaten fanns. Cambell och Crescuolo [8] fick mycket ojämn torkning och prov som förstördes då man torkade utan roterande platta. Figur 4 visar resultatet från [8] då roterande platta användes.



Figur 4. En jämförelse mellan prover torkade i mikrovågsugn och vanlig ugn. Den räta linjen motsvarar perfekt överensstämmelse [8].

Slutsatsen av dessa undersökningar är att mikrovågsugnen fungerar utmärkt för snabba, men ändå exakta, analyser av slamprover.

3.2 Rekonditionering av asfaltsbetong

Vid Microdry Corporation, San Remo California, har man undersökt och utvecklat en teknik att med hjälp av mikrovågsenergi upphetta och laga väg- och brobeläggningar. Undersökningarna har gett goda resultat.

Vägbeläggning av asfaltsbetong som har drabbats av frostskador och andra påfrestningar med sprickor och deformationer som följt upphettas till en temperatur på mellan 100 och 150 °C [4a].

Upphettningen verkar, enligt undersökningen, simultant och likartat över ett djup på ca. 15 cm. Asfalten blir i detta tillstånd lätt att bearbeta och reparera. Inga skador på betong, asfalt eller ballast pga mikrovågor har rapporterats i undersökningen.[4:a,b]

Vidare framkom det att den typ av mikrovågor som användes i det här projektet inte påverkade asfalten i sig nämnvärt. Det som absorberar mest energi är sten och ballast vilka förekommer till en andel av 45 % i asfaltsblandningen. Värmeutvecklingen i dessa material smälter i sin tur asfalten.[4a]

Absorbtionen av mikrovågorna bland de olika stenmaterialen i ballasten skiljde sig endast med ± 14 %. Mikrovågorna som användes i undersökningen har en sådan egenskap att energiåtgången för att upphetta vatten till en given temperatur är fem gånger så hög som för att upphetta vägbeläggningen till samma temperatur.[4a]

Ett annat viktigt användningsområde, enligt Microdry Corporation, är möjligheten att laga sprickor i ytskiktet på betongbroar. Mikrovågorna upphettar och driver ut smuts och vatten med hjälp av ett förhöjt ångtryck. Asfalt kan sedan tränga ner i sprickorna och försluta betongen.[4a]

Försök har även gjorts med elektromagnetiska vågrörelser från det infraröda spektrat, men dessa hade inte samma djupgående verkan.[4a]

Mikrovågorna som användes i dessa undersökningarna skiljer sig i frekvens från de som används i mikrovågsugn. Det som här används är vad man kallar RF-sealers (RF= radiofrequency), dvs man använder sig av mikrovågor med en högre frekvens, 10 - 100 MHz, för att värma upp olika material. Dessa vågor har inte samma utpräglade effekt på vattenmolekyler utan är anpassade till andra material som grus och sten.[1]

3.3 Torkning av jordprover

En undersökning, i mycket liten skala, angående torkning i mikrovågsugn har gjorts vid vägverkets laboratorium i Jönköping. Torkning i mikrovågsugn av naturmaterial såsom grus och lera jämfördes med normal ugnstorkning men resultaten finns tyvärr ej dokumenterade. Resultaten var dock såpass goda att man idag använder sig av mikrovågsugn vid torkning och fuktkvotsbestämning när detta anses vara ett lämpligt alternativ.[10]

Mikrovågsugnen som användes var avsedd för hushållsbruk och effekten sattes till 720 W. Torktiden för naturfuktigt material med en kornstorlek upp till 18 mm och en provstorlek på 1.3 kg, var 8 minuter.[10]

4. TORKNING AV BALLAST

4.1 Material

Vid samtliga försök har ballast av samma kvalitet och ursprung använts. Ballasten har analyserats enligt svensk standard (13 21 22, 13 21 23, 13 21 26) [11] varvid följande värden framkom:

fuktkvoten	$u = 0.5 \%$
densiteten	$p = 2625 \text{ kg/m}^3$
finhetsmodulen	$M = 2.58$

Ballasten som bestod av grus från Åstorp hade ingen kornstorlek som översteg 8 mm i diameter. Vid torkningen enligt [11] användes en normal ugn med temperaturen $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Siktningresultaten dvs siktkurvan för ballasten återfinns i bilaga 1. Tre olika siktningar gjordes med mycket god överensstämmelse.

Den mikrovågsugn som användes vid försöken är en standard ugn avsedd för hushållsbruk. Ugnen är av typ UPO, modell DMR-603 och har en maximal energiförbrukning på 980 W med en korresponderande uteffekt på 500 W. Effekten kan varieras mellan fem olika fasta lägen. De lägen som här har använts är High (motsvarar en uteffekt på 500 W), Medium (300 W) och Warm (100 W).

Frekvensen på mikrovågerna i ugnen är 2450 MHz. Ugnen som rymmer 18 l är även utrustad med en roterande platta att ställa prover på, samt med en timer (0 - 35 min).

4.2 Försök och resultat

Två olika typer av försök utfördes, försök A och försök B. Vid försök A torkades ballasten i mikrovågsugn för att utröna hur torkkurvorna vid olika effekter ser ut. Vid försök B jämfördes värden från ballast torkad i mikrovågsugn med värden från normal ugnstorkning vid $105 \text{ }^\circ\text{C}$. Maximal temperatur i ballasten uppmättes också för att kontrollera om orimligt höga temperaturer uppstod.

Försök A

Ballasten fuktades med vatten så att en relativt hög fuktkvot uppnåddes. Gruset fuktades dock inte så mycket så

att det "blödde", dvs allt vattnet bands av gruset. Prov om 500 ± 5 g vägdes upp och placerades på en porslinstallrik. Proverna fördelades jämt över tallriken. Torkningsförsöken i mikrovågsugnen gjordes på de tre olika effektnivåerna High, Medium och Warm. Försök gjorda på samma effektnivå har gjorts med grus från samma blandning. Tidtagningen, som primärt sköttes av timern, kontrollerades med tidtagarur. Fyra försök på effektnivåerna High och Medium utfördes. Däremot utfördes endast ett på effekten Warm då torkningsprocessen på denna effekt var mycket lång och därför inte så aktuell att undersöka.

