

MASTER

De invloed van vochtabsorptie in de konstruktmaterialen op de warmtehuishouding van een woning

Franssen, Paul

Award date:
1982

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN

DE INVLOED VAN VOCHTABSORPTIE IN DE KONSTRUKTIEMATERIALEN
OP DE WARMTEHUISHOUDING VAN EEN WONING

door

Paul Franssen

AFDELING WERKTUIGBOUWKUNDE

Vakgroep Warmte- en Stroomingstechniek

Rapport WPS3 - 82.02.R325

Voor U ligt het verslag van mijn afstudeerwerk,
verricht in de vakgroep Warmte en Stromingstechniek
van de afdeling der Werktuigbouwkunde van de
Technische Hogeschool Eindhoven.

Mijn begeleiders waren prof. ir. C.W.J. van Koppen,
ir. J.P. Simon Thomas en drs. J.J. Hardon.

Hierbij wil ik graag hen en alle anderen die iets
aan mijn afstuderen hebben bijgedragen bedanken
voor hun hulp.

Samenvatting.

In woningen treden door allerlei oorzaken schommelingen op in de relatieve vochtigheid.

De in de woning toegepaste konstruktie-materialen streven naar een vochtevenwicht met de omgeving en kunnen als gevolg daarvan waterdamp opnemen of waterdamp afstaan. Bij de opname van de waterdamp komt een hoeveelheid energie vrij die in de orde is van de condensatiewarmte van waterdamp.

Er zijn experimenten gedaan waarin de absorptie of desorptie aan baksteen en kalkzandsteen na een stap in de relatieve vochtigheid gemeten wordt.

De resultaten zijn met de theoretische berekeningen vergeleken. De geabsorbeerde hoeveelheden en bijbehorend energie-effekt zijn als functie van de tijd voor diverse bouwmaterialen berekend.

Tenslotte zijn deze gegevens toegepast op een model van een woning en is het totale energie-effekt tengevolge van de waterdampabsorptie berekend voor de korte termijn van vijf uur na een stapvariatie in de relatieve vochtigheid.

Eveneens is voor de lange termijn, waarin het optredende energie-effekt een gevolg is van de seizoensveranderingen in de relatieve vochtigheid, het energie-effekt berekend.

Er blijkt dat het energie-effekt tengevolge van de absorptie van waterdamp van aanzienlijke betekenis kan zijn.

INHOUD

Samenvatting

Inhoud	1
Symbolenlijst	3
1 Inleiding	5
2 Absorptie en transport van vocht in materie	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Relatieve vochtigheid en sorptie-isothermen	8
2.3 Desorptie-isothermen	13
2.4 Vochttransport fenomenologisch	15
2.5 Stationaire diffusie - Methode van Glaser	17
2.6 Instationaire diffusie	18
2.6.1 Theorie van de Vries	19
2.6.2 Oplossingen van de instationaire transport- vergelijking van waterdamp bij konstante diffusiecoëfficiënten onder verschillende randvoorwaarden	22
2.7 Een methode om de condensatieterm bij insta- tionaire dampdiffusie in de diffusiecoëfficiënt te verdisconteren	25
3 Experimenten	27
3.1 Inleiding	27
3.2 Opstelling en uitvoering van de experimenten	27
3.3 Resultaten van de experimenten	31
4 Energieeffekten van vocht-absorptie en desorptie	37
4.1 Inleiding	37
4.2 Bindingsenergie van water aan bouwmaterialen	37
4.3 Relatieve vochtigheid binnen en buiten gebouwen	39
4.4 Standaardtypen woonhuizen	41
4.5 Materialen en eigenschappen	43

4.6	Modelbeschrijving en berekeningsmethode	47
4.7.1	Warmte-effekt op de korte termijn	49
4.7.2	Warmte-effekt op de lange termijn	51
5	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek	53
	Litteratuur	55
	Grafieken	
	Appendices	

Symbolenlijst

A	oppervlakte	m^2
a^*	hoeveelheid vocht dat opgenomen kan worden tussen twee vochtevenwichtssituaties	$kg\ m^{-3}$
a_1	helling van de sorptie-isotherm	$kg\ m^{-3}$
a_o	evenwichtsvochtgehalte bij een bepaalde rv	$kg\ m^{-3}$
a_1^*	a_1/C_{sat}	-
C	concentratie	$kg\ m^{-3}$
C''	maximum waterdampconcentratie boven een meniscus	$kg\ m^{-3}$
C_{sat}	waterdampconcentratie bij verzadiging	$kg\ m^{-3}$
D	diffusiecoëfficiënt voor waterdamp in lucht	$m^2\ s^{-1}$
D^*	diffusiecoëfficiënt voor waterdamp in materie (D/μ)	$m^2\ s^{-1}$
D^o	schijnbare diffusiecoëfficiënt	$m^2\ s^{-1}$
d	dikte van het materiaal	m
E	volume water per volume eenheid materiaal dat per eenheid van tijd van de vloeibare in de dampfase overgaat	s^{-1}
G	opgenomen hoeveelheid vocht	$kg\ m^2$
g	dampstroomdichtheid	$kg\ m^2\ s^{-1}$
g_z	zwaartekrachtversnelling	$m\ s^{-2}$
J	hoofdkromming van het vloeistofoppervlak in een kapillair	m^{-1}
k	hydraulisch geleidingsvermogen	$m\ s^{-1}$
M	molaire massa van water	$kg\ kmol^{-1}$
P	luchtdruk	$N\ m^{-2}$
Δp	dampdrukverlaging boven een gekromd oppervlak	$N\ m^{-2}$
p	waterdampdruk	$N\ m^{-2}$
p_{sat}	verzadigde dampdruk	$N\ m^{-2}$
$p_{hydr. stat.}$	hydrostatische druk	$N\ m^{-2}$
R	gasconstante van waterdamp	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
r	straal van het kapillair	m
r_*	straal van het vloeistof oppervlak van de meniscus in een kapillair	m
r_c	straal van het open deel van een kapillair met een waterfilm op de wand	m

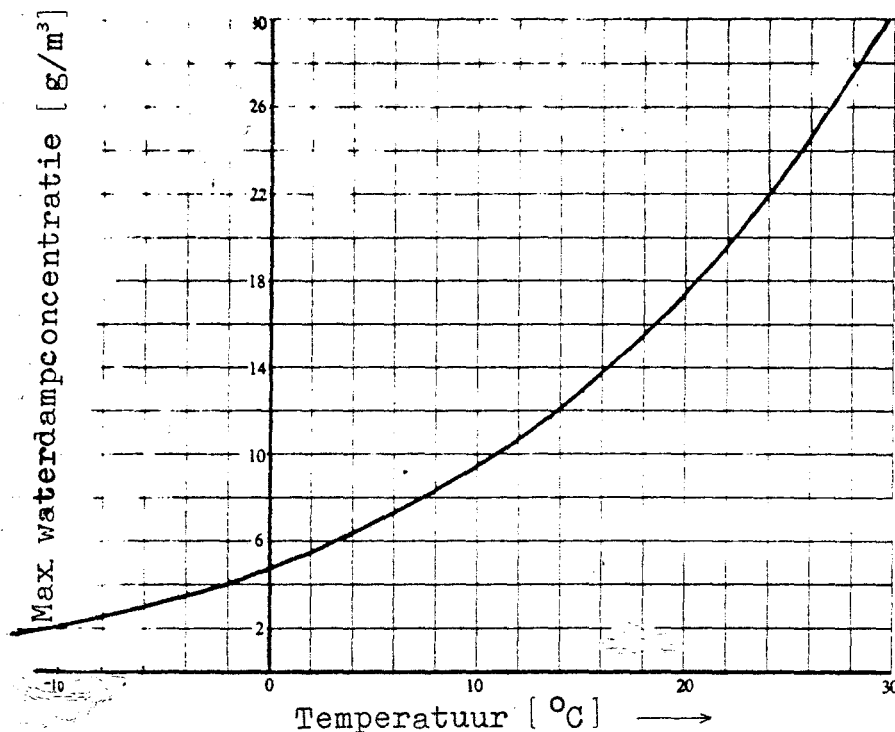
rv	relatieve vochtigheid	-
T	absolute temperatuur	K
t	tijd	s of uur
x	plaatscoördinaat	m
α	warmteovergangscoefficiënt	$J m^{-2} s^{-1} C^{-1}$
β	dampovergangscoefficiënt	$m s^{-1}$
Θ	volume fraktie	-
ϑ	de hoek die het sferisch oppervlak van de meniscus met de wand van het kapillair maakt	rad.
λ	warmtegeleidingscoefficient	$J m^{-1} s^{-1} C^{-1}$
μ	diffusie weerstandsgetal	-
ρ	soortelijke massa	$kg m^{-3}$
σ	oppervlakte spanning	$N m^{-1}$
τ	omlooptijd	s of uur
Φ	vochtpotentialiaal	m
Ψ	drukhoogte ($p_{hydr. stat.}/(\rho_l \cdot g_z)$)	m
Ψ'	drukhoogte corresponderend met p_{sat} ($p_{sat}/(\rho_l \cdot g_z)$)	m

Indices:

i	binnen
l	vloeibaar water
m	water en waterdamp
T	temperatuur
u	buiten
v	waterdamp
Θ	onder invloed van een vochtgradiënt

1 Inleiding

De ons omgevende lucht bevat altijd een zekere hoeveelheid waterdamp. Lucht van een bepaalde temperatuur kan slechts een maximale hoeveelheid waterdamp bevatten (C_{sat}), die maximale hoeveelheid is hoger naarmate de temperatuur hoger is (fig. 1).



figuur 1 Maximum waterdampconcentratie (C_{sat}) als functie van de temperatuur [4] .

De mate van verzadiging wordt door de relatieve luchtvochtigheid (rv) aangegeven en is gedefinieerd als

$$rv = C / C_{\text{sat}} \cdot 100\% \quad (-1-)$$

Daarbij is C gedefinieerd als de massahoeveelheid waterdamp per volume eenheid droge lucht. Bij gedeeltelijke verzadiging ($C < C_{\text{sat}}$) van het mengsel kunnen we condensatie op laten treden door bij dezelfde temperatuur steeds meer waterdamp aan het mengsel toe te voegen. Ook door middel van afkoeling kan verzadiging worden bereikt. Het mengsel wordt bij afkoelen steeds meer verzadigd met waterdamp totdat deze tenslotte condenseert.

De temperatuur waarbij dit gebeurt, is de dauwpuntstemperatuur van het mengsel. Het meten van de dauwpuntstemperatuur kan in principe een zeer nauwkeurige methode zijn om de absolute en/of relatieve vochtigheid van een lucht-water-dampmengsel te bepalen.

In ons klimaat treedt tengevolge van de temperatuur en vochtigheidsveranderingen een wissellende relatieve luchtvochtigheid op.

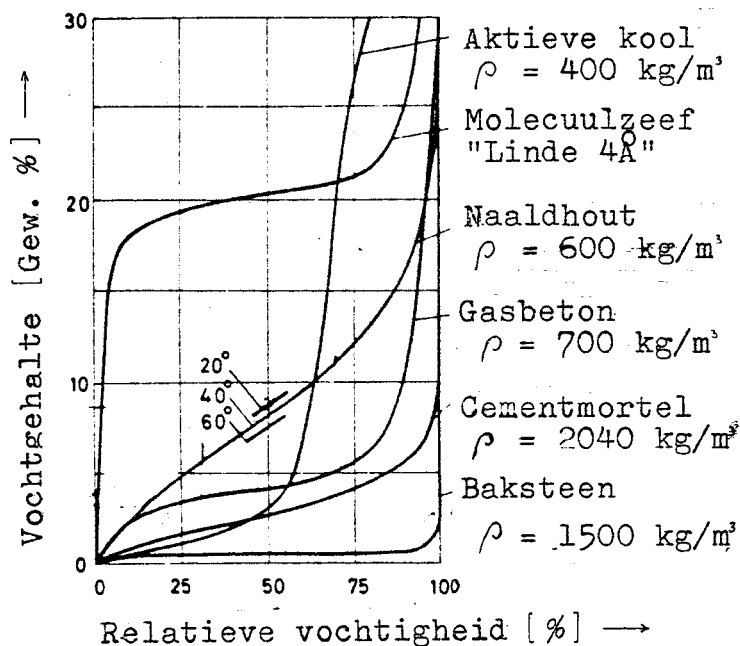
De absolute vochtigheid van de ons omgevende lucht is 's zomers groter dan in de winter, mede doordat de verdamping aan het aardoppervlak sneller verloopt bij hogere temperaturen. Toch is de relatieve vochtigheid 's zomers gemiddeld lager dan in de winter [9].

De dagelijkse variaties in de rv worden voornamelijk veroorzaakt door de temperatuurschommelingen over het etmaal. De rv binnen gebouwen is mede afhankelijk van de vochtigheid buiten omdat er altijd een zekere luchtuitwisseling met buiten bestaat (in woningen bedraagt deze ventilatie -per uur- gewoonlijk een klein veelvoud van de inhoud van de woning). De mate van ventilatie, het niveau van de temperatuur en de vochtproduktie binnenshuis zullen in belangrijke mate de relatieve vochtigheid bepalen. Verder zal er, afhankelijk van de vochttoestand aan het oppervlak van het in de woning aanwezige materiaal, door het materiaal vocht uit de omgeving onttrokken worden (absorptie) of aan de omgeving worden afgestaan (desorptie).

In fig. 2 zijn voor enkele materialen de evenwichtsvochtgehalten gegeven bij verschillende relatieve vochtigheden; de zgn. sorptie-isothermen.

Aangezien bij vele in de bouw toegepaste materialen de geabsorbeerde hoeveelheden vocht aanzienlijk kunnen zijn, kunnen deze niet in dampvorm in de materialen aanwezig zijn. Het vocht (in dampvorm aanwezig in de lucht) zal in het materiaal naar binnen diffunderen en daar van fase veranderen en zich in min of meer gebonden toestand in de waterige fase hechten aan de wand of de kapillaire ruimtes vullen. De faseverandering zal gepaard gaan met energie-afgifte ingeval van absorptie. Bij desorptie wordt energie onttrokken

aan het materiaal. De energie die vrijkomt resp. onttrokken wordt is van de orde van grootte van de latente warmte van waterdamp (litt. [1],[20]).



figuur 2 Sorptie-isothermen van poreuze stoffen [1].

Het optredende energie-effekt tengevolge van de absorptie of desorptie van waterdamp manifesteert zich in de loop van het jaar als volgt. In de herfst als de rv binnenshuis kleiner wordt, betekent het een extra warmtevraag. In de lente als de rv binnenshuis weer toeneemt zal er energie vrijkomen. Tot op heden zijn deze energie-effekten nooit in modellen die de energiebalans van gebouwen berekenen in rekening gebracht. Nadere studies zullen moeten uitwijzen of het in rekening brengen ervan ertoe leidt dat de gemeten en berekende energiebalansen van gebouwen een geringere discrepantie gaan vertonen. Het onderzoek waarover in dit rapport verslag wordt uitgebracht had tot doel een eerste verkenning daarover uit te voeren.

2 Absorptie en transport van vocht in materie.

2.1 Inleiding.

Zoals reeds eerder aangegeven is de centrale vraag in dit onderzoek; in welke mate het energie-effekt dat optreedt bij de absorptie (of desorptie) van vocht in materialen van invloed is op de warmtebalans van gebouwen. Voordat er voorspellende uitspraken m.b.t. de energie-effekten die gepaard gaan met absorptie (of desorptie) van vocht gedaan kunnen worden, moet eerst inzicht verkregen worden in de wijze van vochtopname (afgifte) in het materiaal. Ook moet bekend zijn hoe het transport van vocht in het materiaal verloopt. In dit hoofdstuk zullen deze twee laatstgenoemde zaken aan de orde komen.

