

NILU OR : 22/89
REFERANSE: O-8803
DATO : APRIL 1989
ISBN : 82-425-0027-4

NEDBRYTNING AV PUSS OG KALKSTEIN
SETT I FORHOLD TIL
KLIMA OG LUFTFORURENSNINGER

Innledende forsøk

O. Anda

SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Prosjektet startet våren 1988 og er et samarbeidsprosjekt med Riksantikvaren. Det er finansiert gjennom NAVF.

Dette er første fremdriftsrapport, og en har planer for flere års arbeid.

Hovedformålet er å studere effekten av kombinasjonen luftforurensninger og klima på puss og karbonatholdig bygningsstein.

I denne innledende fase har mye tid gått med til litteraturstudier og utvikling av testutstyr. Det er laget et større antall pussprøver til bruk i senere forsøk.

En har for øvrig gjort en rekke innledende forsøk, dels i laboratoriet (hovedsakelig klimaskapsforsøk) og dels i felt. Feltforsøkene har foregått på NILU-byggets tak og i et kortere tidsrom på Borregaard i Sarpsborg.

Forsøkene har gått ut på å bestemme kalsiummengden i avrenningsvannet (regn) fra prøvene.

En har gjort forsøk med følgende materialer:

Kalkpuss (K 100)

Kalksementpuss (KC 50/50 og KC 35/65)

Sementpuss (C 100)

Middelalder kalkpuss

Kalkstein (ortoceerkalk fra Oslo-området).

Følgende foreløpige konklusjoner er trukket:

- Relativt nylaget (ca. 4 mndr. gammel) kalkpuss (K 100) inneholder $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selv om ikke fenolftaleintesten indikerer dette.
- Ingen signifikant forskjell i kalsiumtap kunne registreres for ubehandlet og kalkhvit K 100-prøver.

- De tillagte pussprøver syntes alltid å gi høyere kalsiumtap i de første eksponeringene.
- Kalsiumtapet av skråttstilte (45°) prøver med alder ca. 4 måneder har i Lillestrøm-området vært (pr. liter regnvann som har overrislet prøvene):

K 100	≈ 25 mg/l
KC 50/50 og 35/65	≈ 50 mg/l
C 100 og kalkstein (klimaskap)	≈ 10 mg/l.

pH på regnvannet har ligget i området 4,0-5,5, SO₂- og NO₂-innholdet i luften var henholdsvis 5 µg/m³ og 20 µg/m³.

- På Borregaard i Sarpsborg ble kalsiumtapet fordoblet unntatt for KC 35/65 hvor en fikk det samme som på Lillestrøm. Årsaken til dette kjenner vi ikke på nåværende tidspunkt.

På Borregaard hadde regnvannet pH = 3,45. SO₂- og NO₂-innholdet i luften var henholdsvis ~ 50 og 30 µg/m³.

INNHOLD

	Side
SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER	1
1 INNLEDNING	4
2 PRØVEMATERIALE OG TILLAGNING AV DETTE	4
3 FORSØKSOPPLEGG	5
4 RESULTATER OG DISKUSJON	7
4.1 Laboratorieforsøk	7
4.2 Klimaskapstester	9
4.3 Felteksponeringer	12
5 DET VIDERE ARBEID	16
VEDLEGG	18

NEDBRYTNING AV PUSS OG KALKSTEIN SETT I FORHOLD TIL KLIMA OG LUFTFORURENSNINGER

Innledende forsøk

1 INNLEDNING

Naturlig nedbrytning av karbonatholdige bygningsmaterialer har funnet sted helt siden menneskene tok i bruk disse materialer. Dette skyldes dels erosjon pga. primærfaktorene, vann, temperaturforskjeller og vind, og dels kjemiske prosesser, hvorav den viktigste er karbonsyrens reaksjon med karbonat under dannelselse av det lett løselige hydrogenkarbonationet. Urovekkende store skader på mange kulturminnebygg, tyder på at nedbrytningen i de siste 10-årene har øket i styrke og omfang, og en har i den anledning rettet blikket mot miljøforurensningen som en mulig viktig årsak.

Med bakgrunn i dette har NILU sammen med Riksantikvaren startet et prosjekt som har til formål å studere effekten av kombinasjonen luftforurensninger og klima på puss og karbonatholdig bygningsstein. Økonomiske midler er bevilget gjennom NAVF med basis i NILUs søknad og prosjektforslag av 18.4.88.

Prosjektet startet våren 1988, og en har i startfasen konsentrert arbeidet om litteraturstudier og utvikling av hendig testutstyr for prøveoppsett og oppsamling av avrenningsvann fra prøver.

En har også gjort en del innledende forsøk, og disse vil her bli rapportert.

2 PRØVEMATERIALE OG TILLAGNING AV DETTE

Utvalget av prøvetyper ble foretatt av Riksantikvaren ved overingeniør Arne Madsen.

For puss ble følgende prøver laget:

1. K 100 : Kalkdeig:sand i forholdet 1:3 (volum). Sanden som ble anvendt var Woldstad, grov pussand.
2. KC 50/50: Kalkdeig:sement:sand i forholdet 2:1:12.
3. KC 35/65: Kalkdeig:sement:sand i forholdet 1:1:8.
4. C 100 : Sement:sand i forholdet 1:4:

Med K mener en her tørrlesket kalk, dvs. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, og tallene etter K, KC og C er vektprosent av tørt materiale. For å oppnå en passelig kalkdeig må en ha omtrent like vektmengder tørrlesket kalk og vann.