Vid torkningen vägdes prov och tallrik tillsammans varefter de torkades i mikrovågsugnen i en minut. Prov och tallrik vägdes därefter igen och torkades i ytterligare en minut i ugnen. Detta förfarandet upprepades tills det att viktnedgången avstannade helt. Ingen omrörning av provet under torkningen gjordes.

Mot slutet av varje delförsök ökades tiden i ugnen till två minuter och därefter till fyra minuter för att påskynda slutfasen av torkningen. Detta gjordes då viktnedgången understeg 4 g. Pausen som uppstod vid vägningen var i medeltal 20 s.

Efter varje torkningsförlopp kontrollvägdes tallriken varvid framkom att ingen viktnedgång av densamma hade skett.

Förutom de tre totala torkningsförsöken på effekterna High och Medium med vägning varje minut (prov 1,2,3,5,6 och 8) utfördes även ett längre sammanhängande torkningsförsök på vardera av dessa effektlägen. På effekten High torkades ett prov (prov 4) i 20 minuter och på effekten Medium ett prov (prov 7) i 34 minuter, vilket var den tid som behövdes för att torka respektive prov enligt metoden med pausintervall.

Vid torkningen av ballast på effektläge Warm fullföljdes inte hela torkningen utan avbröts då en fullständig torkning hade krävt en orimligt lång tid i ugnen. Fuktkvoten uppskattades därför, baserat på utseendet, till 11 % och torkningen utvärderades sedan med detta i åtanke.

Resultaten från torkningsförsöken med vägning varje minut finns sammanfattade i diagrammen 1-3 nedan. Prov 4 som torkades i 20 minuter på effektläge High gav en fuktkvot på 13.3 % och motsvarande prov på medium, prov 7, gav en fuktkvot på 14.9 % .

TORKNING AV BALLAST I MIKROVÅGSUGN
 Grus från Åstorp
 Effektläge HIGH

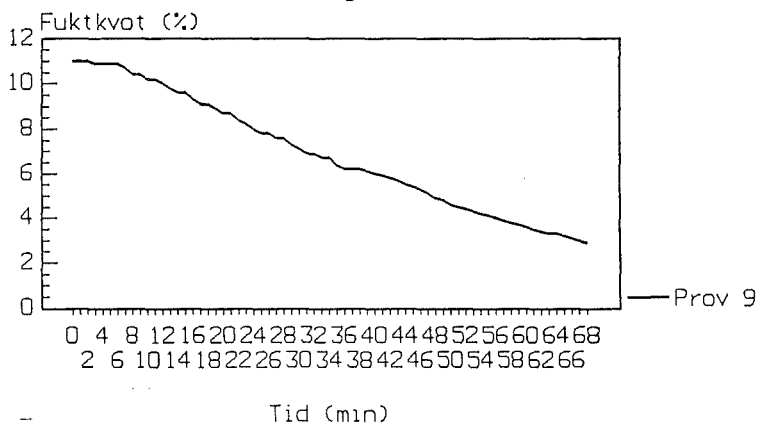
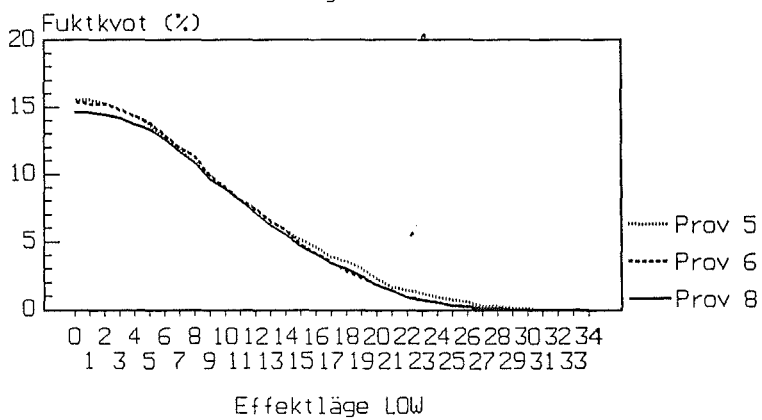
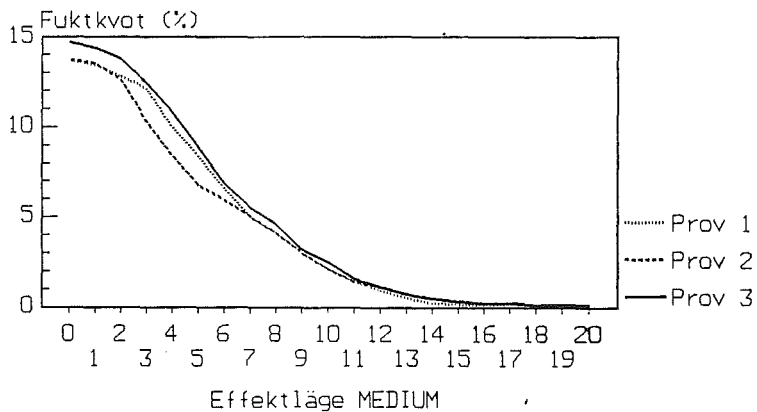


DIAGRAM 1 - 3. Torkningskurvor för ballast torkad i mikro-
 vågsugn.

Försök B

Ballasten fuktades på samma sätt som innan, dvs till något mer än naturlig fuktkvot (ca.10 %), och två prover om vardera 1 kg vägdes upp. Proven delades i två portioner och vägdes på nytt. En del torkades sedan i vanlig ugn vid 105 °C medan den andra delen simultant torkades i mikrovågsugn. Torkningen i mikrovågsugnen skedde på effektläge High i 30 minuter vilket är längre tid än vad som behövs för att torka bort all fukt från ballasten. Orsaken till detta var att jag ville undersöka om en så extrem belastning kunde påverka den slutliga fuktkvoten så att denna blev större än hos proverna torkade på vanligt sätt. Den höga belastningen skulle också ge en fingervisning om hur höga temperaturer som maximalt kan uppnås. Temperaturen mättes med en elektronisk termogivare som stacks ner på olika punkter i den heta ballasten.