Alvorens een beschrijving te geven van de meest relevante theorieën betreffende het vochttransport zal eerst een meer fenomenologisch overzicht worden gegeven van de verschijnselen die zich bij het opnemen (resp. afstaan) van vocht in materialen voordoen.

2.2 Relatieve vochtigheid en sorptie-isothermen.

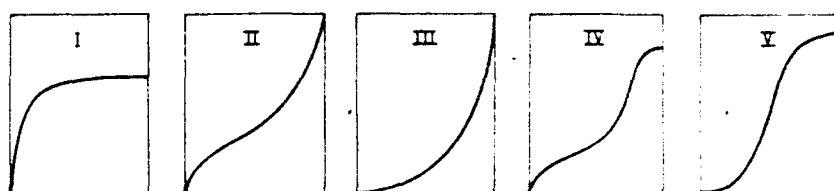
Uitgaande van een volkomen droog materiaal (in vacuüm uitgestookt bij 105 °C) wordt bekeken hoe bij toenemende vochtigheid, het vocht in het materiaal wordt opgenomen. In een omgeving met een geringe hoeveelheid waterdamp zullen watermoleculen een droog poreus materiaal binnendringen en zich in eerst instantie als een monomoleculaire laag vasthechten op het inwendige oppervlak van het materiaal. Bij toenemende vochtigheid zal deze laag zich verdikken tot een multimoleculaire laag tot tenslotte in de kleinste kapillairen de oppervlaktes van tegenover elkaar liggende lagen elkaar raken zodat zich een meniscus kan vormen. Vanaf dan geschiedt verdere stijging van het vochtgehalte door de zgn. kapillaire condensatie. Als de r_v de 100% benadert, zal ogenschijnlijk het maximaal mogelijke vochtgehalte van het materiaal bereikt worden. Echter als in het materiaal zulke grote holtes of ruimtes voorkomen

(diameter groter dan 10^{-7} m) dat het water zonder bijzondere krachten (zoals oppervlaktekrachten of aan reactieve centra) gebonden kan worden, kan bij een rv van 100% het poreuze materiaal in evenwicht zijn met een bereik van mogelijke vochtgehaltenes. Immers hoeven deze holtes niet noodzakelijkerwijs allemaal met water gevuld te zijn, omdat ongebonden vloeibaar water in alle hoeveelheden in evenwicht is met een rv van 100%.

In het voorgaande zijn de voornaamste effecten van absorptie van vocht in poreuze materialen besproken. In materialen zonder poreuze structuur waar absorptie van water mogelijk is, zal de absorptie plaatsvinden via het mechanisme van het oplossen van de stof. In het vervolg zal aan laatstgenoemde groep van stoffen geen aandacht meer worden besteed omdat zij voor bouwkundige konstrukties meestal niet van belang zijn.

De hoeveelheid vocht die een materiaal kan opnemen is afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de omringende lucht, dit komt tot uiting in de sorptie-isothermen van de stoffen. Bij één temperatuur vertoont de stof bij toenemende rv, in evenwicht, steeds één bepaald vochtgehalte. Bij dalende rv ligt dit vochtgehalte bij evenwicht hoger: adsorptie en desorptie-isothermen vertonen hysteresis.

Brunauer, Deming, Deming en Teller [2] hebben de sorptie-isothermen in 5 typen geklassificeerd (zie fig.3).

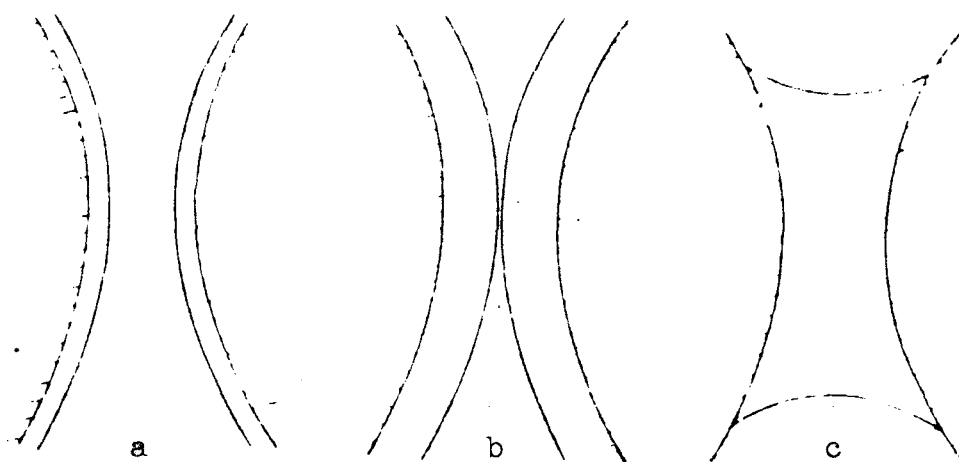


figuur 3 Klassificatie van de sorptie-isothermen in 5 typen volgens Brunauer, Deming, Deming en Teller [1].

-Type I treedt op als gevolg van een geringe wisselwerking tussen de dampmoleculen en de moleculen op het inwendige oppervlak van het materiaal. Er kan zich dan slechts een monomoleculaire laag vormen (Langmuir-isotherm).

-Type II is van bijzonder belang. Dit type sorptie-isotherm zal dan ook uitvoeriger besproken worden. Het water (of waterdamp) wordt in de meeste stoffen met fijne porieën in de eerst monomoleculaire laag exotherm gebonden. Bij de hogere relatieve vochtigheden bouwen zich dan de multimoleculaire lagen op, die echter minder sterk gebonden worden dan de eerste laag.

Als de kapillairen t.o.v. de multimoleculaire laag slechts een betrekkelijke geringe afmeting hebben, zullen bij groei van de lagen deze elkaar tenslotte raken (zie fig. 4).



figuur 4 Hygroscopische vochtabsorptie [16]

- a) monolaag
- b) multimoleculaire laag
- c) toestand van kapillaire condensatie

Na de vorming van een meniscus ontstaat kapillaire condensatie omdat boven de (holle) meniscus dampdrukverlaging plaatsvindt. De dampdrukverlaging is o.m. afhankelijk van de plaatselijke kromtestralen van het vloeistofoppervlak

in het kapillair. De dampdrukverlaging zorgt ervoor dat er voortdurend een dampspanningsgradiënt aanwezig is, zodat steeds nieuwe waterdamp aangevoerd wordt die dan prompt boven de meniscus condenseert.

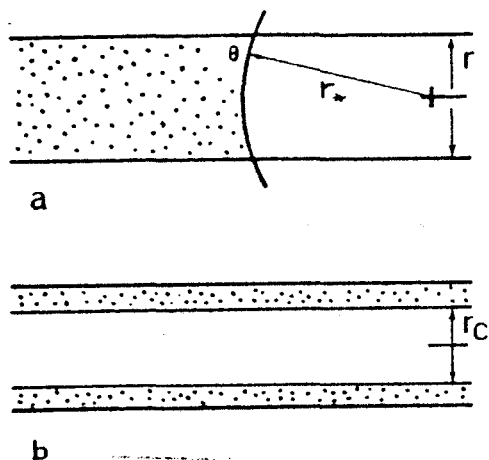
De grootte van de dampdrukverlaging boven een vloeistofoppervlak is gelijk aan:

$$\Delta p = J \cdot \sigma \quad [18] \quad (-2-)$$

en waarbij

$$J = \frac{1}{r_*} + \frac{1}{r_c} \quad [18] \quad (-3-)$$

J is de hoofdkromming van het vloeistofoppervlak en σ is de oppervlakte-spanning. (zie ook fig. 5).



figuur 5 Radius van vloeistofoppervlakken in kapillairen
 bij a) kapillaire condensatie
 b) een multimoleculaire laag op de wand [18]

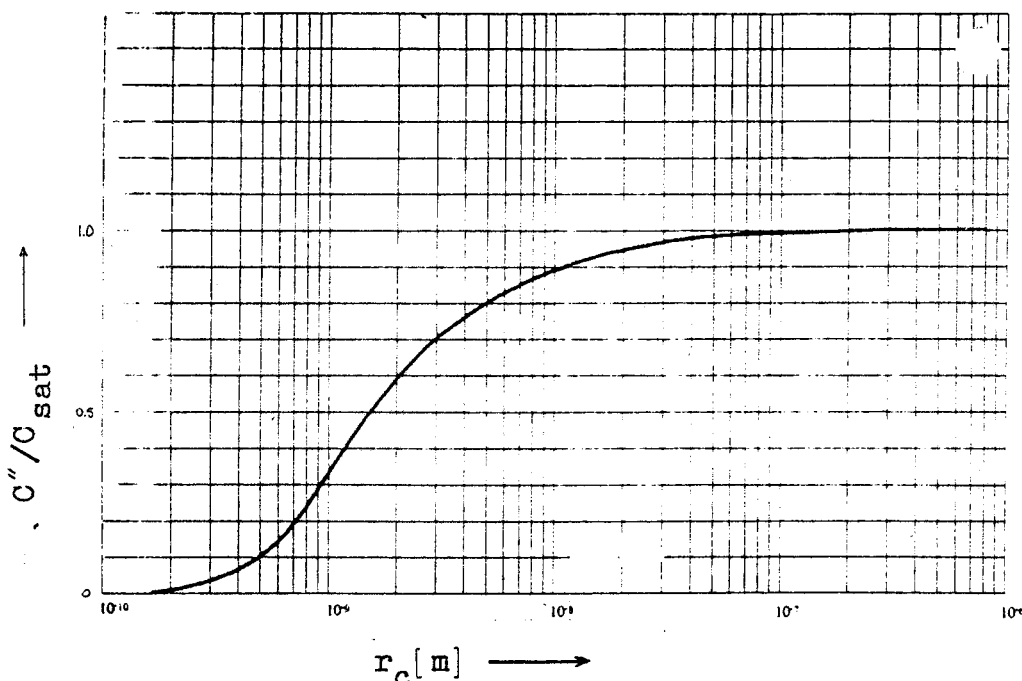
Fig.5 representeert de bijzondere gevallen van vgl -2-. Voor de cilindrische situatie (fig. 5b) geldt de wet van Thomson:

$$\frac{c}{c_{\text{sat}}} = \exp \left[\frac{-2 \cdot \sigma}{r_c \cdot \rho \cdot R \cdot T} \right] \quad (-4-)$$

De cilindrische situatie treedt op bij een multimoleculaire laag water op de wand (fig. 5b), daarbij is J gelijk aan $1/r_c$. De sferische situatie (fig. 5a) treedt op als er een meniscus gevormd is. Verondersteld dat geen multimoleculaire laag op de wand van het kapillair aanwezig is geldt dan de wet van Kelvin:

$$\frac{C''}{C_{\text{sat}}} = \exp \left[\frac{-2\sigma}{r \cdot \rho \cdot RT} \cos \vartheta \right] \quad (-5-)$$

In dit geval is J gelijk aan $1/r_*$ en ϑ de hoek die het sferisch oppervlak met de wand van het kapillair maakt.



Figuur 6 De relatieve maximum dampconcentratie C''/C_{sat} als functie van de straal volgens Thomson [6].

Doordat een materiaal meestal niet slechts kapillairen van één bepaalde diameter heeft, maar kapillairen met een range van diameters zal het "verstoppings"-effekt dat optreedt bij sluiting van de kapillairen niet scherp zichtbaar worden als een vlak lopende sorptie-isotherm voor de hogere relatieve vochtigheden.

-Sorptie-isothermen van type III (fig. 3) treden op bij de meeste hydrofobe stoffen op basis van organische polymeren. Bij lage relatieve vochtigheden zal de damp weinig inwerken op de stof omdat de reactie endotherm is.

Bij hogere r_v 's vindt echter een multimoleculaire wateropbouw op het inwendige oppervlak van de stof plaats, met een geringer of geen endotherm karakter.

-Sorptie-isothermen van de typen IV en V volgen uit combinaties van de typen II en III als bij hogere r_v 's de films zo dik worden dat de diameter van de kapillairen een verdere groei van de multimoleculaire laag onmogelijk maakt.

Voor de meeste poreuze stoffen, die in de bouw van belang zijn, is type II van toepassing. Als illustratief voorbeeld kan daarbij baksteen dienen, dit is een materiaal met vrijwel alleen grote kapillairen. De kapillairen van baksteen hebben overwegend een grotere diameter dan 10^{-6} m [1].

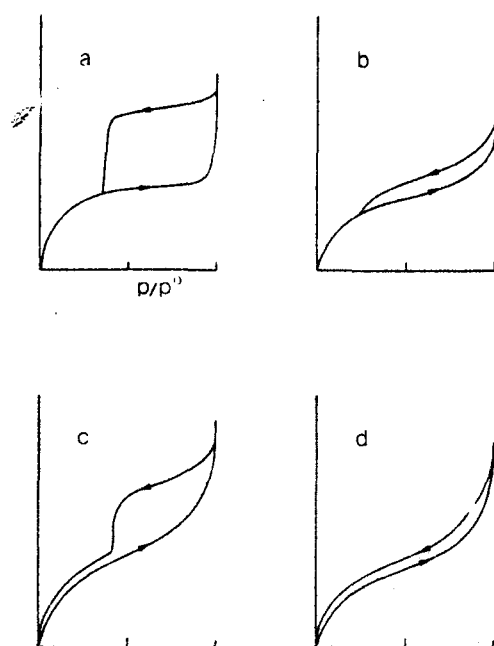
De theorie van de absorptie van gassen in multimoleculaire lagen wordt behandeld in de adsorptietheorie van Brunauer, Emmett en Teller (BET-theorie) [3] en [1]. Met behulp van deze theorie is de laagdikte van de multimoleculaire laag te berekenen indien men de hoeveelheid opgenomen water kent (uit de sorptie-isothermen) en enkele stofparameters.

Een belangrijke vooronderstelling van de BET-theorie is dat de binding van de eerste moleculaire laag en de volgende lagen in principe volgens dezelfde wetmatigheden verloopt.

2.3 Desorptie-isothermen.

Als de relatieve vochtigheid van de lucht rond een materiaal (aanvankelijk in vochtevenwicht met de omgeving) wordt verlaagd, dan zal, zoals eerder al aangestipt, in het algemeen het evenwichtvochtgehalte hoger zijn bij desorptie dan bij absorptie. Met andere woorden er is hysteresis tussen de sorptie en desorptie-isotherm.

Boucher [18] geeft vier typen hysteresispatronen (zie fig. 7). Hysteresis patronen zoals aangegeven in fig. 7a (de zgn. high-pressure loop) treden op bij poreuze stoffen met een relatief groot poriënvolume bestaande uit macroporiën (diam. groter dan 50 nm).



Figuur 7 Vier typen absorptie-isothermen met hysteresislussen [18].

In grote poriën zal bij overschreiding van een bepaalde r_v een instabiel evenwicht ontstaan en zal de porie zich spontaan geheel vullen met water. Dit effect zal omgekeerd plaatsvinden bij de desorptie bij onderschreiding van een bepaalde (lagere) r_v .

Het hysteresisverloop als aangegeven in fig. 7b treedt op bij samengepakte deeltjes zoals poeders en bij vaste stoffen met een gering volume aandeel macroporiën.

Het hysteresisverschijnsel volgens 7c is een combinatie van 7a en 7d.

Hysteresisverloop 7d is theoretisch nog niet helemaal verklaarbaar. Deze zogenaamde low pressure loop is afhankelijk van de aard van de vaste stof, de geabsorbeerde stof en de temperatuur waarbij deze stof geabsorbeerd is [18].

In tegenstelling tot 7a is het hysteresisverloop 7d het gevolg van geabsorbeerde vloeistof die zich in de micro-scheurtjes verzameld heeft.