En tok også med en prøve av bergarten ortoceerkalk fra Oslo (frisk-skåret overflate).

De pussprøver en har testet her er tillaget av Riksantikvaren. Siden har en laget mange pussprøver på NILU etter overingeniør Arne Madsens anvisninger (vedlegg), men disse er ennå ikke anvendt i tester.

Prøvenes dimensjoner er 10 cm x 10 cm x 2 cm. På NILU har en siden laget dem noe tynnere. Noen av pussprøvene ble kalkhvitet, også dette etter Madsens anvisning.

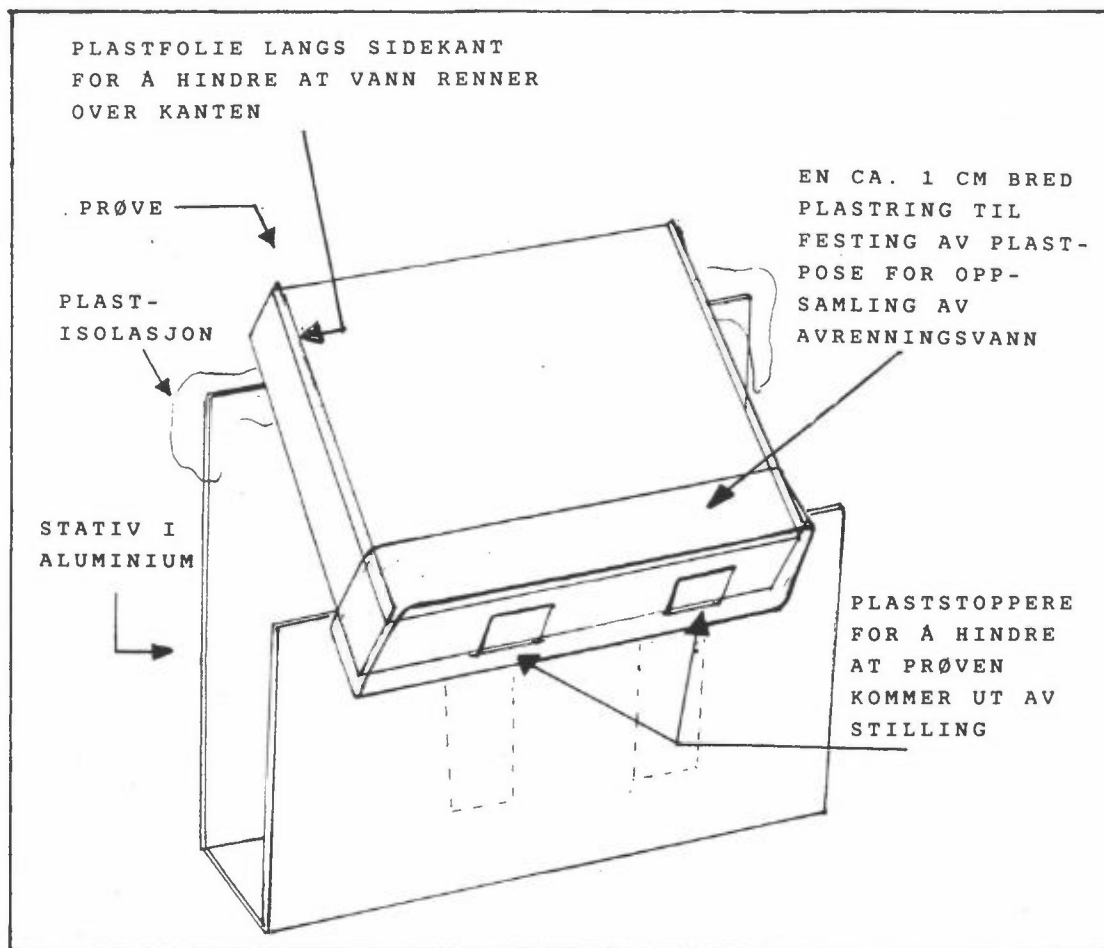
Bergartsprøver og prøver av puss fra byggverk har en dimensjonert så nær de ovennevnte dimensjoner som praktisk mulig.

3 FORSØKSOPPLEGG

Etter en del forsøk kom en frem til en brukbar stativtype for prøvene. Den er vist i figur 1, men ble først tatt i bruk ved forsøkene f.o.m. 27.9.88. Ved de tidligere forsøkene rant regnvannet via prøvens overflate ned under prøven i en Al-beholder som var en del av selve stativet. Dette viste seg uheldig, da Al ble angrepet av kalkvannet, og en hadde også sjenerende avdampning av vann fra beholderen.

Prøvene plasseres i ca. 45° vinkel, og maskeres på kantene. I de første forsøkene ble anvendt tape, men f.o.m. 27.9.88 ble anvendt

"Bengalakk" på nedre kant og f.o.m. 28.10.88 ble plastfolier, som var noe bredere enn prøvens tykkelse, limt til sidekantene for å hindre vann i å renne over sidekantene (se figur 1).



Figur 1: Stativ for oppsetting av pussprøver. En plastpose for oppsamling av avrenningsvann fra prøven festes rundt plastringen.