Resultaten från detta försök redovisas i tabell 1 nedan. De två proven, 20 och 21, delades upp i två delar var. 20u och 21u torkades i vanlig ugn medan 20m och 21m torkades i mikrovågsugn. Vid torkningen av prov 21m gjordes efter 15 minuter en paus på en minut då temperaturen mättes.

TABELL 1.

Torkning i mikrovågsugn:

Prov	Effekt	Vikt	Temp. (°C) (15 min.)	Temp. (°C) (30 min.)	Fuktkvot (%)
20m	High	525 g	-----	220 - 240	15.6
21m	High	520 g	120 - 140	140 - 160	15.8

Torkning i vanlig ugn:

Prov	Vikt	t = 1 dygn Fuktkvot (%)	t = 3 dygn Fuktkvot (%)	Temp. (°C)
20u	384 g	16.0	18.5	105
21u	506 g	15.8	17.7	105

4.3 Utvärdering

Jämförelser mellan torkning av ballastliknande material i mikrovågsugn och vanlig ugn har redan gjorts av [8],[9] och [10]. I samtliga fall har goda resultat erhållits.

Överensstämmelsen i denna undersökning, mellan torkning i mikrovågsugn och vanlig ugn, är också tämligen god. Speciellt om man jämför de mikrovågstorkade proverna med ett dygns torkning i vanlig ugn, så är överensstämmelsen mycket god. En orsak, till de ändå existerande skillnaderna, kan vara att proverna inte har kunnat delats helt korrekt. Även det faktum att ingen omrörning av provet skedde, vilket annars är brukligt, kan vara en orsak till de något lägre fuktkvoterna vid mikrovågstorkningen. Att en större fuktkvot uppnåddes i vanlig ugn dementerar spekulationerna om att torkningen i mikrovågsugn skulle vara för kraftig.

Torkkurvorna för effekterna High och Medium är mycket tillfredställande. Kurvorna är så beskaffade att det är lätt att bestämma en torktid som ligger på den säkra sidan för att en fullständig uttorkning skall ha skett.

Torkning på effekten Warm är ej lämplig då torkkurvan planar ut mycket långsamt.

Tidsvinsten jämfört med vanlig ugnstorkning är mycket stor. Torktider på 20 minuter med mikrovågsugn har uppmätts, vilket skall jämföras med över 24 timmar för samma prov i vanlig ugn vid 105 °C.

Temperaturerna som uppmättes vid extremlastning i mikrovågsgugnen, nådde ej orimliga nivåer vilket indikerar att ballasten inte bör ta skada vid mikrovågstorkning. Enligt vägverket kan dock problem uppstå om delar av provmaterialet är svartfärgat. Dessa material kan då bli överhettade p g a att de värms upp snabbare än andra ingående komponenter.

Torkning av ballast i mikrovågsugn är alltså ett mycket bra och tidsbesparande komplement till den vanliga ugntorkningen. Detta har i viss mån redan konstaterats av vägverket där man redan nu använder sig av mikrovågsgugnar för detta ändamål.

I denna undersökning kunde ett större antal jämförande försök, mellan mikrovågsugn och vanlig ugn, gjorts, men då detta till stor del redan behandlats i andra undersökningar, koncentrerade jag mig på torkningsförloppen.

5. TORKNING AV BETONG

5.1 Material

Två olika betongkvaliteter gjöts, en med ett vatten-cementtal, vct, på 0.7 och en med ett vct på 0.4. Vid gjutningen användes sand från Åstorp, vars egenskaper finns beskrivna i kapitel 4.1, samt sten från Hardeberga. Siktningskurvor för sand och sten återfinns i bilaga 1. Den cement som användes var ordinär Portlands cement.

Proportioneringen utfördes enligt Betonghandboken kapitel 9 [12]. Vid gjutningen av betongen blev proportionerna de följande:

	Betong vct = 0.7	Betong vct = 0.4
Sten:	35.5 kg	39.6 kg
Sand:	44.5 kg	50.0 kg
Cement:	13.2 kg	24.9 kg
Vatten:	9.3 kg	10.2 kg

Två satser av betongen med det höga vct värdet och en sats av betongen med det låga gjöts. Gjutningarna utfördes enligt svensk standard 13 72 10 [11] varvid sammanlagt 36 provkroppar, kuber med 150 mm kantlängd, erhöles. 22 kuber av betong med låg tryckhållfasthet, här kallad betong A, och 14 kuber med hög tryckhållfasthet, betong B. Inga andra typer av provkroppar gjöts eftersom enbart tryckhållfastheten skulle provas.

Mikrovågsugnen som har använts vid försöken är identisk med den som användes vid torkningen av ballast och finns beskriven i kapitel 4.1. Endast maximal uteffekt har använts.

Vid försöken användes även ett instrument (PUNDIT, CNS instruments LTD London) för mätning av gångtider för ultraljudspulser, och en tryckpress enligt SS 13 11 10 [11].

5.2 Försök och resultat

En månad efter gjutningarna kontrollvägdes, mättes och granskades alla 36 provkropparna. Kuberna av den starka betongen numrerades från B1 till B14 och kuberna av den svagare från A1 till A22. Försöken som delades in i fem delförsök (A - E) presenteras tillsammans med delresultaten nedan.

Försöksserie A

Tryckhållfastheten för 6 stycken betongkuber, tre av var betongsort, bestämdes genom tryckprov i tryckpress. Resultaten från tryckningarna användes sedan som referensvärden. Aldern på respektive betongsort vid tryckningarna var 37 dygn för den svagare betongen och 34 dygn för den starkare. Enligt villkor A i BBK 79 7.3.3.2 [13] uppfyllde referenstryckningarna för de två betongkvaliteerna kraven för hållfasthetsklass K45 respektive K30. Resultaten återfinns i bilaga 2.