2.4 Vochttransport fenomenologisch.

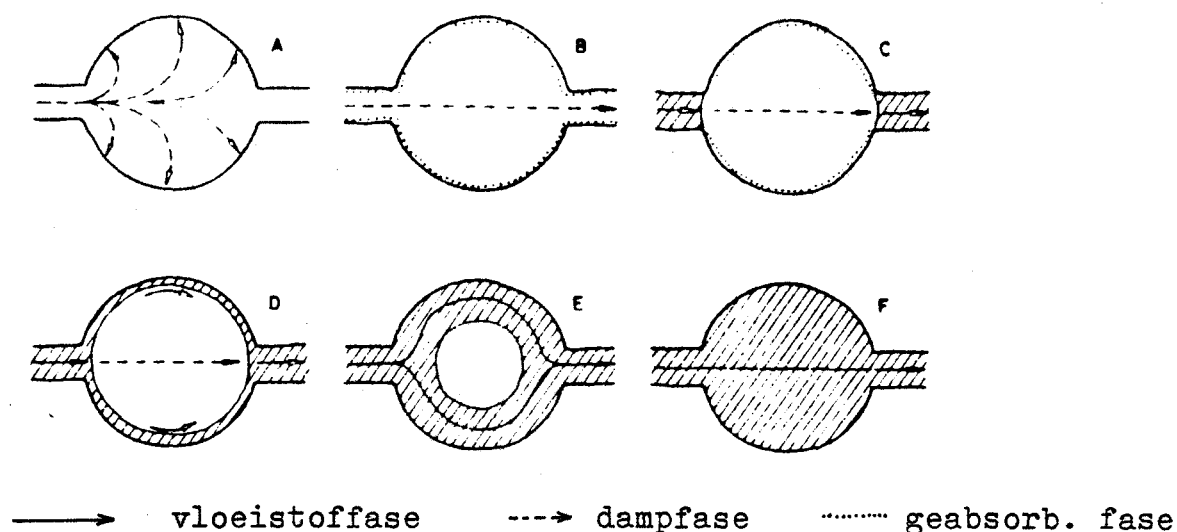
Bij lage rv 's bevinden zich, zoals in het voorgaande is aangegeven, slechts één of enkele lagen watermoleculen op de wanden van de kapillairen. Deze zijn daardoor relatief open en als gevolg daarvan zal het vochttransport, mits een dampspanningsgradiënt aanwezig, slechts plaatsvinden door dampdiffusie.

Bij hoge rv is een groot deel van de kapillairen geheel gevuld met water en zal dus het transport van vocht geschieden door verplaatsing van vloeibaar water.

Tussen deze twee uitersten, zuiver damptransport en zuiver watertransport, is een groot scala van tussenvormen mogelijk van gemengd damp- en watertransport. In het volgende worden deze besproken.

Allereerst zal bij toenemende rv de multimoleculaire laag op de poriënwallen dikker worden. Het gevolg is dat de voor diffusie beschikbare doorsnede kleiner wordt. Als de multimoleculaire laag echter dik genoeg is geworden zal het mogelijk zijn dat deze laag door middel van filmtransport ook gaat bijdragen aan het totale vochttransport. En aldus wordt de bijdrage van het damptransport bij stijgende rv steeds geringer en zal het vloeistoftransport op den duur de belangrijkste komponent van het totale vochttransport zijn. Dit verschijnsel wordt bevestigd door experimenten waar op macroscopische schaal de vochtgeleiding wordt gemeten (bijv. [6]). De uitwendig gemeten diffusiecoëfficiënt daalt dan aanvankelijk maar stijgt daarna bij wat hogere rv 's, als het transport in de waterfase belangrijk is geworden, aanzienlijk.

Vele materialen hebben kapillairen met een range van diameters. Als het materiaal globaal in evenwicht is met een bepaalde relatieve vochtigheid, kan het voorkomen dat de kapillairen met de kleinste diameters geheel gevuld zijn met vloeistof en de grotere kapillairen nog vrijwel geheel open zijn. Bij kapillairen met een variabele diameter is het dan mogelijk dat vloeistof- en damptransport in serie en parallel samen voorkomen. In fig. 8 is een dergelijk voorbeeld te vinden.



Figuur 8 Watertransport in een poreus anorganisch bouw-
materiaal in afhankelijkheid van het watergehalte [1].

De smalle stukken van het kapillair vertonen (8c t/m 8f) vloeistoftransport terwijl in de brede stukken van het kapillair in het algemeen waterdampdiffusie (en filmtransport) optreedt. Op de grensvlakken zal afwisselend condensatie en verdamping plaatshebben.

Alhoewel theoretisch waterdampdiffusie en watertransport gescheiden kunnen worden, is dit onderscheid voor metingen in de praktijk niet van belang. De (macroscopisch) gemeten diffusiecoëfficiënten hebben betrekking op gecombineerd damp en watertransport.

Diffusiecoëfficiënten worden experimenteel altijd in stationaire situaties bepaald. Immers in een instationaire situatie treedt in het materiaal een netto condensatie of verdamping op. Mathematisch is dit dan te beschouwen als een put- of bronterm in de diffusievergelijking. De lineaire differentiaalvergelijking, die de stationaire stroming of diffusie kenmerkt gaat dan over in een aanzienlijk ingewikkelder niet-lineaire vergelijking over.

2.5 Stationaire diffusie - Methode van Glaser.

De waterdampdiffusie in lucht volgt de wet van Fick nl.:

$$g = D \cdot \frac{dC}{dx} \quad (-6-)$$

waarin g de dampstroomdichtheid in de richting van x is en D de diffusiecoëfficiënt voor waterdamp in lucht.

D is temperatuur en druk afhankelijk en wordt gegeven door:

$$D = \frac{2,3}{P} \left[\frac{T}{273} \right]^{1,81} \quad [m^2/s] \quad \text{litt. [4] en [5] .}$$

In materialen waar de diffusiecoëfficiënt kleiner is dan in lucht geldt:

$$g = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{dC}{dx} \quad \text{of} \quad (-7-)$$

$$g = \frac{D}{\mu RT} \frac{dp}{dx} \quad (-8-)$$

μ is in deze twee laatste vergelijkingen het diffusieweerstandsgetal.

De diffusieweerstand van een uit meerdere lagen opgebouwde constructie wordt berekend door sommatie van de weerstanden van de samenstellende lagen, waarbij dan bovendien de waterdampovergangsweerstand opgeteld moet worden.

In stationaire diffusie processen kan op zeer gemakkelijke wijze de concentratie in het materiaal grafisch bepaald worden. Met deze methode, welke bekend is als de methode van Glaser, uitvoerig beschreven in bijv. litt. [8] hfdst.IX, berekent men allereerst het temperatuurverloop.

Daarmee is dan de maximale waterdampdruk die kan optreden op iedere plaats bekend (fig 1). Het optredende dampdrukverloop in iedere laag wordt op overeenkomstige wijze als de temperatuur grafisch uitgezet (zie fig. 9).

2.6.1. Theorie van de Vries [13].

a) Transport van vloeibaar water.

Uitgangspunt bij het transport van vloeibaar water is de bekende wet van Darcy:

$$g_1 = -\rho_1 \cdot k \cdot \nabla \Phi \quad (-9-)$$

Deze vergelijking geeft de vochtstroom in de vloeistof-fase tengevolge van de gradiënt van de vochtpotentialaal. De vochtpotentialaal bestaat uit de hydrostatische druk en overige uitwendige krachten. De konstante k is het hydraulisch geleidingsvermogen.

Onder verwaarlozing van de uitwendige krachten (zwaartekracht) kan deze vergelijking ook geschreven worden als:

$$g_1 = -\rho_1 \cdot D_{e1} \nabla \Theta_1 - \rho_1 \cdot D_{T1} \nabla T \quad (-10-)$$

D_{e1} is de diffusiecoëfficiënt voor vochttransport in de vloeibare fase onder invloed van een vochtgradiënt.

D_{T1} is de diffusiecoëfficiënt voor vochttransport in de vloeibare fase onder invloed van een temperatuurgradiënt.

$D_{e1} = k (\partial \Psi / \partial \Theta_1)_T$ en $D_{T1} = k \cdot (\partial \Psi / \partial T)_{\Theta_1}$. Ψ is de drukhoogte deze is gelijk aan $p_{\text{hydr.st.}} / \rho_1 \cdot g_z$. Θ_1 is de volume fractie vloeibaar water.

Toepassing van de wet van massabehoud levert:

$$\rho_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} = -\nabla g_1 = \rho_1 [\nabla (D_{e1} \nabla \Theta_1) + \nabla (D_{T1} \nabla T)] - E \cdot \rho_1 \quad (-11-)$$

Daarbij is E het volume water dat per eenheid van volume en tijd van de vloeibare fase overgaat in de dampfase.

b) Transport van waterdamp.

Voor het transport van waterdamp geldt:

$$g_v = -D \cdot \frac{P}{P-p} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \nabla p \quad (-12-)$$

Deze vergelijking geeft het waterdamptransport tengevolge een dampdrukgradiënt. De afleiding van deze vergelijking is te vinden in litt. 14.

Vergelijking -12- kan opgesplitst worden in een term die afhankelijk is van de temperatuurgradiënt en een term die afhangt van de vochtgradiënt. Dit gebeurt op de volgende wijze.

De relatieve vochtigheid wordt gedefinieerd als het quotiënt van de dampdruk p en de verzadigde dampdruk p_{sat} .

$$p = rv \cdot p_{sat}$$

Bij evenwicht tussen vloeibaar water en waterdamp in het materiaal hangt rv als volgt met de vloeistofdruk ψ' samen:

$$rv = \exp \left[\frac{M \cdot g_z \cdot \psi'}{R \cdot T} \right]$$

ψ' is daarbij $p_{sat} / (\rho_1 \cdot g_z)$.

De relatieve vochtigheid rv hangt van zowel de temperatuur als de volumefractie vocht in het materiaal af.

de verzadigde dampdruk p_{sat} hangt uitsluitend van de temperatuur af. Vergelijking -12- gaat onder gebruikmaking van de laatste twee vergelijkingen dan over in:

$$\Delta p = p_{sat} \left[\frac{\partial rv}{\partial \theta_1} \right]_{T} \cdot \nabla \theta_1 + p_{sat} \left[\frac{\partial rv}{\partial T} \right]_{\theta_1} \cdot \nabla T + rv \cdot \frac{dp_{sat}}{dT} \cdot \nabla T \quad (-13-)$$

of

$$g_v = -\rho_1 \left[D_{ev} \cdot \nabla \theta_1 + D_{Tv} \cdot \nabla T \right] \quad (-14-)$$

met

$$D_{ev} = F(a) \cdot D \cdot \frac{P}{P-p} \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{M}{RT} g_z \cdot \left[\frac{\partial \Psi'}{\partial \Theta_1} \right] T \quad \text{en}$$

$$D_{Tv} = F(a) \cdot D \cdot \frac{P}{P-p} \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{1}{p_{sat}} \cdot \frac{dp_{sat}}{dT}$$

$F(a)$ is een algemene functie van het gasgehalte die de labyrint of omwegfaktor in rekening brengt en die de totaal voor diffusie beschikbare doorsnede per eenheid van oppervlak vertegenwoordigt [14].

D_{ev} en D_{Tv} zijn de dampdiffusiecoëfficiënten voor damptransport tengevolge van drukgradiënten respectievelijk temperatuurgradiënten.

Toepassing van de wet van massabehoud levert:

$$\rho_l \cdot \frac{\partial \Theta_v}{\partial t} = - \nabla g_v = \rho_l \nabla (D_{ev} \nabla \Theta_1) + \nabla (D_{Tv} \nabla T) + E \rho_l \quad (-15-)$$

Θ_v is het volume van de condenseerbare waterdamp per volume eenheid van het materiaal.

De totale massastroomdichtheid is:

$$g_m = g_l + g_v = -\rho_l \cdot (D_e \nabla \Theta_1 + D_T \nabla T) \quad (-16-)$$

met

$$D_e = D_{e1} + D_{ev} \quad \text{en}$$

$$D_T = D_{T1} + D_{Tv}$$

2.6.2. Oplossingen van de instationaire transportvergelijking van waterdamp bij konstante diffusiecoëfficiënten onder verschillende randvoorwaarden.

Onder de veronderstelling dat er geen uitwendige krachten werkzaam zijn geldt voor diffusieprocessen de eerste wet van Fick

$$g = - D^* \frac{dC}{dx} \quad (\text{eendimensionaal}) \quad (-19-)$$

of

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla g = \nabla (D^* \frac{\partial C}{\partial x}) = D^* \nabla^2 C \quad (-20-)$$

Deze laatste continuïteitsvergelijking wordt ook wel de tweede wet van Fick genoemd.

-Vergelijking -20- heeft voor een half oneindig medium met als randvoorwaarden

$$\begin{aligned} C &= C_2; \quad x = 0, \quad t \geq 0, \\ C &= C_1; \quad x > 0, \quad t = 0 \quad (\text{absorptie}). \end{aligned}$$

de oplossing

$$\frac{C - C_1}{C_2 - C_1} = 1 - \text{erf} (x/(2\sqrt{D^*t})) \quad [1] \quad (-21-)$$

met

$$\text{erf} (x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp (-\zeta^2) d\zeta$$

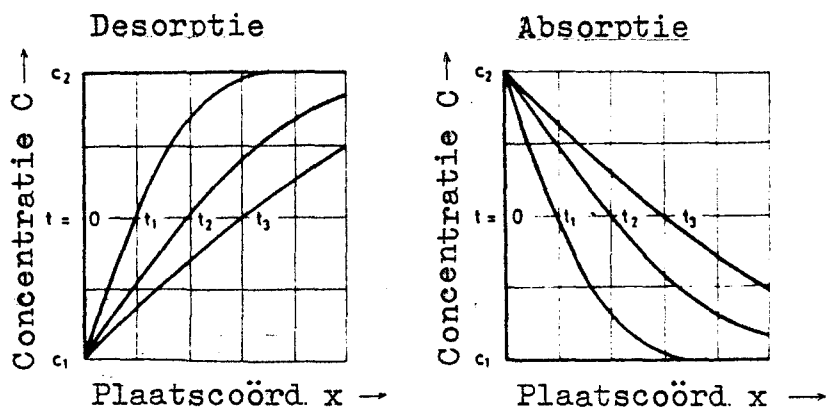
-Vergelijking -20- heeft met als randvoorwaarden

$$\begin{aligned} C &= C_1; \quad x = 0, \quad t \geq 0, \\ C &= C_2; \quad x > 0, \quad t = 0 \quad (\text{desorptie}). \end{aligned}$$

de oplossing

$$\frac{C - C_1}{C_2 - C_1} = \text{erf} (x/(2\sqrt{D^*t})) \quad [1] \quad (-22-)$$

Figuur 10 toont hoe de concentratie als functie van de coördinaat verloopt met de tijd.



Figuur 10 Concentratieverloop bij sorptie en desorptie als gevolg van een plotselinge verandering van de oppervlakte-concentratie van een half oneindig medium (oplossing -21- en -22-).

Integratie van vergelijking -21- over de plaatscoördinaat levert de opgenomen hoeveelheid vocht G op

$$G(t) = \sqrt{4\pi} \cdot (C_2 - C_1) \cdot \sqrt{D \cdot t} \quad (-23-)$$

Er kan opgemerkt worden dat de opgenomen hoeveelheid vocht evenredig is met de wortel uit de tijd.

-De oplossing van de diffusievergelijking (tweede wet van Fick) onder de randvoorwaarde dat de concentratie C aan het oppervlak reeds geruime tijd harmonisch verloopt, luidt voor een half oneindig medium [1] :

$$C = C_0 \cdot \exp(-\sqrt{\pi/D\tau} \cdot x) \cdot \cos(2\pi t/\tau - \sqrt{\pi/D\tau} \cdot x) \quad (-24-)$$

met als randvoorwaarde bij $x = 0$;

$$C = C_0 \cdot \cos(2\pi t/\tau)$$

waarbij τ de omlooptijd is en C_0 de amplitude van de vochtconcentratie op de rand van het medium.