De innledende forsøk gikk primært ut på å teste prøveutstyret og den metode en hadde tenkt å anvende. Videre bestemte en Ca-innholdet i regnvannet som hadde rent over prøvene, og på den måten kunne en beregne materialtapet.

Forsøkene foregikk i klimaskap, og siden ute på NILU-byggets tak. Det ble også foretatt en eksponering på NILUs prøvestasjon på Borregaard i Sarpsborg over 3 uker.

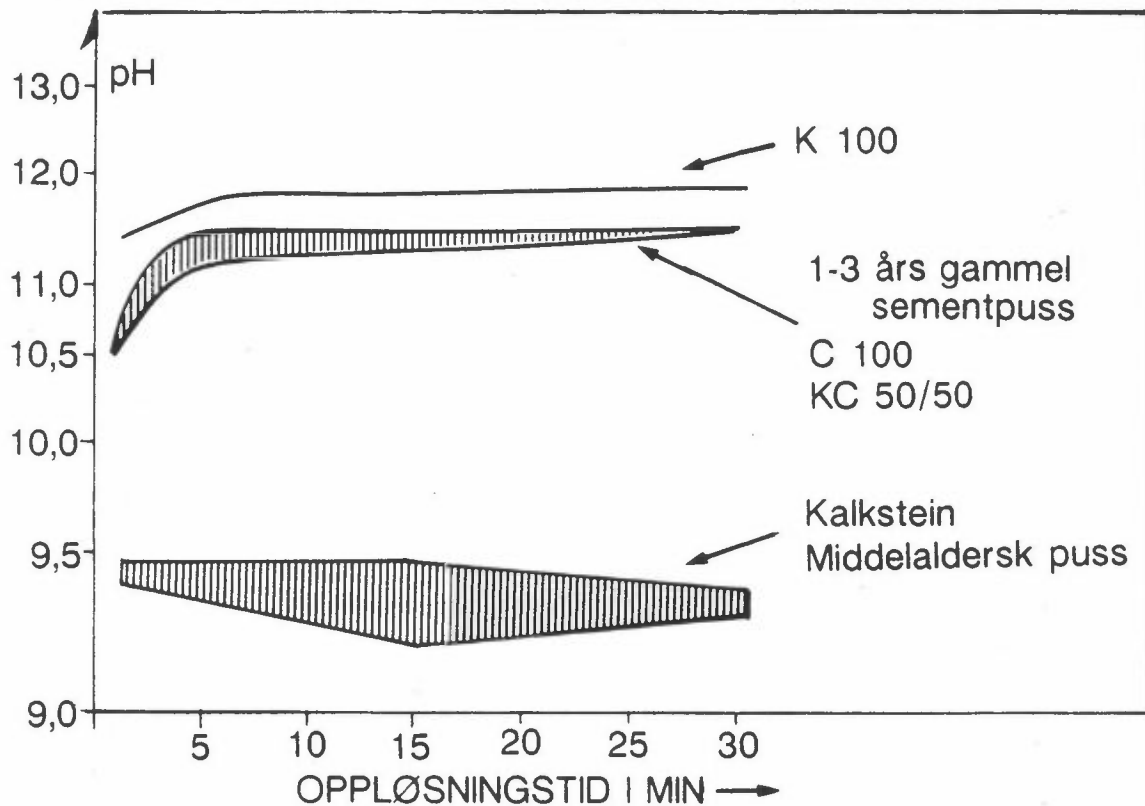
Klimaskapet ble kjørt ved 20°C, regnintensitet 55 ml pr. 100 cm² pr. 10 min. Regnfordelingen var imidlertid meget ujevn fra nesten 0 til 200 ml pr. 10 min. Vannmetning av pussprøvene (K 100) i skapet fikk en etter ca. 30 min regnfall og tilsvarte ca. 37 g vann pr. pussprøve. Før de omtalte eksponeringene ble det gjennomført noen enkle laboratorieforsøk.

4 RESULTATER OG DISKUSJON

4.1 LABORATORIEFORSØK

For å se hvordan pH endret seg under løsning i vann ved ulike puss-typer og kalkstein (ortoceerkalk), ble 5 g av materialene knust og tilsatt 100 ml ionefritt vann under omrøring.

Figur 2 viser resultatet i grove trekk, og bør bare oppfattes som veiledende.



Figur 2: Endring av pH med tiden under kontinuerlig røring av knust materiale i opprinnelig ionefritt vann.

En ser at en får tre grupperinger. K 100 som inneholder bare kalk som bindemiddel gir vannet ganske raskt en høy pH som stabiliserer seg etter forholdsvis kort tid på i underkant av $\text{pH} = 12$. C 100, KC 50/50 og en gammel puss en ikke kjenner alderen på, faller i neste gruppe hvor pH innstiller seg relativt raskt til i underkant av $\text{pH} = 11,6$. Begge disse gruppene har så høy pH at rester av Ca(OH)_2 fremdeles må ha vært til stede.