Försöksserie B

För att bestämma den ungefärliga fuktkvoten hos provkuberna och för att få referensvärden på tryckningar med ugnstorkad betong, torkades sex betongkuber i vanlig ugn vid 105 ± 5 °C, och trycktes därefter. Först analyserades emellertid endast två kuber av var sort, men då en kub av B-betongen snedbelastades vid tryckningen, torkades och trycktes ytterligare två B-kuber.

Fuktkvoterna bestämdes med utgångspunkt från de vikter som mättes upp samtidigt för alla kuberna, ungefär 30 dygn efter gjutningen. Torkningen, i den vanliga ugnen, pågick tills det att viktminskningen planade ut. Som ett kriterium för detta sattes att ytterligare ett dygns torkning inte skulle förändra vikten med mer än en promille. Torktiden enligt detta kriterium blev sju dygn för alla sex provkropparna. Vägning av kuberna skedde i stort sett varje dygn.

Fuktkvoten bestämdes till 4.6 % för B-kuberna och till 5.0 % för A-kuberna. Tryckningen av kuberna skedde då dessa fortfarande var varma. Resultaten finns i bilaga 2.

Försöksserie C

Fyra kuber, två av varje betongsort, torkades i mikrovågsugn i intervall om tio minuter. Proverna vägdes mellan varje intervall. Pausen som uppstod vid vägningen var i medeltal 20 sekunder. Torkningen fick pågå tills det att en vattenmängd motsvarande den totala fuktkvoten som bestämts vid försöksserie B (5.0 % resp. 4.6 %), hade torkats bort. Fuktkvoterna var även här baserade på de gemensamma vägningarna av provkropparna enligt bilaga 2.

Torktiden blev 120 minuter för B-betongen och 110 minuter för A-betongen. Då försöken avbröts hade torrvikterna, som beräknats i försöksserie B, passerats. Vid en vägning av provkropparna då dessa hade svalnat, konstaterades att en ytterligare uttorkning under avsvlningsfasen hade skett. Kuberna trycktes därefter i tryckpress efter att ha fått svalna till rumstemperatur.

Torkningskurvorna för betongproverna visas i diagram 4. Orsaken till att kurvorna inte börjar vid 4.6 % respektive 5.6 %, är att en naturlig uttorkning har skett sedan referensvägningen gjordes. Resultaten från tryckningarna återfinns i bilaga 2.

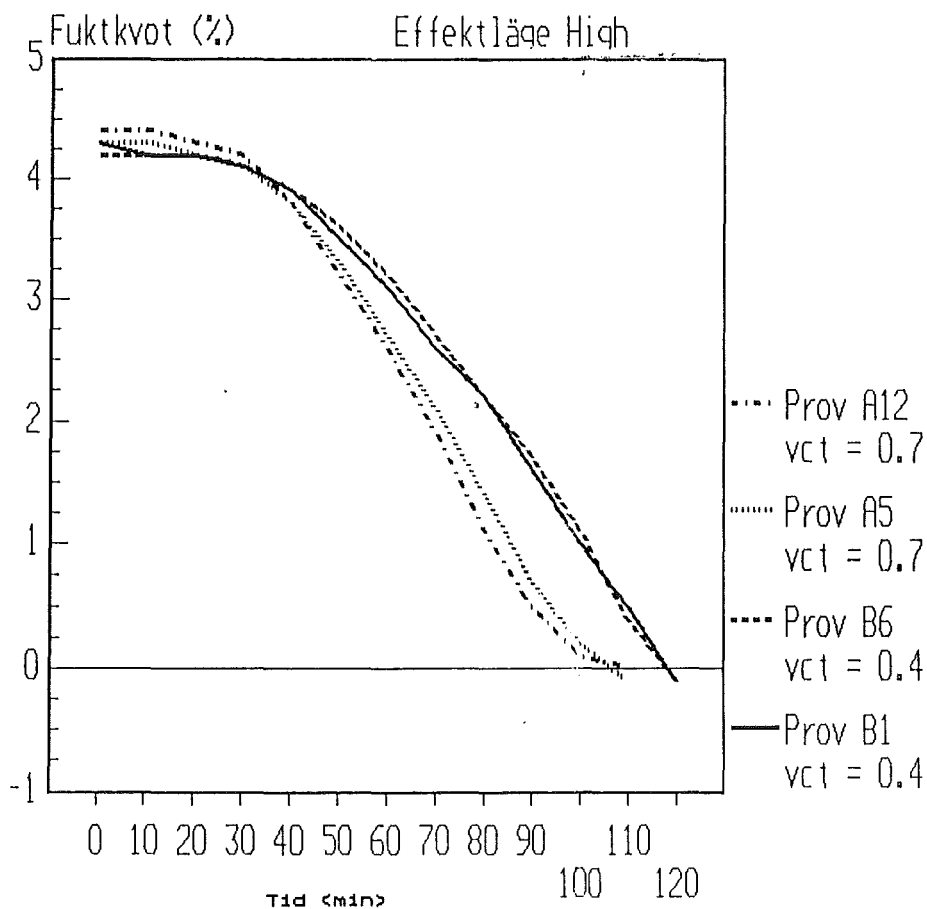


DIAGRAM 4. Torkningskurvor för betongprover torkade i mikroovågsugn.

Försöksserie D

Denna försöksserie liknar försöksserie C, men förutom vägning undersöktes även kuberna med ultraljud efter varje intervall i mikrovågsugnen. Proverna torkades i femminutersintervall. Pausen för ultraljudsundersökning och vägning var i medeltal en minut. Totalt torkades fyra prover, två av var sort, i vardera 60 minuter. Temperaturen som uppnåddes i betongen efter denna tid var större än 105 °C. Vid ultraljudsundersökningen mättes gångtiden för ultraljudspulser genom betongen. Mätningarna gjordes från två olika håll varvid medelvärdet av tiderna noterades. Tapetklister applicerades på ultraljudspolerna för att på så sätt få en bra kontaktyta. Vid mätningarna fastnade tapetklister på betongen, vilket var anledningen till att viktbestämningarna vid detta försök inte kunde utnyttjas såsom i försöksserie C. Gångtiderna användes för att beräkna hastigheten på pulserna vilket i sin tur användes för att beräkna den dynamiska elasticitetsmodulen för betongen. Formeln för den dynamiska E-modulen enligt betong handboken 8:4.3.2 [12] ser ut på följande sätt:

$$E = \frac{v^2 * p * (1+v) * (1-2v)}{(1-v)}$$

där E = Dynamisk E-modul (Pa)
V = Våghastighet (m/s)
v = Tvärkontraktionstalet, Poissons tal
p = Densiteten (kg/m³).