-Oplossingen van de tweede wet van Fick voor begrensde weglengtes voor x ($0 \leq x < d$) worden gegeven door sommatie van particuliere oplossingen van deze differentiaalvergelijking.

-Onder de randvoorwaarden en beginvoorwaarde

$$\begin{aligned} C &= C_2 \text{ voor } x = 0 \text{ en } t \geq 0, \\ dC/dx &= 0 \text{ voor } x = d \text{ en } t \geq 0, \\ C &= 0 \text{ voor alle } x \text{ en } t \leq 0 \end{aligned}$$

is de oplossing van de differentiaalvergelijking:

$$C = - \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \frac{4}{\pi(2n-1)} \cdot \exp \left[-(2n-1)^2 \pi^2 \cdot D^* \cdot t / (4d^2) \right] \cdot \sin \left((2n-1) \cdot \pi \cdot x / (2d) \right) + C_2 \quad (-25-)$$

De resultaten van vergelijking -25- moeten dezelfde zijn als voor een half oneindig medium (vgl. -21-) voorzover de concentratie aan de gesloten achterwand nog niet veranderd is door de absorptie.

Gaat de concentratie echter aan de achterwand merkbaar veranderen (er treedt zgn. reflectie op) dan zullen de resultaten van vgl. -21- en vgl. -25- andere resultaten opleveren.

-Onder de volgende randvoorwaarden en beginvoorwaarden

$$\begin{aligned} C &= C_2 \text{ voor } x = 0 \text{ en } t > 0 \\ C &= 0 \text{ voor } x = d \text{ en } t > 0 \\ C &= 0 \text{ voor alle } x \text{ en } t \leq 0 \end{aligned}$$

is de oplossing:

$$C = - \sum_{n=1}^{\infty} 2C_2 / (n \cdot \pi) \cdot \exp \left[-(n \cdot \pi)^2 \cdot D^* \cdot t / d^2 \right] \cdot \sin \left(n \pi \cdot x / d \right) - C_2 x / d + C_2 \quad (-26-)$$

De afleiding van vergelijking -25- en -26- is te vinden in appendix B.

2.7. Een methode om de condensatieterm bij instationaire dampdiffusie in de diffusiecoëfficiënt te verdisconteren.

Indien condensatie optreedt, wordt een hoeveelheid vocht onttrokken aan de lucht in de poriën ten gunste van de waterhoeveelheid. Stel dat is a^* kilogram per volume-eenheid materiaal.

De sorptie-isotherm kan gelineariseerd geschreven worden als:

$$a = a_0 + a_1 \delta rv \quad (-27-)$$

met

$$\delta rv = rv_1 - rv_0$$

Uit deze relatie blijkt hoeveel damp condenseert bij toenemende dampconcentratie (zie ook fig. 11).

Bij differentiatie van -27- naar de tijd volgt:

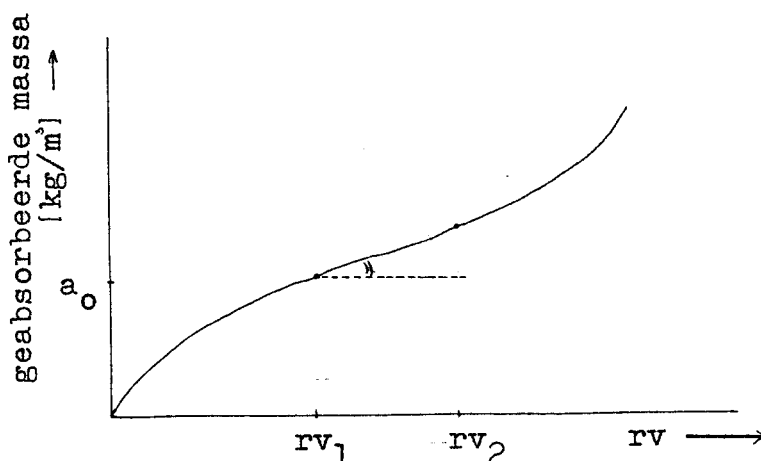
$$\frac{da^*}{dt} = a_1^* \frac{dC}{dt} \quad \text{met } a_1^* = a_1 / C_{\text{sat}} \quad (-28-)$$

De tweede wet van Fick wordt inclusief condensatieterm

$$\frac{dC}{dt} = D^* \frac{d^2 C}{dx^2} - a_1^* \frac{dC}{dt} \quad (-29-)$$

De laatste term in het rechter lid is de eerste orde benadering van de condensatie.

Figuur 11 Sorptie-isotherm met richtingscoëfficiënt.



$$\frac{dC}{dt} \cdot (1 + a_1^*) = D^* \frac{d^2C}{dx^2} \quad (-30-)$$

$$\frac{dC}{dt} = D^0 \frac{d^2C}{dx^2} \quad \text{met } D^0 = D^* / (1 + a_1^*) \quad (-31-)$$

D^0 zal nu de schijnbare diffusiecoëfficiënt bij stationaire absorptie of desorptie genoemd worden.

De conclusie is zoals te verwachten was dat de diffusie-term tengevolge van de condensatie sterk verkleind wordt. Impliciet is verondersteld dat loodrecht op de macroscopische transportrichting van het vocht, het materiaal in evenwicht is met de damp in de poriën. Gezien de kleine diameter van de poriën lijkt dit wel gerechtvaardigd.

3 Experimenten.

3.1 Inleiding.

In de literatuur zijn weinig experimentele gegevens te vinden over instationaire diffusie. Hoewel de theorie oplossingen levert voor instationaire diffusievergelijkingen zonder put- of brontermen [1] zijn deze juist vanwege het ontbreken van deze laatste termen slechts zeer beperkt toepasbaar in ons geval.

Onder meer om de zelf ontwikkelde theorie te toetsen zijn enkele experimenten opgezet om in instationaire absorptie- en desorptie situaties de geaccumuleerde hoeveelheid vocht als functie van de tijd te meten. In het volgende hoofdstuk worden de uitvoering van de experimenten en de meetopstelling besproken. In de hoofdstukken daaropvolgend worden de meetresultaten besproken en vergeleken met de theoretisch bepaalde waarden.

3.2 Opstelling en uitvoering van de experimenten.

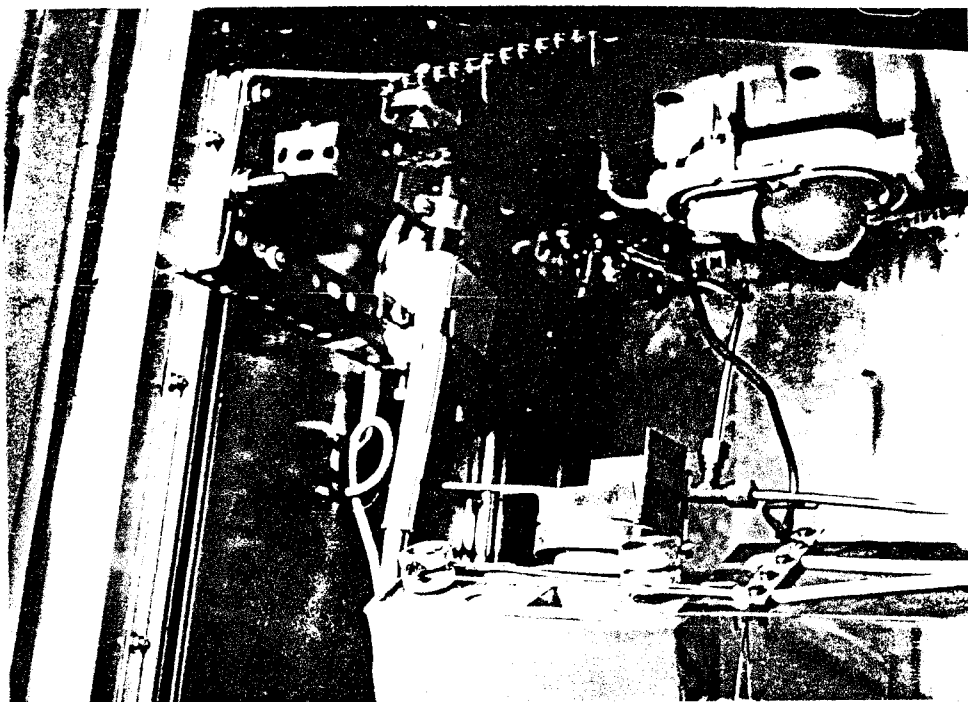
Het experiment bestond uit het meten van de massa toe- of afname van respektievelijk baksteen (toegepast in het THE-zonnehuis) en kalkzandsteen bij variatie van de relatieve vochtigheid van de lucht.

De metingen werden uitgevoerd in een klimaatkast en de massa-toename werd bepaald met behulp van een balans. De klimaatkast is van Grenco (type GKSD 125.40) en is opgesteld bij de vakgroep Materiaalkunde afdeling Bouwkunde. In de klimaatkast werd een ketting aangebracht die over vier rollen kan ronddraaien. Aan de ketting zijn haken bevestigd waaraan de proefstukken konden hangen (zie foto volgende pagina).

Om een meting te verrichten wordt het proefstuk op de juiste plaats gepositioneerd door middel van het ronddraaien van de ketting. Een hijswerktuigje (handbediening), zie midden foto, neemt het proefstuk van de haak en legt het op de balans.

Deze balans bevindt zich in de klimaatkast en kan door afstandbediening in evenwicht gebracht worden. Door een kijkvenster in de deur van de klimaatkast kan de massa afgelezen

worden. De balans (Mettler type 1210) heeft een meetbereik van 0.01 g tot 1200 g en een standaarddeviatie van 0.01 g.



Het interieur van de klimaatkast. Onderaan op de foto bevindt zich de balans erboven onder de lamp het hijswerktuigje. Boven links is duidelijk de ketting en een rol te zien, daarachter is het aandrijfmechanisme te zien.

De proefstukken werden eerst op maat gezaagd met een diamantzaagmachine (maatopgave en gemiddelde dichtheid van de proefstukken zie tabel 1 en 2). De proefstukken konden na het zagen enkele dagen in de vrije omgeving drogen waarna de proefstukken in de vacuümdroogstoof 24 uur lang gedroogd werden bij een temperatuur van 105 °C. Daarna werden de proefstukken met tweecomponentenhars en aluminiumfolie aan de achterzijde en de zijwanden ondoordringbaar gemaakt voor vocht. Deze behandeling zorgt ervoor dat tijdens de absorptie en desorptie slechts ééndimensionale toetreding of uittreding van vocht optreedt.

Tabel 1 Afmetingen en gemiddelde dichtheid van de kalkzandsteen proefstukken

proefstuk *)	opp. voorfront [cm ²]	dikte d [cm]
□	96,3 ± 1	2,1 ± 0,1
○	95,4 ± 1	2,1 ± 0,1
△	95,4 ± 1	2,0 ± 0,1
+	96,3 ± 1	2,5 ± 0,1
×	96,3 ± 1	2,6 ± 0,1
◇	96,3 ± 1	2,5 ± 0,1
↑	93,6 ± 1	2,5 ± 0,1
z	95,9 ± 1	3,0 ± 0,1
⌘	95,9 ± 1	3,0 ± 0,1

gemiddelde dichtheid $\bar{\rho} = 1,87 \cdot 10^3 \pm 0,04 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

*) Dit symbool komt overeen met het symbool in de grafieken

Tabel 2 Afmetingen en gemiddelde dichtheid van de baksteen proefstukken

proefstuk *)	opp. voorfront [cm ²]	dikte d [cm]
□	98 ± 2	3,0 ± 0,1
○	95 ± 2	3,0 ± 0,1
△	96 ± 2	3,0 ± 0,1
+	99 ± 2	3,1 ± 0,1
×	97 ± 2	3,3 ± 0,1
◇	96 ± 2	4,2 ± 0,1
↑	94 ± 2	4,0 ± 0,1

gemiddelde dichtheid $\bar{\rho} = 1,53 \cdot 10^3 \pm 0,05 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

*) Dit symbool komt overeen met het symbool in de grafieken

De vergelijking met de theoretisch gevonden oplossingen is dan betrekkelijk eenvoudig. Het niet dichtgeplakte vlak van het proefstuk van het proefstuk komt overeen met het normalerwijze in het zicht komende deel van de steen.

De stenen worden na de behandeling in de vacuümdroogstoof in de klimaatkast opgehangen en in vochtevenwicht gebracht met 30 % relatieve vochtigheid bij 25 °C. De relatieve vochtigheid van de lucht wordt daarna, na het bereiken van evenwicht, stapvormig gevarieerd en op 50 % rv gebracht. Achtereenvolgens worden zo in de relatieve vochtigheid de stappen 30-50 % rv, 50-70 % rv, 70-50 % rv en 50-30 % rv gemaakt.

De tijd tussen de stappen is zo gekozen dat de evenwichtsvochtgehalten bij respectievelijk 30 % rv, 50 % rv, 70 % rv, 50 % rv en 30 % rv nagenoeg worden bereikt zoals de grafieken la t/m 8a laten zien. De temperatuur is gedurende de metingen steeds op 25 °C ingesteld. De onnauwkeurigheid in de temperatuurinstelling bedroeg 0,3 °C. Tijdens de metingen kan, door gebruik van extra verlichting binnen de klimaatkast, de temperatuur in de klimaatkast incidenteel tot 26,5 °C oplopen. De effecten van deze temperatuurstijging voor de relatieve vochtigheid worden in de verdere berekeningen niet gecorrigeerd, mede omdat de betreffende periodes van korte duur zijn (ca. ½ uur). Wel had de temperatuurstijging tot gevolg dat de tarra instelling van de balans tijdens de metingen wat verliep, het geen een extra tarreerfout introduceert. Voor de metingen na het bereiken van het evenwichtsvochtgehalte behorend bij 70 % rv is daarvoor een correctie van de gemeten waarden uitgevoerd. Het tarra-bedrag dat afgetrokken moet worden van de gemeten waarden is voor de desorptie trajekten tijdafhankelijk gemaakt. De fout waarmee de massatoename in de absorptie trajekten gemeten werd ligt tussen -0,03 g en +0,06 g. In de desorptie trajekten is de onnauwkeurigheid waarmee de massa-afname bepaald werd ±0,03 g. De fouten zijn het gevolg van de meetonnauwkeurigheid van de balans, afleesfouten en (extra) tarreerfouten.

Daar het oppervlak dat voor vochtpenetratie beschikbaar is, ongeveer 100 cm² is (zie tabellen 1 en 2), is de fout in de

absorptie, zie de grafieken 1 t/m 8, een faktor 100 groter, omdat de oorspronkelijke absorptie/ desorptie meetgegevens herleid zijn naar de eenheid g/m^2 .

3.3 Resultaten van de experimenten.

De grafieken 1a t/m 4a en 5a t/m 8a laten zien hoe de absorptie en desorptie van vocht in respektievelijk kalkzandsteen en baksteen verlopen. Duidelijk is te zien dat de dikkere proefstukken meer vocht absorberen dan de dunnere. Bij het bereiken van het nieuwe evenwicht blijkt dat de absorptie ongeveer evenredig is met de dikte van het proefstuk, hetgeen ook te verwachten was.

Zoals in hoofdstuk 3.2 is vermeld, is de gewichtstoename en afname gemeten bij na stapvariaties in de rv, uitgaande van vochtevenwichtssituaties in de proefstukken.

In grafiek 9 en 10 vindt men de sorptie- en desorptie-isothermen van kalkzandsteen en baksteen bij 25°C .