Når det gjelder den siste gruppen som består av ortoceerkalk og middelaldersk puss, begge fra Oslo, endrer pH seg mer i motsatt retning enn for de øvrige materialene, dvs. mot lavere pH. Dette skyldes sannsynligvis en stadig dannelse av hydrogenkarbonat. Pussen (fra middelalderen) synes altså å være fri for Ca(OH)_2 . Dette er også hva en måtte vente etter så lang tid for karbonatisering. (Karbonatisering er den herdingsprosess som skjer når pussens Ca(OH)_2 reagerer med luftens CO_2 og danner CaCO_3 som er sluttproduktet.)

Regnvann som treffer f.eks. en vegg belagt med puss, vil på sin vei nedover veggen ta opp stadig mer Ca. Hvor raskt dette går i forhold til vannets tilbakelagte distanse er viktig i vurderingen av Ca-tap fra en større veggflate. Vil vannet nå metning?

Forurensninger som SO_2 og NO_2 som ved oksidasjon og reaksjon med kalken vil kunne danne sulfater og nitrater, kompliserer vurderingen ytterligere.

For å se litt på disse forhold ble en kalkpussprøve (K 100) stilt i 45°L og pådryppet vann av ulik pH (surgjort med H_2SO_4). Dråpenes treffpunkt på prøveoverflaten ble flyttet slik at vannet rant ulike avstander før vannprøveuttak (~ 1 dråpe pr. sek.).

Tabell 1 viser resultatene. Også disse resultater er bare å oppfatte som veiledende informasjon i en innledningsfase. Målingene ble normalt tatt etter få minutters drypping (1-3 min).

Tabell 1: pH-endring på vann som har tilbakelagt ulike distanser på pussoverflaten.

Prøveoverflate	pH på vann, tilbakelagt ulike distanser (cm)			Vann-kvalitet
	14	7	1	
Tidligere ikke eksp. Tidligere eksp.	11,6~11,9 9,6	11,3 -	11,1 9,4	} Ionefritt vann
Tidligere ikke eksp. Tidligere eksp.	11,7 9,3	10,5 6,4	5,6 3,8	

Da tilnærmet metning ga $\text{pH} \approx 11,9$ (jmfør figur 2), ser det ut som kalkpussprøver som ikke tidligere har vært utsatt for regn, forholdsvis raskt når denne pH selv ved anvendelse av regnvann med $\text{pH} = 3,2$.

For prøveoverflater som tidligere har vært utsatt for regnvann, og følgelig er noe utvasket stiger pH langsommere, og særlig er dette tilfellet om en anvender regnvann med $\text{pH} = 3,2$. Avlesningen 9,3 ved distanse 14 cm er således gjort etter 15 min, og pH var fremdeles lite stabil.

4.2 KLIMASKAPSTESTER

Tabell 2 viser fire klimaskapstester, hvor en har brukt 8 stk. K 100-prøver. De første fire er ubehandlet, og de neste fire er grunnet med kalkvann (prosedyre i vedlegg) og kalkhvitet. Prøve nr. 9 er ortoceerkalkstein. Første test varte i 20 min, og prøvene var tørre i startfasen. I de tre øvrige testene var prøvene våte ved start, og varigheten pr. test var 15 min. En har anvendt vann surgjort med svovelsyre til $\text{pH} = 4$. Tabell 2 viser resultatene.

Pussprøvene var tillaget 21.4.88, og ovennevnte forsøk ble gjennomført i august samme år. Pussens karbonatisering var avsluttet ifølge den vanlig brukte fenolftaleintest (se vedlegg).

Tabell 2: Resultater av klimaskapstest av puss (K 100) og kalkstein eksponert for simulert regn med pH = 4. Det er målt Ca i avrenningsvannet fra prøvene.

Prøve nr.	Vekt av prøve (g)		Tester (mg Ca/l) (i parentes oppsamlet vann i ml)			
	tørr	våt	1	2	3	4
1	382	419	6,4 (285)	3,5 (280)	8,0 (233)	67,0 (11)
2	370	407	6,4 (93)	40,0 (108)	45,0 (133)	84,0 (50)
3	368	404	7,4 (51)	44,0 (68)	100,0 (80)	67,0 (95)
4	368	403	- (0)	8,8 (3,5)	102,0 (27)	45,0 (288)
5	363	400	4,5 (238)	4,3 (79)	3,5 (227)	10,0 (32)
6	360	398	49,0 (250)	42,0 (230)	69,0 (132)	76,0 (30)
7	360	397	98,0 (22)	22,0 (26)	17,0 (35)	13,0 (116)
8	356	393	190,0 (11)	35,0 (17)	31,0 (18)	13,0 (57)
9	110	110	4,2 (24)	5,3 (22)	6,6 (12,5)	3,9 (39)

De kationer som kan være til stede når Ca i puss løses i vann, er CO_3^{2-} , HCO_3^- og OH^- . En ser da bort fra forurensninger som hovedsakelig vil tilføre ionene SO_4^{2-} og NO_3^- .

Tabell 3: Løselighet i vann for noen aktuelle Ca-forbindelser (Flood, 1962 og Handbook of Chemistry and Physics, 1969).