Den dynamiska E-modulen är 1.14 - 1.20 gånger större än den statiska, vilken man refererar till i normala fall. Densiteten och Poissons tal sattes konstanta till 2300 kg/m³ respektive 0.3. Detta motiverades med att ändringarna av dessa var så små att de inte påverkade resultatet. Gångtiderna hos ultraljudspulserna påverkades i viss mån av hur mätningarna utfördes, vilket gav en viss spridning av resultaten.

Den dynamiska E-modulen plottades mot tiden i mikrovågsugnen, och resultatet av detta visas i diagram 5.

Tryckningen av kuberna skedde då dessa fortfarande var heta. Vid brottet observerades vattenånga som läckte ut från brottsprickorna. Tryckningarna gav i normala fall skjubbrott, men en av B-kuberna i denna försöksserie fick ett sprickbrott istället. Tryckningsresultaten finns i bilaga 2.

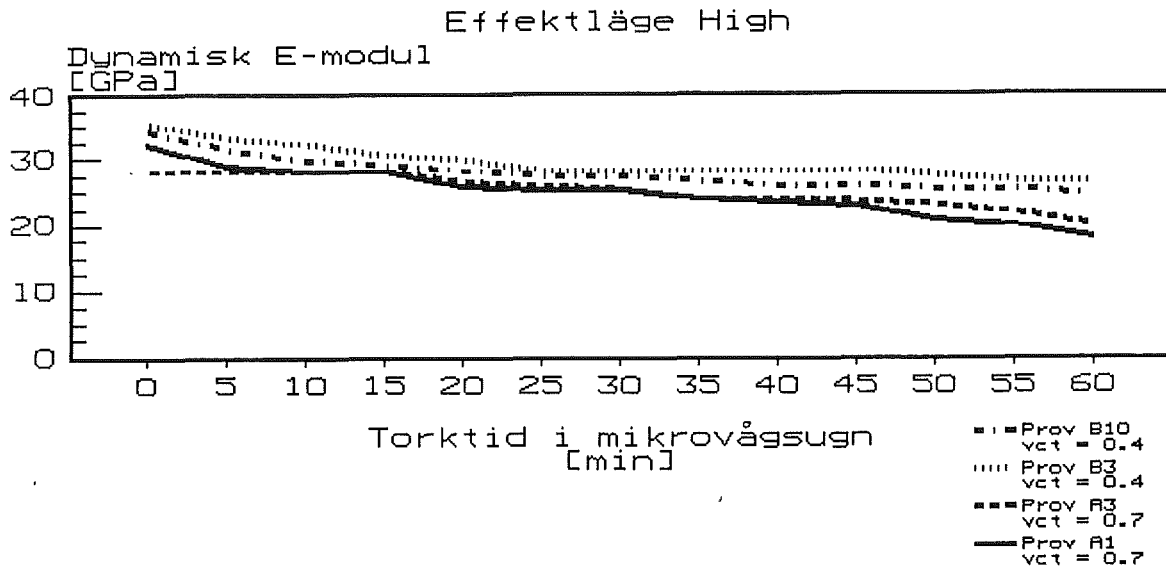


DIAGRAM 5. Förändringen av den dynamiska E-modulen hos betong vid torkning i mikrovågsugn.

Försöksserie E

På grund av ett beklagligt misstag försvann ett flertal av de, i detta skede, kvarvarande provkropparna vilka skulle ha använts i denna försöksserie. Detta medförde att endast A-betongen kunde undersökas (två kuber).

Försöken gick ut på att efterlikna ett cykliskt förlopp där betongen fuktas och därefter torkas ur. Proceduren upprepades tio gånger.

Betongkuberna sattes i vatten under fyra minuter för att på så sätt uppnå en hög fuktkvot. Tiden som betongen var under vatten hade tidigare utprovats så att en relativt stor mätnadsgrad skulle uppnås. Det upptagna vattnet torkades därefter ut i mikrovågsugn. Tiden för detta var i genomsnitt 25 minuter. Vägning skedde var tionde eller femte minut, samt varje gång provet mättades med vatten.

Båda försöken delades upp i två delförsök om vardera fem cykler. Proven fick "vila" i ett dygn mellan delförsöken. Principen för cykelförsöken visas i diagram 6 där ett delförsök finns uppritat.

Provkuberna trycktes efter att ha fått svalna till rumstemperatur. Resultaten av tryckningarna finns i bilaga 2.