Op de vertikale assen van de grafieken 9 en 10 is de vochtgehalteverandering ten opzichte van het vochtevenwicht bij 30 % rv (=nulpunt van de schaal) uitgezet, omdat de uitdroogproef in de vacuümdroogstoof slecht reproduceerde met betrekking tot het vochtgehalte bij 0 % rv. Het nulpunt van de vochtevenwichtsgelteschaal is derhalve arbitrair bij 30 % rv vastgelegd.

Omdat slechts een vijftal vochtevenwichtssituaties zijn gemeten bieden deze sorptie en desorptie-isothermen te weinig houvast om eventuele berekeningen omtrent de kapillaire verdeling met voldoende nauwkeurigheid uit te voeren. Uit de sorptie-desorptie-isotherm is de maximale hoeveelheid vocht af te lezen die geabsorbeerd of gedesorbeerd kan worden binnen het interval 30 % - 70 % relatieve vochtigheid. Deze hoeveelheid is van belang voor de lange termijn schommelingen in de rv binnenshuis en de daarmee gepaard gaande seizoenseffekten in de energievraag tengevolge vochtabsorptie. Voor de korte termijn invloeden die zich binnen het tijdsbestek van enkele uren afspelen is de absorptie direkt na de rv-stap van belang.

In de tabellen 3 en 4 is vermeld hoe groot onder experimentele omstandigheden en na korrektie voor niet exakte stapvormigheid van de rv-stap, de geabsorbeerde hoeveelheden zijn enkele uren na de stapvariatie in de rv.

De korrektie voor de niet-stapvormigheid is nodig wegens de vertraagde instelling van de rv in de klimaatkast, na omschakeling naar een andere rv.

Het blijkt wel dat ongeveer één uur na wijziging van de instelling van de relatieve vochtigheid, 90 % van de gemaakte stap gerealiseerd is. Om de niet strikt stapvormige stap in de rv te herleiden tot een werkelijke stap zijn korrektiefactoren berekend uit het verloop van de rv in de klimaatkast direct na het omschakelen. Dit wordt in het volgende toegelicht.

Het rv-verloop vlak nadat de rv van de klimaatkast op een andere waarde is ingesteld is terug te vinden in de grafieken 11 t/m 14.

Grafiek 13 laat in afwijking met de grafieken 11, 12 en 14 wel een exakte stapvariatie zien. De hier (geschatte) abrupte verandering van de relatieve vochtigheid is het gevolg van het openen van de klimaatkast gedurende korte tijd na de wijziging van de instelling. Hierdoor vond een sterke uitwisseling van vocht met de omgeving plaats (rv ca. 45% en temp ca. 20 °C).

Ten opzichte van een echte stapvariatie in de relatieve vochtigheid absorberen of desorberen de proefstukken in de experimentele situatie te weinig waterdamp. De concentratie van de waterdamp aan het grensvlak is in de experimentele situatie aanvankelijk kleiner (absorptie) dan bij een echte stapvariatie in de rv het geval zou zijn.

De geabsorbeerde hoeveelheid is vlak na de stapvariatie in eerste benadering evenredig met de tijd en de concentratiegradiënt aan het grensvlak (en dus van de grootte van de stap). Vlak na de stap is dus de geabsorbeerde hoeveelheid in eerste benadering evenredig met het oppervlak onder de stapfunctie in de rv-tijd grafiek. Dit laatste geldt ook als de stap niet exakt stapvormig is. De rv-tijd kromme (grafiek 11 t/m 14) kan altijd opgevat worden als een aantal opeenvolgende stapvariatiën in de rv.

Tabel 3 Absorptie en desorptie bij kalkzandsteen na correctie voor niet-stapvormigheid van de rv-stap.

stapvariatie	geabsorbeerde of gedesorbeerde hoeveelheid	
	1) gemiddelde in de eerste 3 uur na de rv ₂ -stap [g·m ⁻² ·uur ⁻¹]	2) gemiddelde in de eerste 8 uur na de rv ₂ -stap [g·m ⁻² ·uur ⁻¹]
30-50 % rv	5,4 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -1 \end{smallmatrix}$	3,3 $\begin{smallmatrix} +0,8 \\ -0,4 \end{smallmatrix}$
50-70 % rv	4,7 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -1 \end{smallmatrix}$	4,6 $\begin{smallmatrix} +0,8 \\ -0,4 \end{smallmatrix}$
70-50 % rv	5,1 ± 1	3,6 ± 0,4
50-30 % rv	3,8 ± 1	2,3 ± 0,4

Tabel 4 Absorptie en desorptie bij baksteen

stapvariatie	geabsorbeerde of gedesorbeerde hoeveelheid	
	1) gemiddelde in de eerste 3 uur na de rv- stap (zonder correctie) [g·m ⁻² ·uur ⁻¹]	2) gemiddelde in de eerste 8 uur na de rv- stap (zonder correctie) [g·m ⁻² ·uur ⁻¹]
30-50 % rv	2,1 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -1 \end{smallmatrix}$	0,9 $\begin{smallmatrix} +0,8 \\ -0,4 \end{smallmatrix}$
50-70 % rv	0,8 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -1 \end{smallmatrix}$	1,3 $\begin{smallmatrix} +0,8 \\ -0,4 \end{smallmatrix}$
70-50 % rv	1,9 ± 1	1,0 ± 0,4
50-30 % rv	1,1 ± 1	0,6 ± 0,4

De korrektie van de geabsorbeerde hoeveelheid voor niet stapvormigheid van de rv-verandering kan op twee manieren geschieden door:

- 1) verschuiving van de tijdas in de absorptie-grafiek
- 2) vergroting van de geabsorbeerde hoeveelheden door vermenigvuldiging met een korrektiefactor.

De korrektiefactor wordt dan bepaald door het quotiënt van de integralen van de relatieve vochtigheid-tijd krommes van respectievelijk een echte rv-stap en de experimenteel gemeten kromme.

In formule:

$$\text{korrektiefactor} = \frac{\int_0^t \Gamma \Delta r v \, d\tau}{\int_0^t \Delta r v(t) \, d\tau}$$

De korrektie van de geabsorbeerde hoeveelheden is op deze laatste manier uitgevoerd.

De gemeten of schijnbare diffusiecoëfficiënt D^0 (zie vgl. -31-) is voor kalkzandsteen bepaald uit de richtingscoëfficiënt van het eerste rechte stuk van de wortel-t - absorptie grafieken (grafiek lb t/m 4b). De richtingscoëfficiënt is bepaald met de kleinste kwadratenmethode en uiteraard is gekorrigeerd voor het niet-stapvormig zijn van de rv-stap.

De diffusie-overgangsweerstand is niet in rekening gebracht omdat deze ten opzichte van de dampdoorgangsweerstand verwaarloosbaar klein is. Zie toelichting appendix A.

In tabel 5 zijn de aldus bepaalde waarden van D^0 getabelleerd voor de vier stapvariaties in de relatieve vochtigheid. In de derde kolom van tabel 5 is de faktor $1 + a_1^*$ getabelleerd. Met deze faktor dient D^0 vermenigvuldigd te worden om de diffusiecoëfficiënt D^* van het materiaal te verkrijgen (zie vgl. -31-). In tabel 5 zijn ook enkele literatuurwaarden van D voor kalkzandsteen gepresenteerd. De gevonden D^0 (tabel 5) wordt gebruikt om een theoretische concentratie te berekenen (met behulp van vgl. -25-).

Integratie van de dan verkregen concentratie over de plaatscoördinaat x levert vervolgens, na normering, voor iedere

tijd t de geabsorbeerde hoeveelheid als percentage van de maximaal mogelijke absorptie per oppervlakte-eenheid op (zie appendix C, programmalisting).

De tijd t van de aldus gevonden theoretische absorptie per oppervlakte-eenheid versus tijd grafiek wordt dimensieloos gemaakt met behulp van de diffusiecoëfficiënt D^0 en de dikte d van het proefstuk.

De tijd t van de gekorrigeerde gemeten absorptie-grafiek wordt op overeenkomstige wijze dimensieloos gemaakt.

In beide grafieken is de absorptie per oppervlakte eenheid door de dikte van het proefstuk gedeeld zodat vertikaal de gemiddelde kubieke absorptie is uitgezet. Het resultaat is weergegeven in de grafieken 15 t/m 18.

Uit de grafieken 15 t/m 18 blijkt dat de theoretische kromme bepaalt met behulp van vgl. -25- op bevredigende wijze de absorptie en desorptie van een poreus materiaal in vocht-evenwicht na een stapvariatie in de relatieve vochtigheid kan beschrijven.

Voor baksteen zijn uit de eerste metingen direct na de r_v -stap geen waarden van D^0 en D^* bepaald uit de wortel- t - absorptie grafiek, omdat reeds vóór de eerste meting "reflectie" aan de achterwand optreedt zoals beschreven in hoofdstuk 2.7.

Tabel 5 Diffusiecoëfficiënten van kalkzandsteen.

stapvariatie	schijnbare diff. coëff. D^0 [m ² /s]	faktor $1+a_1^*$	diffusie coëfficiënt D^* [m ² /s]
30-50 % rv	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$	784	$1,2 \cdot 10^{-6}$
50-70 % rv	$(4,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-10}$	1612	$0,8 \cdot 10^{-6}$
70-50 % rv	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$	770	$1,2 \cdot 10^{-6}$
50-30 % rv	$(7,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$	786	$0,6 \cdot 10^{-6}$
litteratuur:			
		[20] 1)	$1,21 \cdot 10^{-6}$
		[1] 2)5)	$1,44 \cdot 10^{-6}$
		[1] 2)6)	$2,60 \cdot 10^{-6}$
		[1] 3)5)	$0,96 \cdot 10^{-6}$
		[1] 3)6)	$1,63 \cdot 10^{-6}$
		[1] 4)5)	$0,72 \cdot 10^{-6}$
		[1] 4)6)	$1,44 \cdot 10^{-6}$

1) $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, D^* is gemeten tussen 32 en 96 % rv bij 20 °C.

2) $\rho = 1635 \text{ kg/m}^3$

3) $\rho = 1760 \text{ kg/m}^3$

4) $\rho = 1920 \text{ kg/m}^3$

5) D^* is gemeten tussen 0 en 50 % rv

6) D^* is gemeten tussen 50 en 100 % rv

4 Energie-effekten van vochtabsorptie en desorptie.

4.1 Inleiding.

Zoals reeds in hoofdstuk 1 is opgemerkt komt bij absorptie van vocht in bouwmaterialen energie in de vorm van warmte vrij. Bij desorptie moet diezelfde energie toegevoerd worden. De warmte wordt dan onttrokken aan het materiaal, dat daardoor afkoelt.

Uiteindelijk zal de aan het bouw materiaal onttrokken of toegevoerde warmte uit de omgeving worden aangevoerd of aan de omgeving worden afgegeven.

In de inleiding (hoofdstuk 1) wordt al vermeld dat het energie-effect op de korte termijn (enkele uren - dag) en op de lange termijn van de seizoenen bestudeerd kan worden.

In het volgende zullen de verschillende aspecten die de grootte van het energie-effect bepalen dan ook aan de orde komen. Eerst worden de beschikbare literatuurgegevens van de adsorptie-energieën gepresenteerd (hoofdstuk 4.2) en de binnenshuis en buitenshuis optredende rv-veranderingen besproken (hoofdstuk 4.3). In hoofdstuk 4.4 wordt daarna een overzicht gegeven van enkele categorieën woonhuizen met bijbehorend energiegebruik voor ruimteverwarming, inhoud, oppervlak van muren enzovoort. Dan volgt een overzicht van enkele veelvuldig toegepaste materialen in woningen en hun eigenschappen die in dit kader relevant zijn (hoofdstuk 4.5). De veronderstellingen en de berekeningsmethode worden gepresenteerd in hfdst. 4.7. Tenslotte wordt een overzicht gepresenteerd van de berekende waarden van het energie-effect voor zowel de korte als de lange termijn (hoofdstuk 4.8).

4.2 Bindingsenergie van water aan bouwmaterialen.

Behalve de condensatie-energie van waterdamp bij de overgang naar water zal er, naargelang de reactie van het water met het materiaal exotherm dan wel endotherm is, een extra hoeveelheid energie vrijkomen (negatief in geval van een endotherme reactie): de bindingsenergie.

In de litteratuur vindt men dat deze bindingsenergie in het algemeen van ondergeschikt belang is ten opzichte van de condensatie-energie. Slechts bij zeer lage relatieve vochtigheden, als er nog sprake is van de opbouw van de monolaag, kan de bindingsenergie van dezelfde orde zijn als de condensatie-energie.

Litt. [20] geeft voor kalkzandsteen een bindingsenergie van 0,09 eV. Ter vergelijking kan dienen dat de energie die per watermolecuul vrijkomt bij de fase overgang van damp naar vloeistof ca. 0.45 eV bedraagt. Het totaal, 0.54 eV, is slechts 20% meer dan de condensatie-energie alléén. De condensatiewarmte is dus in het gebied van de hogere rv, zeg tussen 30 en 70%, van doorslaggevende betekenis.

Bij de opbouw van de monomoleculaire laag in kalkzandsteen komt per watermolecuul ongeveer 0,24 eV vrij bij de totstandkoming vaneen binding. De opbouw van de monomoleculaire laag in kalkzandsteen is voltooid bij 30% rv [20], en zal dus normalerwijze binnen gebouwen niet voorkomen in kalkzandsteen.

Als de sorptie-isothermen van de overige belangrijke bouwmaterialen bekeken worden is voor die materialen eveneens te verwachten dat de opbouw van de monomoleculaire laag bij 30% rv beëindigd is.

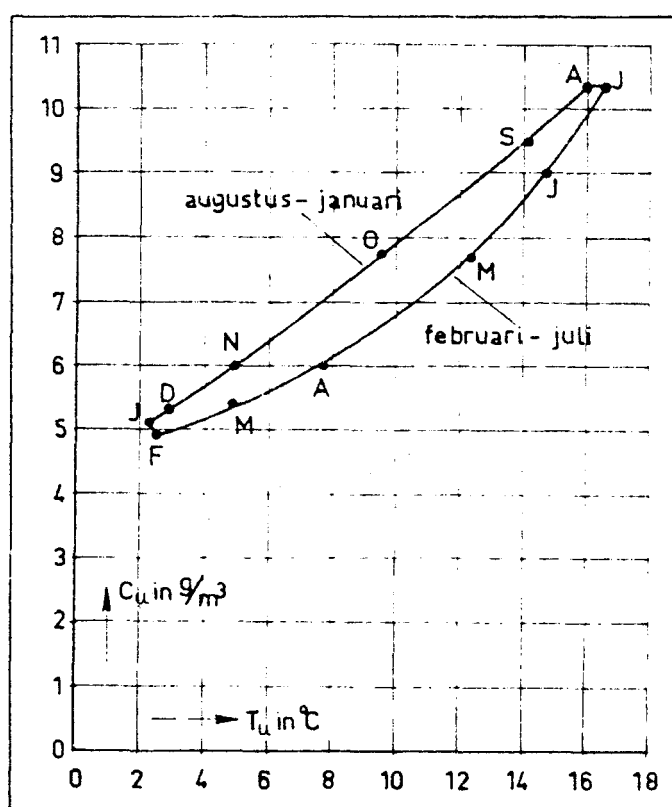
Voor gasbeton geeft Klopfer [1] als maximale waarde, bij de binding van watermoleculen (in vloeistoffase) aan gasbeton, per molecuul 0,13 eV voor de bindingsenergie.

De conclusie die uit deze gegevens getrokken kan worden is dat de vrijkomende energie bij absorptie van waterdamp in bouwmaterialen overwegend bepaald wordt door de condensatie-energie van waterdamp, voorzover de binding plaatsvindt bij niet al te lage waarden van de relatieve vochtigheid.

In het onderstaande zal gerekend worden met het vrijkomen van slechts de condensatiewarmte bij de absorptie van waterdamp. Dat is een benadering die aan de conservatieve kant is.