Forbindelser	Temp. °C	Løselighet i vann g/l		Merknader
		som salt	som Ca	
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	20	1.200	0,65	1) Rent vann 2) CO_2 -mettet vann som løser Ca som HCO_3^- 3) Luftmettet vann
CaCO_3	20-25	0,014 ¹⁾	0,0056 ¹⁾	
CaCO_3	15	1,170 ²⁾	0,63 ²⁾	
CaCO_3	20	0,050 ³⁾	0,027 ³⁾	4) Hemisulfat, brent gips eller "Plaster of Paris" 5) Vanlig gips
CaSO_4	30	2,09	0,62	
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ⁴⁾	20	3,0	0,83	
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ⁵⁾	~20	2,41	0,56	
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	18	~1212	296	
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0	~2660	452	

Regnværet i klimaskapet frembringes ved at vann blir "forstøvet" gjennom dyser. Dette vil sannsynligvis gi luftmetning i vannet. Som en ser av tabell 3 vil en måtte anta tilstedeværelse av en del Ca(OH)_2 for å forklare Ca-tapet ved avrenning i de fleste prøver fra tabell 2.

Relativt nylaget kalkpuss (K 100) inneholder følgelig Ca(OH)_2 selv om fenolftaleintesten ikke indikerer dette.

Det er stor spredning i mengde oppsamlet vann i hver prøve. Dette skyldes dårlig fordeling av regn fra dysene.

Spredningen er også stor i Ca-verdiene, uten at regnspredningen alene kan forklare dette. Det er imidlertid nærliggende å tro at der hvor regnspredningen har vært særlig dårlig, vil lokaliseringen av vannets nedslagspunkter på prøvene være en viktig forklaringsfaktor.

Prøvene 1 og 5 har begge vært benyttet til flere tidligere forsøk, og kan derfor allerede være en del utvasket, hvilket kan ha gitt de lave verdiene for disse. Verdiene er imidlertid ikke entydige da forsøk 4 gir høy verdi. De lave verdiene på prøve 2 og 3 i forsøk 1 kan en ikke gi noen god forklaring på.

Det var for øvrig ikke mulig under disse forsøk å se noen signifikant forskjell i Ca-tap for ubehandlet og kalkhvitet K 100-prøve.

Med en regnintensitet i klimaskap på $55 \text{ ml}/100 \text{ cm}^2$ flate pr. 10 min, en 45° helning på prøvene, og $\text{pH} = 4$ på anvendt regnvann, fikk en et Ca-tap på rundt $50 \text{ mg}/\text{l}$ regnvann fra ikke tidligere eksponerte puss-prøver. En har ikke her tatt med prøvene 1 og 5, da disse tildels har gitt utolkbare resultater (se ovenfor).

For ortoceerkalk (frisk overflate) var Ca-tapet ti ganger lavere, dvs. $5 \text{ mg}/\text{l}$ regnvann (kalksteinprøven var 2 cm kortere enn kalkpussprøvene som var 10 cm lange, men dette har neppe stor betydning).

4.3 FELTEKSPONERINGER

På NILU-byggets tak ble et utvalg av prøver (K 100) fra klimaskapstesten montert, og tre eksponeringsperioder ble gjennomført. Prøvene beholdt de samme nummer som i tabell 2. Ca-mengden i oppsamlet regnvann ble målt. Resultatene fremgår av tabell 4.

Tabell 4: Resultater fra feltprøving av kalkpuss (K 100) og kalkstein på NILUs tak. Ca-mengden i avrenningsvannet er målt.

Prøve nr. og type	Ca i avrenningsvann i $\mu\text{g/ml}$ (oppsamlet regn i ml)		
	31.8.-1.9.88 NILU	1.-2.9.88 NILU	3.-4.9.88 NILU
1 Ubehandlet	108,0	45,0	40,0
2 Ubehandlet	74,0	28,5	89,0
5 Kalkhvit	39,5	32,5	54,0
6 Kalkhvit	120,0	53,5	47,5
9 Ortoceerkalk	11,5 (16)	9,0 (13)	11,0 (30)
Nedbørdata:			
mengde (mm)	5,7	4,8	9,4
pH	4,25	3,95	4,25
Ca-innhold ($\mu\text{g/ml}$)	0,5	0,9	0,6
SO ₂ i luft } ($\mu\text{g/m}^3$)	7	5-7	3-4
NO ₂ i luft }	28	21-22	15-21

Resultatene er omtrent som for klimaskapstestene med et gjennomsnitt på ~ 61 $\mu\text{g Ca/ml}$ regnvann fra pussoverflatene. Heller ikke her kunne spores noen forskjell på ubehandlet og hvitet overflate.

Ca-tapet fra ortoceerkalksteinen var uventet høyt, 10,5 $\mu\text{g/ml}$. Den noe forhøyede tendens kan skyldes gasser i luften. NO₂ kan tenkes å fremkalle en slik effekt.

Regnets relativt lave pH (3,95) i perioden 1.-2.9.88 ga ikke noen økning i Ca-tapet. Vi har i dag ingen god forklaring på at Ca-tapet heller er mindre i dette tilfellet. En kunne ikke se noen sammenheng mellom konsentrasjonen av Ca i avrenningsvannet og nedbørmengden. En kan imidlertid ikke se bort fra at regnintensiteten kan være av betydning for Ca-konsentrasjonen i avrenningsvannet.

En ny serie med pussprøver av ulike slag ble eksponert på NILU-byggets tak. De har ikke tidligere vært eksponert. Prøvene er støpt 21.4.1988. Forsøksserien ble avsluttet ved å eksponere de samme prøvene i Sarpsborg på NILUs stasjon på Borregaard over en 3-ukers periode (nedbør falt kun i den midtre uka). Resultatene fra denne serien er vist i tabell 5.