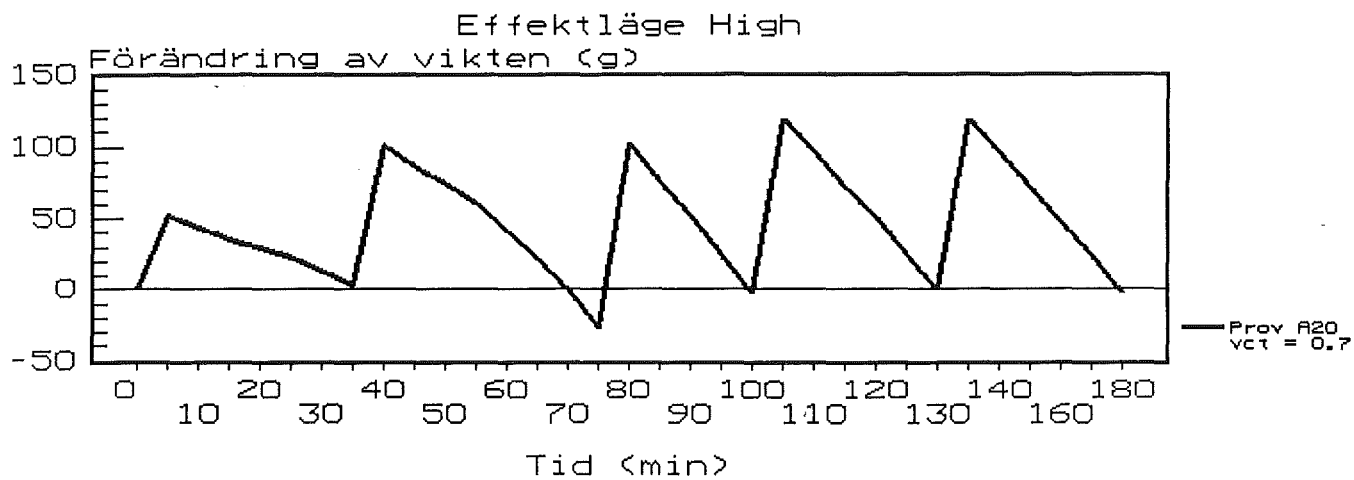


DIAGRAM 6. Princip för cykelförsöken. Diagrammet visar delförsök 1 för provkropp A20.

6. DISKUSSION

I den inledande fasen av detta arbete studerades mikrovågsugnens funktionssätt och bakomliggande teorier för torkning och uppvärmning med hjälp av mikrovågsstrålning. Speciellt behandlades elektromagnetiska vågrörelser med frekvensen 2450 MHz vilka används i vanliga mikrovågsugnar. Studierna visade bla att dessa mikrovågor främst växelverkar med vattenmolekyler. Torkning av betong i mikrovågsugn kan vara lämpligt eftersom vattnet påverkas direkt och andra material såsom grus och sten i sin tur värms upp genom normal värmeledning från de heta vattenmolekylerna.

Eftersom en vanlig mikrovågsugn avsedd för hushållsbruk går utmärkt att använda vid torkningsprocesserna är detta en relativt billig investering i ett laboratorium. Redan nu används mikrovågsugnen vid torkning av betong- och ballastprover. Vid Vägverkets laboratorium i Arlöv använder man sig t ex av mikrovågsugnen för snabbtorkning av jordprover.

Även andra tillämpningsområden än just torkning och upphettning förekommer. Vid Microdry corporation i USA har man utvecklat en metod att med hjälp av mikrovågsenergi rekonditionera defekt asfaltsbetong.

Alla resultat från ballasttorkningarna gjorda i denna undersökning är goda. Kontinuerliga tester vid torkningarna har gett torkningskurvor (diagram 1-3) som uppfyller kraven för en tillfredställande uttorkning av ballasten. Resultaten från torkningarna i mikrovågsugn har även visat mycket god överensstämmelse med resultat från vanlig ugnstorkning. Temperaturerna som uppmättes i ballasten vid maximal belastning var ungefär dubbelt så höga som vid den normala ugnstorkningen. Dessa temperaturer ligger dock på betryggande avstånd från ballastmaterialens kritiska temperatur varför ballasten inte bör ta skada.

Sammanfattningsvis kan man säga att torkningen av ballast med hjälp av mikrovågsenergi är en mycket bra och tidsbesparande metod. För att uppnå en jämn torkning rekommenderas en mikrovågsugn försedd med roterande platta och eventuellt någon form av pausfunktion. Även tidigare undersökningar av möjligheten att torka prover i mikrovågsugn har gett mycket goda resultat [8,9].

Försöken med torkning av betongprover i mikrovågsugn har gett något mer svårtolkade resultat. Torkningen är dock fullt möjlig och torkningskurvorna (diagram 4) är även här tillfredställande. En tendens som dock observerats under försöken är att mikrovågstorkningen är något för kraftig. Diagram 4 visar att uttorkningen kan fortsätta förbi de fuktkvoter som erhållits vid normal ugnstorkning.

E-modulsbestämningarna visar på en klar minskning av hållfastheten efter torkning i mikrovågsugn (diagram 5). Normalt sjunker hållfastheten då temperaturen stiger men i detta fallet har temperaturen vid mätningarna inte varit så hög att den stora E-modulsförändringen är berättigad. Detta tyder på skador i betongen som uppkommit vid torkningen. Även då tryckhållfastheten för betongen torkad i mikrovågsugn jämförs med referenstryckningar kan en tendens mot sämre hållfasthet utläsas. Resultaten från alla tryckningarna av betongproverna finns samlade i diagram 7. Sänkningen av hållfastheten kan bero på att uttorkningen sker snabbare än vad betongen klarar. Detta kan förklaras med att ångtrycket inne i betongen stiger så fort att övertrycket inte hinner försvinna ut ur provkroppen och att sprickor i betongen därmed uppstår. Denna teori bekräftas av de observationer av utläckande vattenånga som gjorts vid brottillfällena. En större sänkning av hållfastheten har noterats för den starkare betongen. Detta beror troligen på att den starkare betongen är tätare.