4.3 Relatieve vochtigheid binnen en buiten gebouwen.

De relatieve vochtigheid binnen gebouwen is behalve van de absolute vochtigheid buiten afhankelijk van het ventilatievoud, de vochtproduktie en de temperatuur. Gegevens van de absolute vochtigheid buiten kunnen verkregen worden uit waarnemingen van het K.N.M.I. te De Bilt. Onderstaande figuur toont hoe de absolute vochtigheid gedurende het jaar verloopt.



Figuur 12 Gemiddelde maandelijkse waterdampconcentratie C_u van de buitenlucht als functie van de gemiddelde maandelijkse buitentemperatuur T_u te De Bilt [9].

Het verschil in absolute vochtigheid binnen en buiten bedraagt gedurende de wintermaanden gemiddeld ca. 2 à 3 g/m³ [9]. Bij een binnentemperatuur van ca. 20 °C en absolute vochtigheid buiten van ca. 4 g/m³ betekent dan dat de rv gemiddeld ca. 35 % is.

's Zomers loopt de rv binnenshuis op tot ca. 70 % rv. Duitse literatuur [1] geeft gemiddelde waarden van 30 % voor de relatieve vochtigheid in de winter (jan. - febr.) en 70 % voor de zomer (juli - aug.) in woningen.

Extreem hoge waarden van de rv zoals die soms in keukens en badkamers kunnen voorkomen blijven hier buiten beschouwing.

De veranderingen van de rv binnenshuis op de korte termijn, zoals die gemeten zijn in het THE Zonnehuis, bleken bij uitzondering op één dag 10 rv % te bedragen. Een rv-stijging van 5 rv % per uur gedurende één uur wordt regelmatig 's ochtends en 's avonds (koken) gerealiseerd. De metingen zijn verricht in de periode 3-10-1977 t/m 16-3-1978.

De opmerking dat de ruimtes van het THE Zonnehuis in vrij open verbinding met elkaar staan is hier zeker op zijn plaats. Een zelf ontwikkeld model om de schommelingen van de rv te schatten gaf ook variaties van ca. 5 rv % per uur te zien. Bijzonderheden van dit model en de berekende resultaten zijn te vinden in appendix D.

Als de omstandigheden waardoor plotselinge rv-variaties optreden in ogenschouw worden genomen, dan kunnen dat zijn plotselinge weeromslagen of een piek in de vochtproduktie. Bij dit laatste kan opgemerkt worden dat de vochtproduktie meestal ook gepaart gaat met warmteproduktie (koken). De warmteproduktie heeft een temperatuurstijging tot gevolg die de aanvankelijke rv-stijging meestal deels teniet doet. Plotselinge weeromslagen zullen in het algemeen een belangrijke oorzaak zijn van plotselinge relatief grote rv-veranderingen.

Litt. [6] en [9] laten zien dat de rv binnenshuis minimaal is in de maanden januari - februari en maximaal in de maanden juli - augustus. In de tussenliggende periodes verandert de relatieve vochtigheid het snelst. Maar omdat de absorptie en desorptie pas plaatsvindt nadat de verandering in de rv heeft plaatsgevonden kan geconcludeert worden dat in het voorjaar een aanzienlijk deel van de absorptie plaatsvindt buiten het stookseizoen (eind september - half mei).

De desorptie-periode valt wel grotendeels in het stookseizoen.

De absorptie en desorptie liggen dus niet symmetrisch ten opzichte van het stookseizoen.

4.4 Standaardtypen woonhuizen.

Van Lierop [22] heeft een viertal typen woningen beschreven zoals die in de nabije toekomst gerealiseerd zouden kunnen worden.

Van Lierop gaat daarbij uit van zeer goed geïsoleerde woningen die een thermische aansluitwaarde hebben die ongeveer een derde bedraagt van het huidige gemiddelde woningbestand. De vier typen woningen die van Lierop beschrijft zijn achtervolgens

- a) Meergezinswoning (flattype)
- b) Eengezinswoning in een rij
- c) Halfvrijstaande eengezinswoning
- d) Vrijstaande eengezinswoning.

De gegevens van deze vier typen woningen wat betreft energiegebruik, inhoud en oppervlaktematen worden gepresenteerd in tabel 6.

De oppervlaktematen in tabel 6 zijn inclusief buitenramen, deuren en dergelijke.

De berekeningen van de bij absorptie of desorptie betrokken energie zal in het volgende gerelateerd worden aan de zeer goed geïsoleerde woningen zoals die door van Lierop [22] zijn beschreven.

Tabel 6 Gegevens van vier standaardtypen woonhuizen volgens [22]

Woningtype	meergezins- woning	eengezins- woning in een rij	halfvrij- staande eengezins- woning	vrijstaande eengezins- woning
Inhoud	194 m ³	359 m ³	384 m ³	497 m ³
Toekomstige aansluitwaarde voor ruimte- verwarming	4 kW	5,5 kW	6 kW	7,5 kW
Aantal vol- lasturen per jaar	1300 uur	1300 uur	1300 uur	1300 uur
Jaarlijks energiegebruik voor ruimte- verwarming (effektief)	5200 kWh (18,7 GJ)	7150 kWh (25,7 GJ)	7800 kWh (28,1 GJ)	9750 kWh (35,1 GJ)
Oppervlakte buitenwanden	37 m ²	63 m ²	182 m ²	236 m ²
Dakoppervlak	-	62 m ²	66 m ²	99 m ²
Gezamenlijke scheidings- wanden	53 m ²	124 m ²	62 m ²	-
Binnenwanden incl. deur(openingen)	69 m ² x2	96 m ² x2	97 m ² x2	140 m ² x2
Bebouwd grond- oppervlak *)	137 m ²	53 m ²	57 m ²	97 m ²

*) Dit is het oppervlak van alle vloeren van een verdieping dus ook het oppervlak van alle plafonds van een verdieping. De meergezinswoning heeft slechts een verdieping. De drie andere typen woningen hebben twee verdiepingen en een zolder.

4.5 Materialen en eigenschappen.

In deze sectie zullen een beperkt aantal materialen worden besproken, die in de bouw en woninginrichting veel worden toegepast.

De van belang zijnde eigenschappen m.n. de diffusiecoëfficiënt en de sorptie-isothermen zijn hierbij uitgangspunt voor de nadere berekeningen die zullen volgen.

In de volgende tabel (tabel 7) zijn voor de diverse materialen achtereenvolgens vermeld;

- het diffusieweerstandsgetal,
- de diffusiecoëfficiënt, D^*
- het opgenomen vocht tussen de 30 % en 70 % evenwichtsvochtgehaltes
- de faktor $1 + a_1^*$ (zie vgl. -31-)
- de schijnbare diffusiecoëfficiënt, D^0
- bronvermelding

Als slechts een beperkt aantal van deze gegevens voorhanden was zijn de ontbrekende berekend, voor zover mogelijk.

Omdat het onduidelijk is of gietbeton als beton van goede of slechte kwaliteit gekenschetst moet worden zijn in de tabel beide soorten vermeld en worden de verdere berekeningen voor beide soorten gemaakt.

Tabel 7 Diffuso-fysische gegevens van diverse bouwmaterialen.

Materiaal	μ [-]	D^* [m^2s^{-1}]	Op te nemen vochthoeveelheid tussen het 30 % en 70 % rv evenwichtsvochtgehalte		$1+a_1^*$ [-] (6)	D^0 [m^2s^{-1}]	Bron
			vol. %	gew. %			
Beton 1)	$\mu_{0-50} = 400$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	4	2	5800	$1,1 \cdot 10^{-11}$	[1]
" 1)	$\mu_{50-100} = 20$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4	2	"	$2,2 \cdot 10^{-10}$	[1]
" 2)	$\mu_{0-50} = 20$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4	2	"	$2,2 \cdot 10^{-10}$	[1]
" 2)	$\mu_{50-100} = 5$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	4	2	"	$9,0 \cdot 10^{-10}$	[1]
"						$2 \cdot 10^{-11}$	[25]
Baksteen 3)	$\mu_{0-50} = 56$	$4,6 \cdot 10^{-7}$				$3,9 \cdot 10^{-9}$	[1]
" 3)	$\mu_{50-100} = 54$	$4,8 \cdot 10^{-7}$				$4,1 \cdot 10^{-9}$	[1]
" 4)	$\mu_{0-50} = 6$	$4,3 \cdot 10^{-6}$				$3,7 \cdot 10^{-8}$	[1]
" 4)	$\mu_{50-100} = 4$	$6,5 \cdot 10^{-6}$				$5,6 \cdot 10^{-8}$	[1]
			0,08	0,05	117		[*] 5)
Kalkzand-							
steen 7)	$\mu_{0-50} = 18$	$1,4 \cdot 10^{-6}$			1600	$8,8 \cdot 10^{-10}$	[1]
" 7)	$\mu_{50-100} = 10$	$2,6 \cdot 10^{-6}$			"	$1,6 \cdot 10^{-9}$	[1]
" 8)	$\mu_{0-50} = 27$	$0,9 \cdot 10^{-6}$			"	$5,6 \cdot 10^{-10}$	[1]
" 8)	$\mu_{50-100} = 16$	$1,6 \cdot 10^{-6}$			"	$1,0 \cdot 10^{-9}$	[1]
" 9)	$\mu_{0-50} = 36$	$0,7 \cdot 10^{-6}$			"	$4,3 \cdot 10^{-10}$	[1]
" 9)	$\mu_{50-100} = 18$	$1,4 \cdot 10^{-6}$			"	$8,8 \cdot 10^{-10}$	[1]
"			1,1	0,6		$1,5 \cdot 10^{-9}$	$4,7 \cdot 10^{-10}$ [*]
"		$1,21 \cdot 10^{-6}$	0,0	0,5	1302	$9,3 \cdot 10^{-10}$	[20]

Vervolg tabel 7

Materiaal	μ [-]	$D^* [m^2 s^{-1}]$	Op te nemen vochthoeveelheid tussen het 30 % en 70 % rv evenwichtsvochtgehalte		$1 + a_1^* [-]$ (6)	$D^0 [m^2 s^{-1}]$	Bron
			vol. %	gew. %			
Gasbeton	$\mu_{0-50} = 6$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	1,2	2	1700	$2,5 \cdot 10^{-9}$	[1]
"	$\mu_{50-100} = 4$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	1,2	2	1700	$3,7 \cdot 10^{-9}$	[1]
Beuk	$\mu_{0-50} = 200$						[1]
"	$\mu_{50-100} = 50$						[1]
"			3,3	6,5			[16]
Eik-beuk- den-grenen- spar	50	$5,2 \cdot 10^{-7}$					[26]
"	50	$5,2 \cdot 10^{-7}$	3	6	4300	$1,2 \cdot 10^{-10}$	[1] [26]
Macoré	30	$8,7 \cdot 10^{-7}$	2,3		3300	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[28]
Verven en kunststoffen	$10^2 - 2 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^{-7} - 1,3 \cdot 10^{-10}$					[1]

Vervolg tabel 7

Materiaal	$D^* [m^2 s^{-1}]$	Op te nemen vochthoeveelheid tussen het 40 % en 80 % rv evenwichtsvochtgehalte		Tijdsduur tot vochtevenwicht bereikt is.	Bron
		vol. %	gew. %		
Behang 11)		6,0 g/m ²	10)	ca. 1,5 uur	[28]
" 12)		4,4 g/m ²	10)	ca. 1,5 uur	[28]
" 13)		3,2 g/m ²	10)	ca. 1,5 uur	[28]
Gipskartonplaat		37 g/m ² in 3 uur	10)	> 5 uur	[29]
Vloerkleden 14)		60 g/m ² in 3 uur	10)	> 5 uur	[29]
Houtvezelplaat		78 g/m ² in 3 uur	10)	> 5 uur	[29]

- | | |
|---|--|
| 1) beton van goede kwaliteit | 11) zware kwaliteit |
| 2) beton van slechte kwaliteit | 12) middelzware kwaliteit |
| 3) $\rho = 2175 \text{ kg/m}^3$ | 13) lichte kwaliteit |
| 4) $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$ | 14) ca. 2 kg/m ² uit haargaren,
sisal of kokosvezels |
| 5) [*] bron: eigen metingen | |
| 6) berekend bij 20 °C | |
| 7) $\rho = 1635 \text{ kg/m}^3$ | |
| 8) $\rho = 1760 \text{ kg/m}^3$ | |
| 9) $\rho = 1920 \text{ kg/m}^3$ | |
| 10) opgenomen vocht na een rv-stap
van 40 % naar 80 % rv | |

4.6 Modelbeschrijving en berekeningsmethode.

In het vochtabsorptie-model dat de grondslag vormt voor de berekening van het energie-effekt zijn ter vereenvoudiging enkele veronderstellingen gemaakt die nu puntsgewijs de revue passeren.

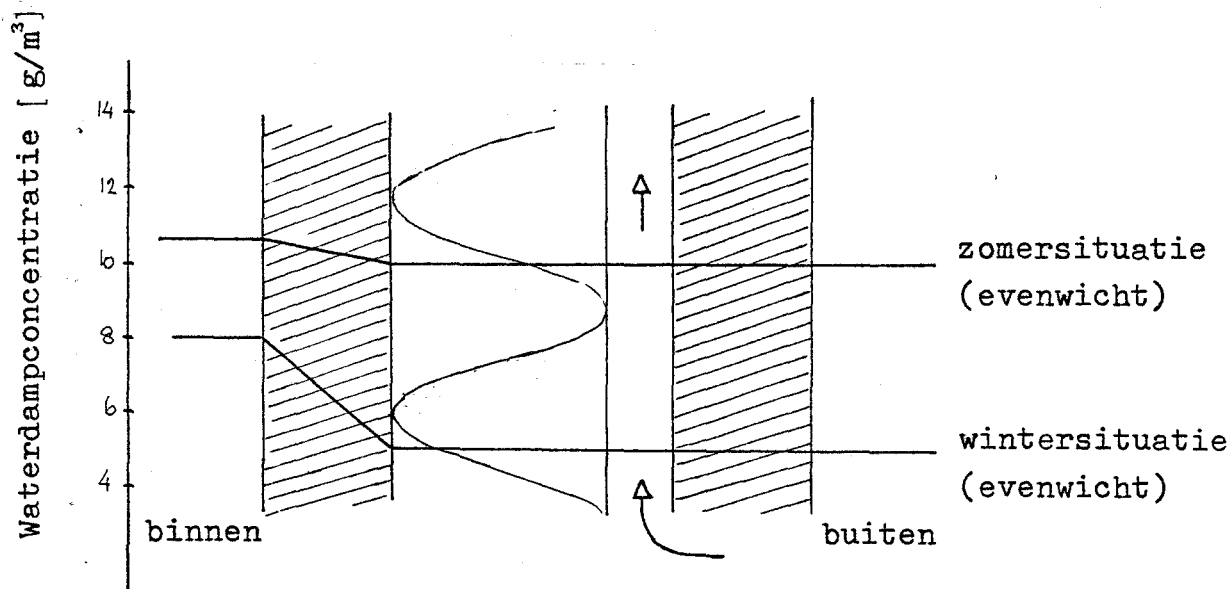
- Het absorberende materiaal bevindt zich in een vochtevenwichtssituatie voordat een variatie in de rv van de omgevende lucht wordt aangebracht.
- De rv verandering wordt opgevat als een stapvariatie of eventueel als een aantal stapvariatiën na elkaar.
De lange termijn rv-variantie wordt verondersteld harmonisch te zijn. De berekeningen voor de lange termijn absorptie gaan uit van een rv-verandering in stappen die de harmonische rv verandering benaderen (grafiek 19).
In de berekeningen bedraagt de lange termijn rv-variantie uiteindelijk 40 rv % (30 % - 70 % rv), de korte termijn rv variantie bedraagt 5 rv %.
- Het vochttransport van binnen naar buiten tengevolge van het absolute dampdrukverschil tussen binnen en buiten kan opgevat worden als een verschijnsel dat gesuperponeerd kan worden op de dynamische diffusieprocessen.
- De wanden zijn 10 cm dik en worden tweezijdig gepenetreert.
- De vrijkomende energie bij de binding van een waterdampmolecuul is gelijk aan de condensatie-energie.
- De woning is zeer goed geïsoleerd zodat de temperatuur van het binnenblad gelijk is aan de binnentemperatuur. De vrijkomende energie komt geheel ten goede aan het inwendige van de woning.
- De woning is in principe open d.w.z. er heerst overal dezelfde temperatuur en vochtigheid.
De penetratie van de binnenmuur is daarom symmetrisch t.o.v. het midden van de muur.
- De regeling van de verwarming houdt de temperatuur constant.
- De sorptie-isotherm is lineair tussen 30 % en 70 % rv.