Tabell 5: Resultater fra eksponering av ulike pussprøver på NILU-byggets tak og på Borregaard. Ca-mengden i avrenningsvannet er målt.

Pusstype	µg Ca/ml avrenningsvann i de ulike testperioder ¹⁾							
	27.-28.9.	28.9.-6.10.	6.-7.10.	7.10.	8.-10.10.	13.-15.10.	-28.10.	31.10.-20.11. ²⁾
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. K 100 ubehandlet	34 (21)	35 (36)	20 (142)	27 (33)	19 (153)	24 (153)	32 (76)	62 (63)
2. K 100 grunnet og hvitet	43 (27)	32 (44)	25 (130)	23 (31)	17 (146)	27 (144)	20 (75)	54 (88)
3. KC 50/50 ubehandlet	115 (23)	34 (33)	30 (99)	58 (5)	9 (133)	32 (114)	58 (106)	134 (14)
4. KC 50/50 grunnet og hvitet	103 (22)	94 (28)	86 (89)	43 (4)	30 (99)	43 (85)	57 (75)	82 (58)
5. KC 35/65 ubehandlet	71 (31)	60 (32)	59 (6)	61 (31)	38 (126)	49 (115)	54 (65)	60 (94)
6. KC 35/65 grunnet og hvitet	95 (26)	54 (34)	83 (120)	35 (4)	33 (139)	43 (124)	76 (45)	55 (76)
7. C 100 ubehandlet	5,3 (50)	6,3 (45)	7,6 (24)	9,5(24)	7 (157)	10 (162)	12 (63)	26(126)
Nedbørdata:								
mengde (mm)	6,1	8,9	13,4	3,1	16,2	17,8	18,2	7,5
pH	4,2	4,0	4,25	4,70	4,7	4,15	4,35	3,45
Ca (µg/ml)	0,4	0,6	4)	4)	0,1	0,4	0,3	-
Luftens innh. av SO ₂	3	8,5	5	5,5	7,3	3,3	4,8	53 ³⁾
Luftens innh. av NO ₂	10	16	18,5	22,5	15	24,7	24,5	~ 30

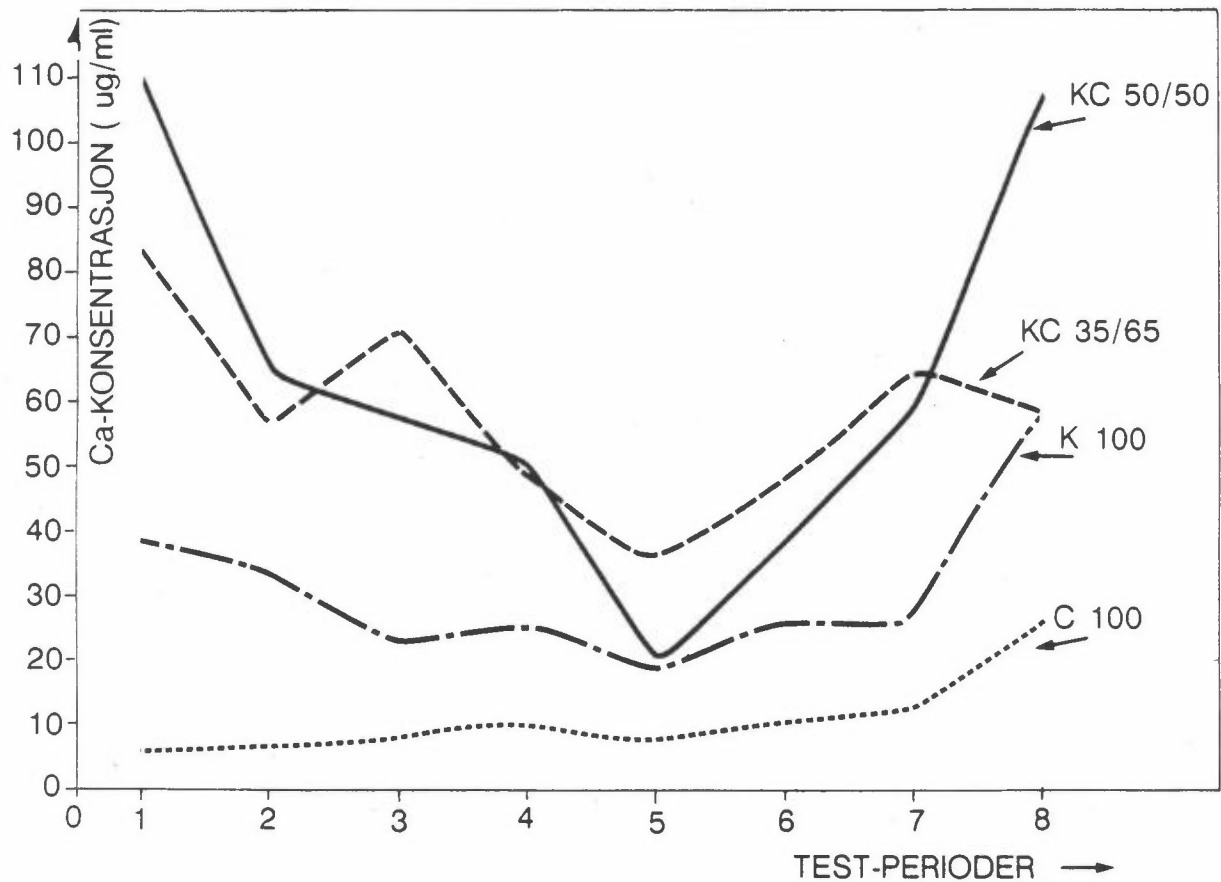
1) I parentes følger ml oppsamlet regnvann for de enkelte prøver.