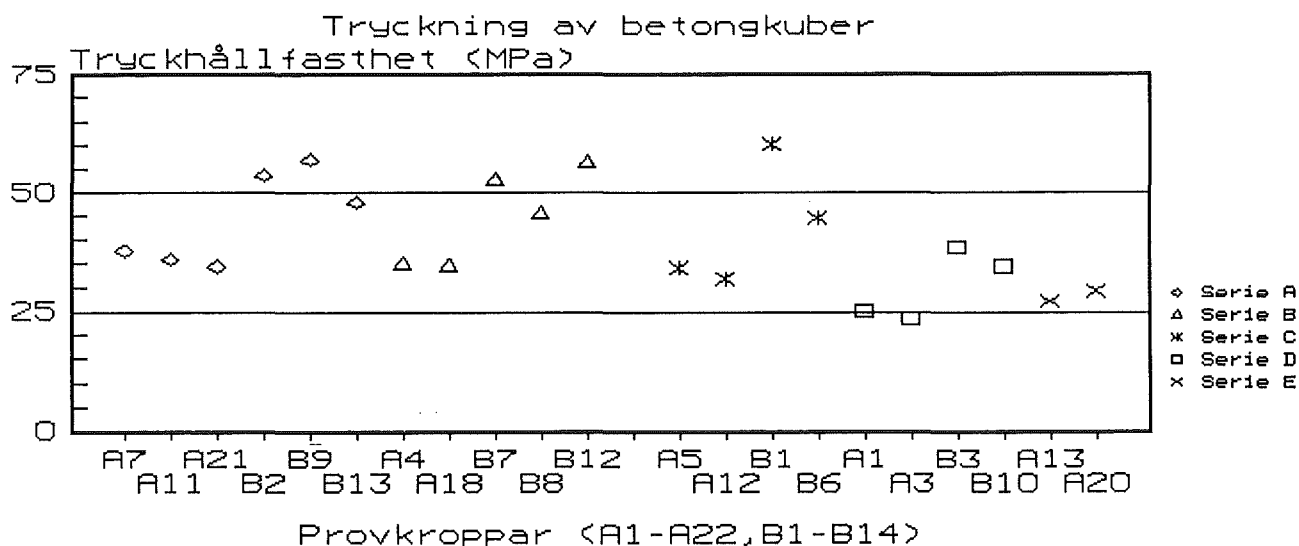


DIAGRAM 7. Resultat från tryckningar i tryckpress.

Sammanfattningsvis kan man säga att torkning av betong i mikrovågsugn kan ha sitt berättigande inom forskningen men den kan inte ersätta vanlig ugnstorkning.

Försöken gjorda i detta arbete är mycket begränsade och har främst haft till uppgift att bilda en grund för fortsatt forskning. Fler försök och mer forskning måste till för att man ska kunna utveckla och utnyttja mikrovågsenergin på ett bra sätt. Med detta arbete hoppas jag ha inspirerat till fortsatt forskning och utveckling inom de många tillämpningsområden som finns för mikrovågstekniken idag.

7. REFERENSER

- [1] Liao, Samuel Y. : Microwawe devices and circuits, Prentice-Hall, 1985.
- [2] Omling, Pär, Docent och Kordina, Olle, civ.ing., avd. för fasta tillståndets fysik LTH, muntliga intervjuer 17/10 och 24/10 1988.
- [3] Hintze , Manual CM Microtronic , Mikrovågsugn för torrhalts bestämning, Maj 1987.
Hintze AB Vasavägen 76 S-181 41 Lidingö.
- [4] Microdry corporation, Tidnings articklar, 3111 Fostoria way San Ramon, California 94583, USA.
 - :a Full lane recycling possible, Better roads/september, 1982.
 - :b Deep-Heating road itself with microwawes may be the answer long sought by paving indus., New England Construction Magazine, 13 September 1982.
- [5] Moulinex, bruksanvisning för mikrovågsugn.
- [6] UPO, bruksanvisning för mikrovågsugn.
- [7] Olsson, Tomas, Vägverkets lab., Arlöv, muntlig intervju 16/9 1988.
- [8] Campbell, H. W. and Crescuolo, P. J. : Evaluation of microwawe drying for rapid solids analysis, Environ. Technol. Lett. 3:289-296, 1982.
- [9] Lumley, D. J. och Kuhlín, A. : Utvärdering av hushållsmikrovågsugn för torkning av prover vid bestämning av suspenderade ämnen och torrsubstans, Vatten 43:89-93, Lund 1987.
- [10] Abrahamson, Rolf, Vägverkets lab., Jönköping, brev, 5/10 1988.
- [11] Betongprovning med svensk standard, BST Hb 12 utgåva 5, Standardiserings kommissionen i Sverige, April 1987.
- [12] Betonghandbok, Material, AB Svensk Byggtjänst, Box 7853, 10394 Stockholm, Stockholm 1980.

[13] BBK 79, Bestämmelser för betongkonstruktioner, Band 2
, Statens betongkommitte, AB Svensk byggtjänst,
Stockholm 1979.

PROTOKOLL FÖR BALLASTUNDERSÖKNING

Nr _____

Datum ___/___/19__

MATERIALUPPGIFTER:

Prov nr	Materialbeteckning	Leverans från	Kornform	Humusgrad	Ler- och slambhalt	Spec vikt
1.	sand	Åstorp		1	~10%	
2.	sand	Åstorp		1	~10%	
3.	sten	Hardeberga				
4.	sten	11-				

Arb. plats _____

SIKTANALYS:

Sikt med fri maskvidd mm	1				2				3				4			
	Stannar		Passerar	Stannar	Stannar		Passerar	Stannar	Stannar		Passerar	Stannar	Stannar		Passerar	Stannar
	gram	%	Σ%	Σ%	gram	%	Σ%	Σ%	gram	%	Σ%	Σ%	gram	%	Σ%	Σ%
128																
64																
32																
16																
8	6	0.7	99.3	0.7	7	1.0	99.0	1.0	6.9	8.4	15.6	8.4	7.4	8.0	14.0	86.0
4	116	13.8	85.5	14.5	69	9.8	89.2	10.8	12.0	14.7	0.9	99.1	11.4	13.2	0.8	99.2
2	105	12.3	73.2	26.8	86	12.2	77.0	23.0	1	0.1	0.8	99.2	1	0.1	0.7	99.3
1	109	12.8	60.4	37.6	107	15.2	61.8	38.2	0	0.0	0.8	99.2	0	0.0	0.7	99.3
0,5	163	19.1	41.3	58.7	123	17.5	44.3	55.7	0	0.0	0.8	99.2	0	0.0	0.7	99.3
0,25	161	18.9	22.4	77.6	150	21.3	23.0	77.0	1	0.1	0.7	99.3	0	0.0	0.7	99.3
0,125	141	16.5	5.9	47.1	104	14.8	8.2	45.9	1	0.1	0.6	99.7	0	0.0	0.7	99.7
<0,125	50	5.9	0.0	0.0	57	8.2	0.0	0.0	4	0.6	0.0	0.0	6	0.7	0.0	0.0
Summa	853			265	703			252	816			630	863			632
Finh. modul		$M_1 =$	2.65		$M_2 =$	2.52			$M_3 =$	6.30			$M_4 =$	6.32		