2) Denne eksponering er fra Borregaard, de øvrige fra NILU-byggets tak.

3) Dette er en middelværdi av de midlere ukesverdier for ukene nr. 44, 45 og 46. Ukesverdiene var henholdsvis 13, 114 og 32 µg/m³ luft.

4) Regnprøven har blitt kontaminert av ukjent årsak. pH-verdiene er tatt fra annen måling på taket.

I figur 3 er resultatene fremstilt grafisk. Da det heller ikke denne gang var mulig å se forskjell i Ca-tap på de ubehandlede og kalkhvitete prøver, ble de behandlet som paralleller. I figur 3 representerer således kurvene middelerverdier.



Figur 3: Resultatene fra tabell 5 er her vist grafisk. Test nr. 8 er fra Borregaard og de øvrige fra NILU-byggets tak (Lillestrøm). Prøvene har tidligere ikke vært eksponert. De ble tillaget 21.4.1988.

Oppsamlingen av regnvann er nå blitt bedre enn tidligere pga. sperring av sidekanter, bedre maskering av forkant, og en bedre bevaring av regnvannet i plastposer. Likevel blir konklusjonene usikre pga. at en ved flere anledninger, bl.a. på Borregaard, hadde temperaturer under 0°C , og dermed isdannelse.

Hvis en ikke tar med første eksponeringsperiode fordi denne erfaringsmessig alltid synes å gi spesielt høye verdier for "ferske" prøver, får en Ca-tap beregnet som konsentrasjon i avrenningsvann fra prøve på 10 cm lengde og helning 45° vinkel, de verdiene som er ført opp i tabell 6.

Tabell 6: Typiske verdier på Ca-tap fra ulike pusstyper i miljøer representert ved NILUs bygg på Lillestrøm (småbymiljø) og Borregaard i Sarpsborg (surt industrimiljø).

Pusstype	NILU (Lillestrøm)		Borregaard (Sarpsborg)		Beregnet egenvekt
	Ca fjernet av regn (mg/l)	Tykkelsesreduksjon ¹⁾	Ca fjernet av regn (mg/l)	Tykkelsesreduksjon ¹⁾	
K 100	25	13,5	58	31,4	1,85
KC 50/50	48	25,3	108	56,8	1,9
KC 35/65	54	28,4	58	30,5	1,9
C 100	9	4,6	26 ²⁾	13,3	1,95

1) Tykkelsesreduksjonen er angitt i μm pr. år under forutsetning av en nedbørmengde på 1 000 mm pr. år og at verdiene på miljøparametrene under forsøkene i hovedsak har vært representative.

2) Representerer kun én prøve.

Opplysningen i tabell 6 vil, dersom en tar for seg ekstremitetene, si at en C 100-puss på Lillestrøm og en KC 50/50-puss på Borregaard vil reduseres i tykkelse til det halve (dvs. med 1 cm) etter henholdsvis ~2174 år og ~176 år. Her har en kun sett på den kjemiske oppløsnings-hastighet.

Som tidligere nevnt kan en ikke trekke sikre konklusjoner av tabell 6, men følgende indikasjoner gir den:

- C 100 angripes kjemisk klart minst av de testede pusstyper.
- Noe overraskende er det at KC-typene angripes mer enn K 100.
- Dataene er ikke tydelige nok til å rangere den kjemiske motstands-evnen til de to KC-typene.
- Alle pusstypene, unntatt KC 35/65, har mistet dobbelt så mye Ca pr. liter regnvann på Borregaard som på Lillestrøm.
- KC 35/65 har omtrent samme Ca-tap på de to teststedene. Vi har ingen rimelig forklaring på dette.

Disse konklusjoner er å oppfatte som foreløpige og vil bli utdypet i det videre arbeid.

5 DET VIDERE ARBEID

I praksis og over lengre tid er det en rekke faktorer som virker inn på pussens levetid, og som ikke er vurdert i denne omgang. Her kan nevnes at den kjemiske oppløsningstiden ved aldring av pussens sannsynligvis vil gå langsommere ettersom herdingen slutføres, og de lettest løsbare stoffer vaskes ut.

Endringer i forurensningenes sammensetning vil kunne påvirke løseligheten av pussens. En har f.eks. i den senere tid i mange norske byer fått lavere SO_2 - men høyere NO_2 -innhold i luften pga. økende trafikk. Det er her også nærliggende å nevne atmosfærens stadig stigende CO_2 -innhold. Dette kan på lang sikt gjøre luftmettet regnvann mer aggressivt på karbonatholdig materiale, da det lettere vil kunne dannes hydrogenkarbonat som er relativt lettløselig i vann.