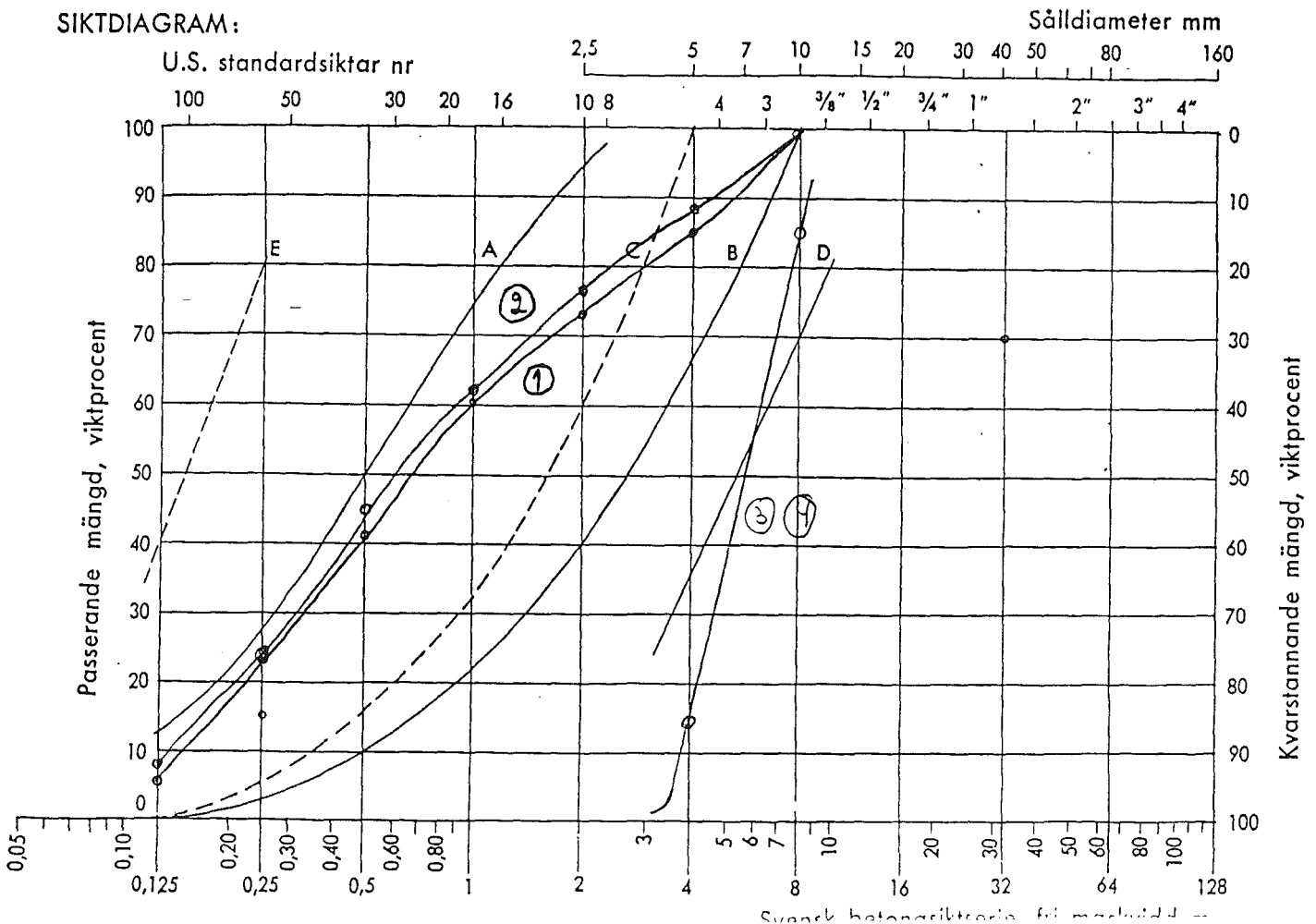
Beteckn. för kornform:
 R = natursand, -grus
 K = krossand, -grus
 RS = rundad singel
 AS = avlång (flat) singel
 KM = kubisk makadam
 AM = avlång makadam
 SM = skärvig (flat) makadam

Beteckn. för humusgrad:
 0 = ofärgad } lämplig
 1 = gul }
 2 = ljus rödbrun — användbar
 3 = mörkt rödbrun } odug-
 4 = mörkbrun } lig

Beteckn. för ler- o. slambhalt:
 Höjden av ler- och slambskiktet efter ett dygn i % av materialprovets totala höjd anges.

Ang. ballastundersökningarnas utförande se Statliga Betongbestämmelser 1949, Del I Materialdelen, där även kurvorna A—E i sikt-diagrammet kommenteras.

SIKTDIAGRAM:



FÖRSÖKS-SERIE	PROVKROPP	VIKT (g)	ÅLDER (dygn)	TRYCK-HÅLLF. (MPa)	ANM.
A	A2				*
	A7	7821	37	37.4	
	A11	7790	37	35.7	
	A21	7788	37	34.1	
	B2	8177	34	53.5	
	B4	8116	34	56.7	
	B13	8031	34	47.5	
B	A4	8026	43	34.9	
	A18	7820	43	34.7	
	B7	8167	48	52.8	
	B8	8206	40	45.3	
	B12	8161	48	56.2	
	B14	8088			*
C	A5	7936	72	34.0	
	A12	7891	72	31.8	
	B1	8057	69	59.9	
	B6	8153	69	44.5	
D	A1	7897	43	24.9	
	A3	7873	43	23.5	
	B3	8171	46	38.2	
	B10	8111	47	34.4	
E	A13	7877	90	27.0	
	A20	7876	90	29.2	

Bilaga 2. Resultat från tryckningar i tryckpress, samt åldern vid tryckningen och vikt 30 dygn efter gjutning (* = fel vid tryckning).