Frostsprenghing er en viktig faktor i nedbrytningen av materialer. Økt kjemisk forvitring kan gi materialer større porøsitet som igjen vil kunne gjøre frostsprenghingen mer virkningsfull. En kan her komme inn i en ond sirkel hvor nedbrytningen akselererer.

I arbeidet med puss og karbonatholdig materiale vil vi i neste fase forsøke å få et større datamateriale med en større spredning i forurensningsgradene. En vil bruke dels klimaskapstester og dels feltforsøk.

Videre vil det være en oppgave å finne mer ut om hvordan karbonatholdige materialer påvirkes av luftens innhold av SO_2 og NO_2 . Slike forsøk vil bli kombinert med fryse/tine-sykluser i klimaskap.

I tredje fase tar en sikte på prøvetaking direkte på vertikale vegger av avrenningsvann med bestemming av Ca^{2+} , pH, SO_4^{2-} og NO_3^- i dette. Forsøkene er viktige for undersøkelse av nedbrytningshastigheten som funksjon av arbeidsutførelsen, lokalitet på bygningen, klima og

materialalets alder. Metoder for akselerert herding med CO₂, arbeidsutførelse, beskyttelse og bevaring vil da komme sterkere inn i vurderingen.

VEDLEGG

PROSJEKT.
FORVITRING AV KALKHOLDIGE MATERIALER.
NILU, ref.: JFH/KAS/E - 1000/0 - 8068/24. februar 1987.

Som ledd i ovennevnte prosjekt er det utstøpt prøvebriketter.

Om mørtelmaterialer, blandingsforhold etc. kan opplyses følgende:

Kalk : FAXE stampet kalk i pastaform. Leveres i 25 kg's spann, bl.a. gjennom Oslo Mørtelverk.

Sement : Vanlig, standard Portlandsement.

Sand : Pussesand fra Woldstad, Åmot i Modum, levert gjennom Oslo Mørtelverk. Sanden er uten skadelig humus, og har største korn ca. 3 mm. Siktekurven ligger mellom kurve 1 og 2 i figur 1, NS 422A (s. 4), som er basert på DIN 1168 av 1955.

Blandemåte : Til blanding ble benyttet en kraftig, elektrisk drill, METABO type 7523/2 C, 700 W, 240/400 o/min, 23/15 mm. Under blanding var hastigheten innstilt på 240 o/min. Vispen har stamme av Ø 13 mm kamstål hvor det i bunn er påsveiset et propellformet flattjern 5x30 mm og 170 mm samlet lengde. På stammen er det påsveiset 4 stk. U-formede vinger av Ø 6 mm kamstål. Vingenes ytre mål er 50x80 mm. De er plassert parvis rett overfor hverandre, og parene er i 90⁰ på hverandre.

Utmåling og blanding : Det ble benyttet volummål, nøyaktig utmålt.

Kalkdeigen ble først vispet ca. 7 min. i spannet.

K 100, 1:3 (kalkdeig:sand)

Kalkdeig og sand ble nøyaktig utmålt og blandet ca. 7 min. Utstøpt i 16 former 10x10x2 cm og 9 former 5x5x5 cm.

KC 50/50, 2:1:12 (kalkdeig:sement:sand)

Sement og sand tilmålt og blandet tørt ca. 7 min. Kalkdeigen ble tilsatt og det hele vispet ca. 7 min. under tilsetning av litt vann, til passe konsistens. Utstøpt i former, 16 stk. 10x10x2 cm og 9 former 5x5x5 cm.

KC 35/65, 1:1:8 (kalkdeig:sement:sand)

Sement og sand tilmålt og vispet tørt i ca. 7 min. Kalkdeigen ble tilsatt og det hele vispet ca. 7 min. under gradvis tilsetning av litt vann, til passe konsistens. Utstøpt i 16 former 10x10x2 cm og 9 former 5x5x5 cm.

C 100, 1:4 (sement:sand)

Sement og sand tilmålt og blandet tørt i ca. 7 min. Derpå tilsatt vann, gradvis, til passe konsistens og blandet ca. 7 min. Utstøpt i 16 former 10x10x2 cm.

Blandingene ble trykket godt ned i formene, glattet med murskje og tilslutt kostet lett over med kost, for å få en overflate som svarer til den man oftest har på våre pussede steinkirker.

Blanding og utstøping ble utført 21.4.1988, om kvelden.

Fra 21.4.-25.4.88 ble formene oppbevart i vaskekjeller med ca. +10⁰C. Formene med C 100 ble dusjet med vann (rosesprøyte) et par ganger om dagen. Samtidig ble det og dusjet litt i rommet for å høyne R.F.

25.4.1988 ble formene levert NILU, Lillestrøm for videre herding i klimaskap, under ca. 75% R.F.

Kalkvann : 0,15 kg kalkdeig utrøres godt i 1 liter vann. Står og bunnfeller i minst 15 t. Dette klare kalkvann brukes til grunning.

Kalkmelk til

kalkhvitning: Tilberedes ved å ta ca. 0,3 kg kalkdeig i 1 liter vann. Omrøres godt, også hele tiden under påføringen. Bruk tre strøk med 1 døgns mellomrom.

Karbonatisering kan kontrolleres ved fenolftalein (2 gram i 100 ml 95% alkohol). Blir en dråpe på kalken sterkt rød, er den ikke karbonatisert.

Oslo, 28.6.1988

Overingeniør Arne Madsen