De berekening van het concentratieprofiel vindt plaats met behulp van vergelijking -25-.

De dubbelzijdige absorptie aan een muur van 10 cm komt overeen met de gespiegelde situatie van eenzijdige absorptie aan een muur van 5 cm dikte met een voor vocht ondoordringbare achterwand.

Het programma dat gelist is in appendix C berekend voor deze condities het percentage van de totale absorptie dat na de stapvariatie in de rv is gerealiseerd. Vermenigvuldiging van het percentage van de totale absorptie met de maximale vochttoename dat bij de stapvariatie gerealiseerd kan worden (volgt uit de sorptie-isotherm) levert de hoeveelheid opgenomen damp in grammen per oppervlakte-eenheid.

Voor het binnenblad van de spouwmuur is de berekeningsmethode op deze wijze strikt genomen niet juist omdat de absorptie niet symmetrisch is ten opzichte van het midden van het binnenspouwblad. In de spouw is de absolute vochtigheid lager dan binnen zoals voor een zomer en wintersituatie in vochtevenwicht te zien is voor een spouwmuurconstructie in fig. 13.



Figuur 13 Schematische weergave van de waterdampconcentratie van een spouwmuurconstructie in vochtevenwicht in de zomer en in de winter.

De temperatuur van het binnenspouwblad zal zowel in de zomer als in de winter op een temperatuur van ca. 20 °C gehandhaafd blijven. De rv sprong tussen winter en zomer is zoals af te leiden is uit figuur 13 aan de spouwzijde zelfs groter dan aan de binnenzijde van de woning.

In de berekeningen van de dynamische vochtabsorptie van het binnenspouwblad is echter deze muur opgevat als een binnenmuur die tweezijdig, symmetrisch ten opzichte van het midden van de muur, met waterdamp wordt gepenetreerd. De afwijking ten opzichte van de werkelijkheid lijkt niet al te groot te zijn door deze benadering.

De materialen baksteen en kalkzandsteen komen in konstrukties vrijwel uitsluitend voor in gemetseld verband. Circa 80 % van de totale muur bestaat dan uit baksteen of kalkzandsteen. De overige 20 % van het volume wordt ingenomen door het materiaal in de voegen. De diffusie-eigenschappen van de mortels die in de voegen gebruikt worden komen overeen met die van beton.

In de berekeningen van het energie-effekt op de korte als lange termijn is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van voegen in de baksteen of kalkzandsteen muren. M.a.w. de berekeningen zijn uitgevoerd voor muren die voor 100 % uit hetzelfde materiaal bestaan.

Ook de aanwezigheid van sierpeisters is terwille van de eenvoud niet in de berekening meegenomen.

4.7.1 Warmte-effekt op de korte termijn.

Voor de korte termijn is de absorptie-responsie op een stapvariatie van 5 rv % voor enkele materialen in de grafieken 19 t/m 22 weergegeven.

Het blijkt dat vrijwel alle hier beschouwde materialen sterk absorberen. De absorptie in het eerste uur na de stapvariatie van de rv varieerde voor baksteen, hout en kalkzandsteen tussen 3 en 6 gram per m². Voor beton is zelfs een absorptie van maximaal 20 gram per m² per uur in het eerste uur na de rv-stap mogelijk.

In de volgende voorbeeldberekening van de vochtabsorptie in een eengezinswoning in een rij [22] na een rv-stap van 5 rv % wordt een indicatie gegeven van de grootte van het energie-effekt dat op de korte termijn bij absorptie van waterdamp

optreedt.

De keuze van de materialen is enigszins arbitrair maar ge-
tracht is een doorsnee huis in beeld te brengen.

Absorberend materiaal	Absorptie in 5 uur	Energie-effekt over 5 uur
110 m ² buitenwand beton		
124 m ² scheidingswand beton		
<u>106 m² vloer beton</u>		
340 m ² beton	2,75-22,75 g/m ² 935 - 7735 g	2,3·10 ⁶ -19,0·10 ⁶ J 0,6-5,3 kWh
106 m ² vloerhout 2 cm dik	6,2 g/m ² 657 g	1,6·10 ⁶ J 0,4 kWh
192 m ² binnenwand kalkzand- steen	4,3-6,6 g/m ² 826 - 1267 g	2,0·10 ⁶ -3,1·10 ⁶ J 0,6-0,9 kWh
62 m ² dakbeschot houtwol- cementplaat	12 g/m ² 744 g	1,8·10 ⁶ J 0,5 kWh
40 m ² tapijt van natuur- vezels	9 g/m ² 360 g	0,9·10 ⁶ J 0,25 kWh
totaal in 5 uur		8,6·10 ⁶ -26,4·10 ⁶ J of 2,4-7,3 kWh

Het energie-effekt van een stap in de rv van 5 % blijkt over de eerste vijf uren na de stap overeen te komen met een vermogen van gemiddeld 0,5 à 1,5 kW. Gerelateerd aan de aansluitwaarde voor ruimteverwarming bedraagt het energie-effekt dus 9 à 27 %; gerelateerd aan de momentane warmtebehoefte kan het percentage gemakkelijk het dubbele bedragen, in het bijzonder bij zacht weer.

Voor zover de rv-variatie in werkelijkheid niet stapvormig is, zal het percentage in werkelijkheid kleiner zijn. De mate waarin is afhankelijk van de snelheid waarmee de rv dan toeneemt.

Er kan nog opgemerkt worden dat behang op een muur de grootte van de absorptie vrijwel niet beïnvloedt (litt. [28]).

Wel kan de aanwezigheid van een pleisterlaag op de muren het geschetste beeld beïnvloeden.

4.7.2 Warmte-effekt op de lange termijn.

Als de vochtabsorptie na een rv-stap van 30 % naar 70 % op de lange termijn bekeken wordt (grafiek 23), kan geconcludeerd worden dat voor de hier beschouwde materialen (uitgezonderd beton en kalkzandsteen) het evenwichtsvochtgehalte binnen een maand bereikt wordt.

De langzame schommelingen in de relatieve vochtigheid kunnen deze materialen vrijwel geheel volgen. Er bestaat dan instantaan bijna vochtevenwicht.

Voor kalkzandsteen en beton is de responsie op de seizoensvariatie in de rv nader berekend.

De rv variatie is benaderd door een aantal naeenvolgende stapvariaties zoals aangegeven in grafiek 19.

Het blijkt dan dat in een kalkzandsteenmuur van 10 cm dik, die tweezijdig gepenetreerd wordt, tussen 95,2 en 99,9 % van de evenwichtsvochtgehalteverandering gerealiseerd wordt, afhankelijk van de diffusiecoëfficiënt D^0 (zie grafiek 24).

Voor beton variëren deze percentages van 22,2 tot 99,2 % afhankelijk van de soort beton. (grafiek 25).

Er volgt nu een berekening van de energie die door dampabsorptie gedurende een halfjaar (voorjaar) vrijkomt in een eengezinswoning in een rij [22].

Absorberend materiaal	Absorptie per half jaar	Energie-effekt per half jaar
55 m ² binnenspouwblad beton 10 cm dik		
124 m ² scheidingswand beton 5 cm eff.		
<u>53 m² vloer beton 10 cm</u>		
totaal 17,0 m ³ beton	151 - 675 kg	370·10 ⁶ - 1654·10 ⁶ J 103 - 459 kWh
106 m ² plafondhout 2 cm 2,1 m ³ hout	64 kg	157·10 ⁶ J 44 kWh
96 m ² kalkzandsteen 10 cm 9,6 m ³ k.z.st.	106 kg	260·10 ⁶ J 72 kWh
overige posten verwaarloosbaar		
<hr/>		
totaal per half jaar		787·10 ⁶ - 2071·10 ⁶ J of 219 - 575 kWh

De energie die tengevolge de waterdampabsorptie vrijkomt bedraagt 6% - 16 % van het halfjaarlijks energiegebruik voor ruimteverwarming van een zeer goed geïsoleerde (toekomstige) woning. Hiervan komt ongeveer de helft vrij tijdens het stookseizoen, tot half mei, zie grafiek 24 en grafiek 25.

5 Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.

Conclusies.

1 Er is een theorie ontwikkeld waarin de diffusievergelijking met bron- of put-termen vereenvoudigd kan worden tot een gewone diffusievergelijking door aanpassing van de diffusiecoëfficiënt.

Deze theorie wordt bevestigd door de resultaten van experimenten aan kalkzandsteen waaraan de instationaire absorptie en desorptie gemeten is.

2 Berekeningen aan een model van een doorsnee woning tonen aan dat het energie-effekt dat optreedt tengevolge van condensatie van waterdamp in de konstruktie overeenkomt met een gemiddeld vermogen van 0,5 tot 1,5 kW gedurende de eerste vijf uren na een plotselinge verandering in de relatieve vochtigheid van 5 % (binnenshuis).

3 Op de lange termijn van de seizoenen bedraagt het energie-effekt tengevolge van condensatie van waterdamp in de konstruktie-materialen 6 tot 16 % van het halfjaarlijks energiegebruik (voor ruimteverwarming) in een zeer goed geïsoleerde woning.

4 Het energie-effekt tengevolge van de waterdampabsorptie en desorptie is wellicht mede-oorzaak van de discrepantie van de resultaten van rekenmodellen die het energiegebruik in woningen berekenen en het gemeten energiegebruik.

Nader onderzoek kan leiden tot een vermindering van het verschil tussen de gemeten en berekende waarden.

5 In sommige situaties zou de behaaglijkheid binnen gebouwen waarschijnlijk kunnen toenemen indien de regelstrategie van de (centrale) stookinrichting behalve op de buitentemperatuur ook op de gradiënt van de absolute vochtigheid in de atmosfeer geregeld zou worden.

Aanbevelingen voor verder onderzoek.

1 Aan te bevelen is nog enkele aanvullende absorptie en/of desorptiemetingen te doen aan andere materialen dan kalkzandsteen.

Daarbij is het van belang speciale aandacht te besteden aan de relatieve vochtigheids metingen direkt na de stapvariatie in de relatieve vochtigheid. Dit om de korrektiefactoren voor de retardatietijd van de klimaatkast exakter te kunnen bepalen.

Van de te onderzoeken monsters zouden in ieder geval met een statische methode de diffusiecoëfficiënten bepaald moeten worden om de theorie verder te ondersteunen.

2 De theorie van absorptie van waterdamp in konstrukties bestaande uit meerdere lagen verschillend materiaal zou verder uitgebouwd kunnen worden.

3 Om de grootte van het energie-effekt, dat optreedt bij condensatie van waterdamp in gietbeton, scherper te kunnen afschatten is het van belang de diffusiecoëfficiënt van gietbeton beter te leren kennen.

4 Aan te bevelen is verdere berekeningen uit te voeren met betrekking tot het netto energieverlies tengevolge van de verschuiving in de tijd tussen het energie-effekt tengevolge van absorptie en het stookseizoen.

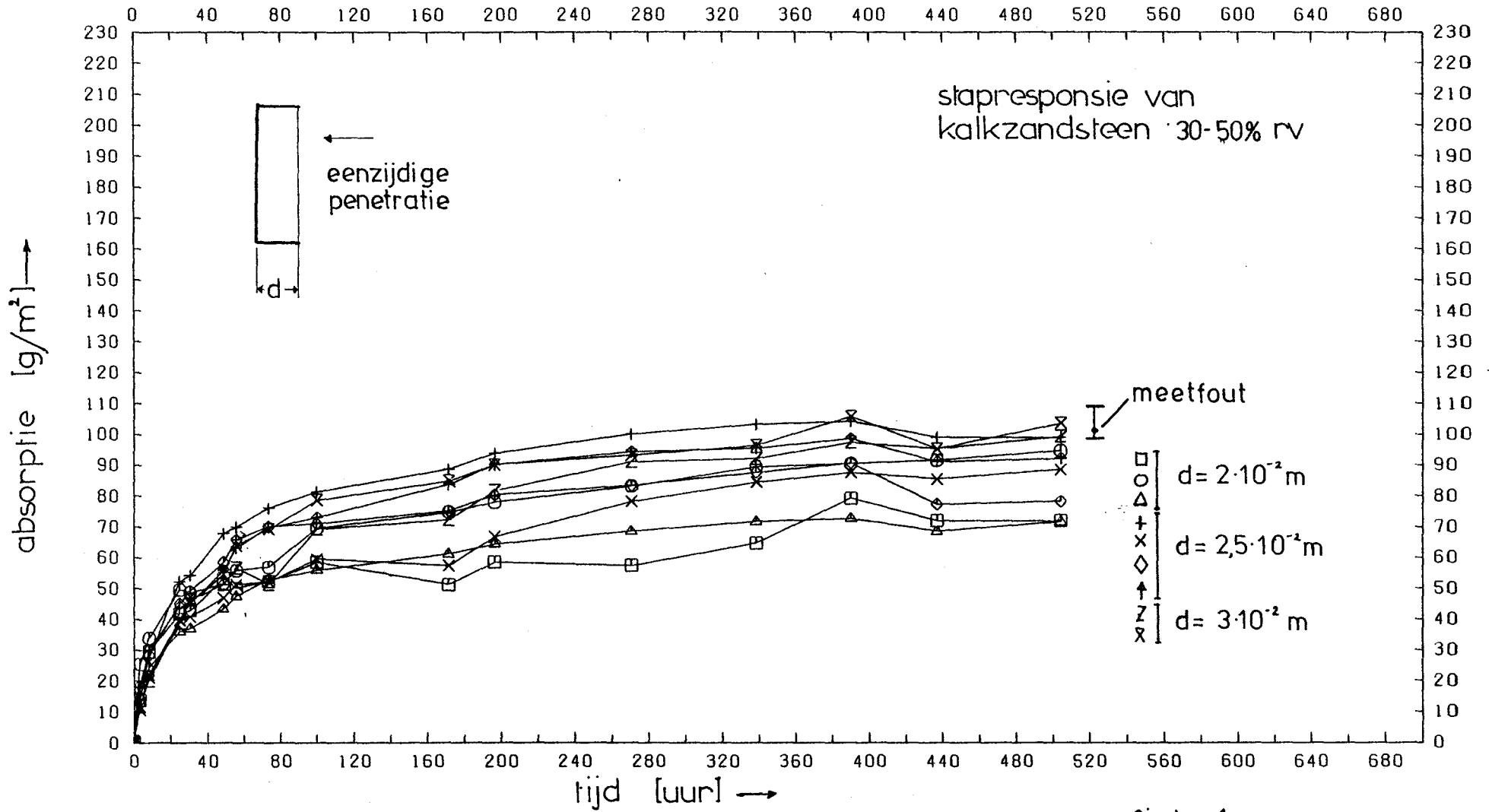
Litteratuur

- 1 Klopfer, H.
Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen und Beschichtungen.
Bauverlag GMBH, Wiesbaden, 1974.
- 2 Brunauer, Deming, Deming en Teller.
On a theorie of the van der Waals adsorption of gases.
J. Am. Chem. Soc., July 1940, pag. 1723-1732.
- 3 Brunauer, Emmett en Teller.
Adsorption of gases in multimolecular layers.
J. Am. Chem. Soc., Feb. 1938, pag. 309-319.
- 4 Vos B.H.
Vochttransport in en droging van bouwmaterialen, fundamentele grondslagen.
Stichting Bouwresearch no 21.
- 5 Schirmer, R.
Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft Gemischen.
Zeitschrift V.D.I., Verfahrenstechnik no 6, 1938, pag 170 e.v.
- 6 Kooi, J. van der.
Moisture transport in cellular concrete roofs.
Proefschrift Technische Hogeschool Eindhoven, mei 1971.
- 7 Vries, D.A. de en Kruger, A.J.
On the value of the difusioncoëfficiënt of watervapour in air, Phénomènes de transport avec changement de phase dans les milieux au colloïdaux.
Paris, 1966.
- 8 Ley, P.J.M. de.
Handboek voor de praktische isolatietechniek.
Lapinus Rotterdam, 19 ..
- 9 Kooi, J. van der en Knorr, K.Th.
De temperatuur en vochtigheid in woningen.
Diktaat no 7770 THE, vocht in bouwkonstrukties, aug. 1979:

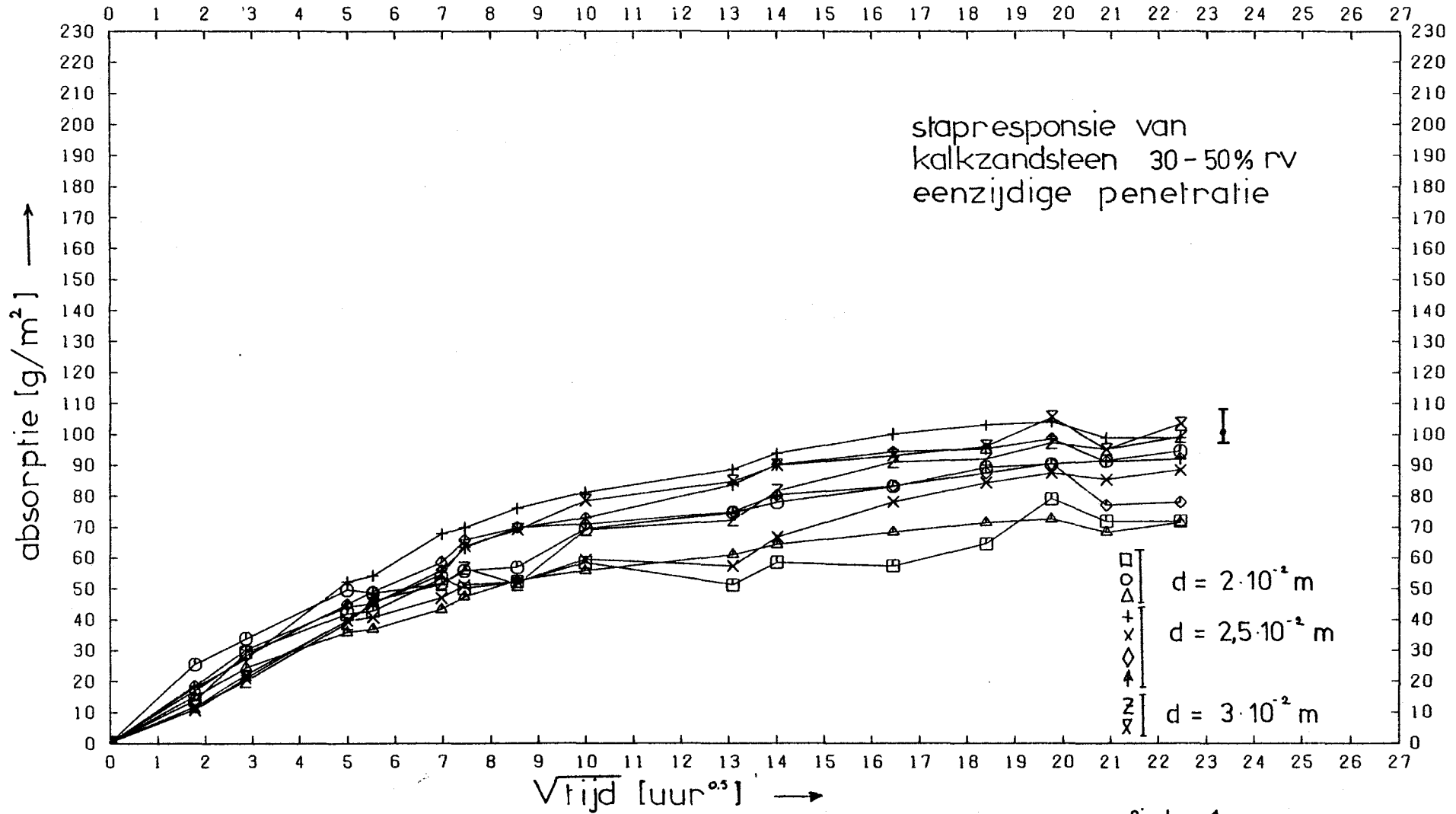
- 10 Vissers, L.
Een studie over het warmtegebruik van een woning.
I-1 opdracht afd. W, THE, 1979.
- 11 Vos, B.H.
Vochtaccumulatie van wandafwerkingen.
Instituut T.N.O. voor bouwmaterialen en bouwkonstrukties
IBBC.
Rapport no Xl, sept 1966.
- 12 Vries, D.A. de.
Het warmtegeleidingsvermogen van grond.
Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen no 52,
pag. 1-73, 1952.
- 13 Vries, D.A. de,
Een mathematisch-fysische behandeling van het transport
van warmte en vocht in poreuze media.
De Ingenieur, vol. 0, pag. 45-53, 1962.
- 14 Taha, A.
Der einfluss von Druck und Temperatur auf den Diffusions-
coefficient von Dampf-Gas gemischen.
Fortschritt Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 3,
Nr. 34, VDI Verlag, 1970.
- 15 Künzel, H. en Snatzke, C.
Die Feuchtigkeitsabsorption der Innenoberflächen von
Beton- und Kunststoffwänden.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 51, Berlin 1968.
- 16 Vos, B.H. en Tammes, E.
Moisture and moisture transfer in porous materials.
Instituut T.N.O. voor bouwmaterialen en bouwkonstrukties
IBBC.
Rapport no. 69-96, 1969.
- 17 Tammes, E. en Vos, E.A.
Warmte en vochttransport in bouwkonstrukties.
Kluwer Deventer, 1980.

- 18 Boucher, E.A.
Porous materials structure, properties and capillary phenomena.
Journal of Materials science vol. 11, pag. 1734-1750, 1976.
- 19 Haferland, Fr.
Das wärme, diffusions und schalltechnisches Verhalten von Beton Auszenwänden.
Betonfertigteilforum 111, Betonstein Zeitung, 1971.
- 20 Dekker, W.
Sorptie van water aan kalkzandsteen.
Afstudeerverslag THE, Eindhoven, juni 1967.
- 21 Gradshteyn, F.S. en Ryzhik, I.M.
Table of integral series and products.
Academic Press, London, 1965.
- 22 Lierop, W. van.
De energievoorziening van een toekomstige woonwijk.
Afstudeerverslag THE, Eindhoven, augustus 1980.
- 23 Bird, R.B., Stewart, W.E. en Lightfoot, E.N.
Transport phenomena.
J. Wiley & Sons inc., New York, jan. 1965.
- 24 Verster, N.F.
Thermische verschijnselen.
Diktaat THE, no. 3315, Eindhoven 1974.
- 25 Pihlajavaara, S.E.
On the main features and methods of investigation of drying and related phenomena in concrete.
Julkaisu 100 publication, University of Helsinki, 1965.
- 26 Künzel, H.
Der Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Ergebnisse von Diffusionsmessungen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 80, Berlin 1973.

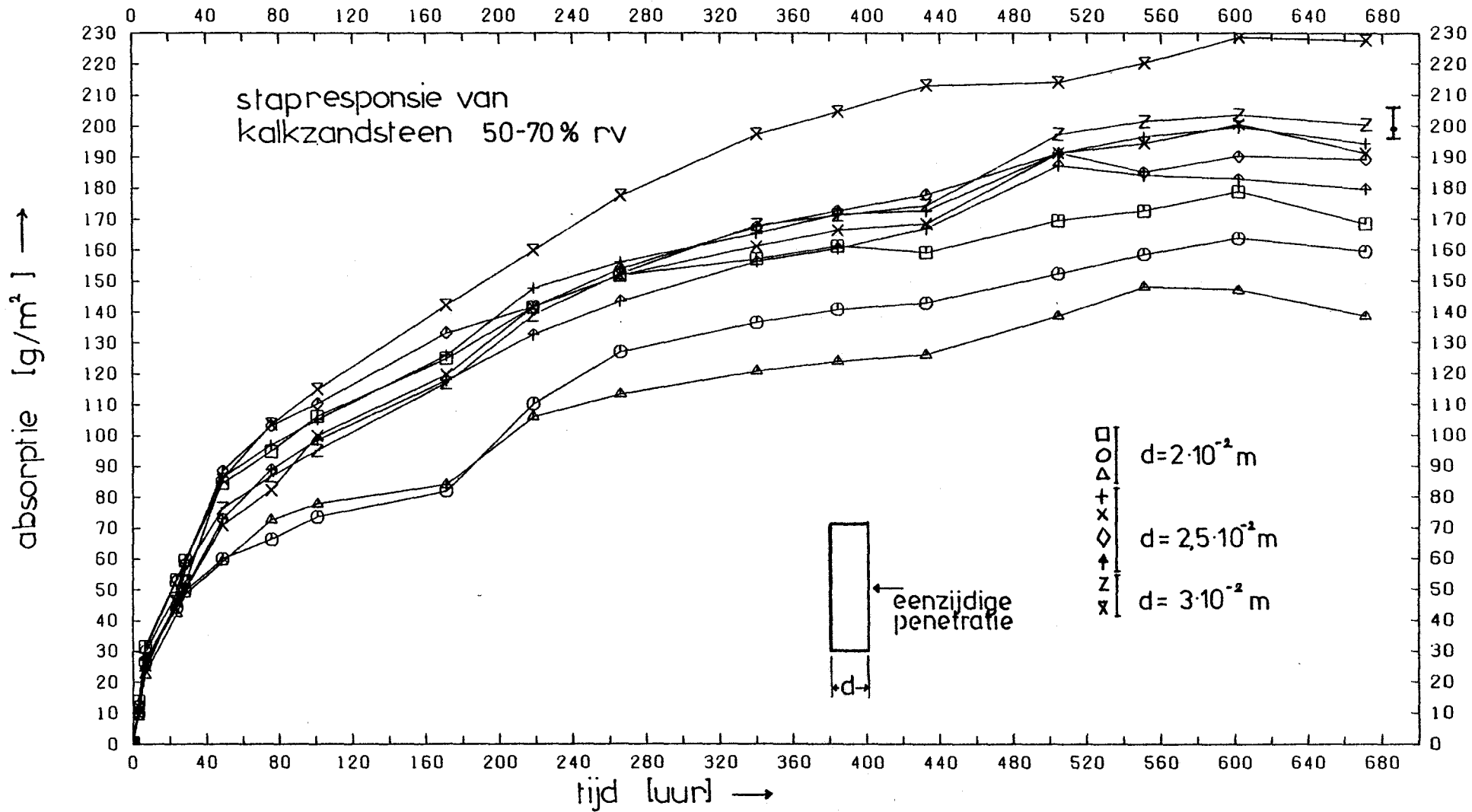
- 27 Vos, B.H. en Horst, J.F. van der.
De hygrische funktie van pleisterlagen.
Instituut T.N.O. voor bouwmaterialen en bouwkonstrukties
IBBC.
rapport no. BX-8, oktober 1970.
- 28 Künzel, H.
Auswirkung mangelender Feuchtigkeitsabsorption in Räumen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 79, Berlin 1972.
- 29 Williams, W.E.
Fourier series and boundary-value problems.
George Allan & Unwin LTD, London, 1973.



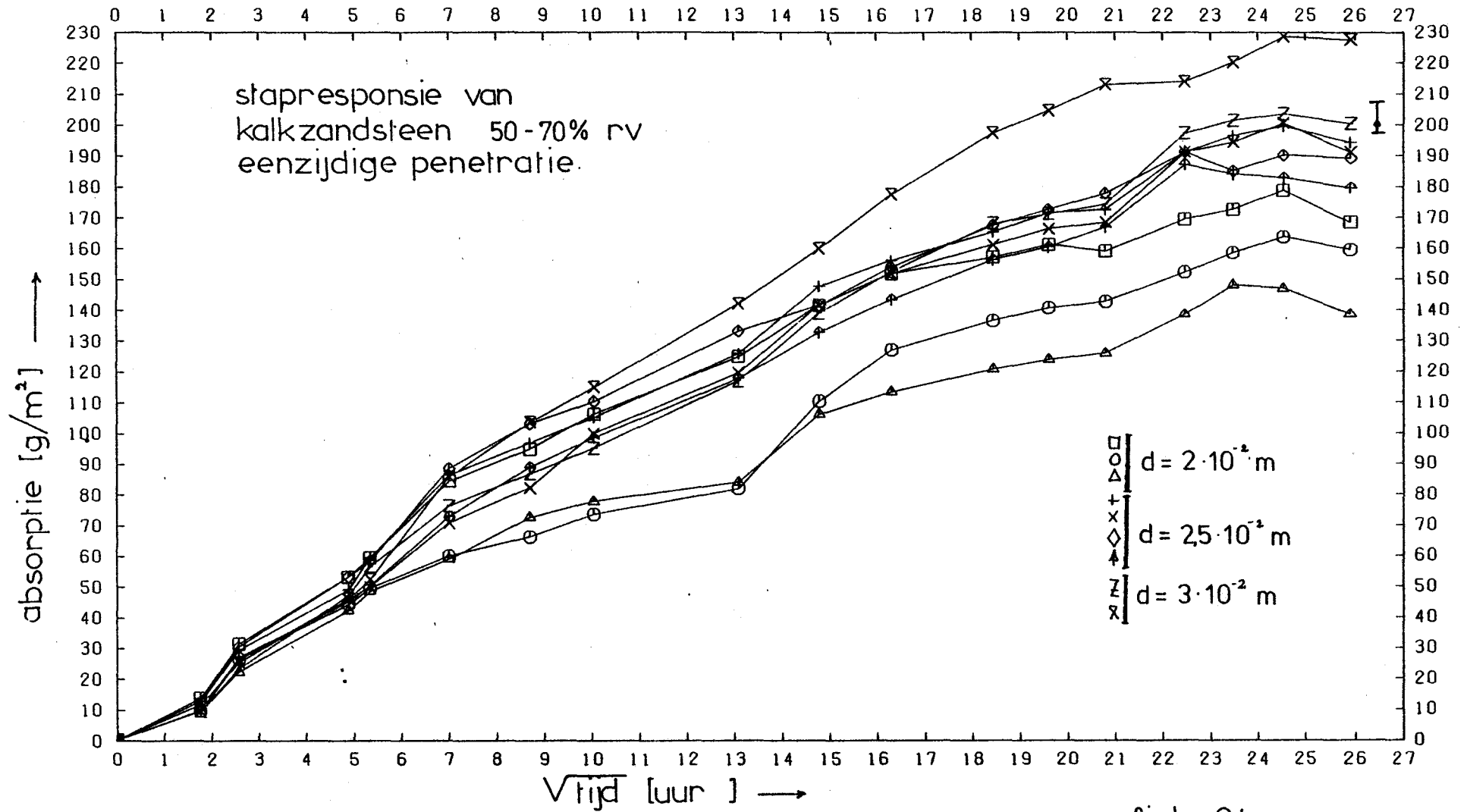
grafiek 1a



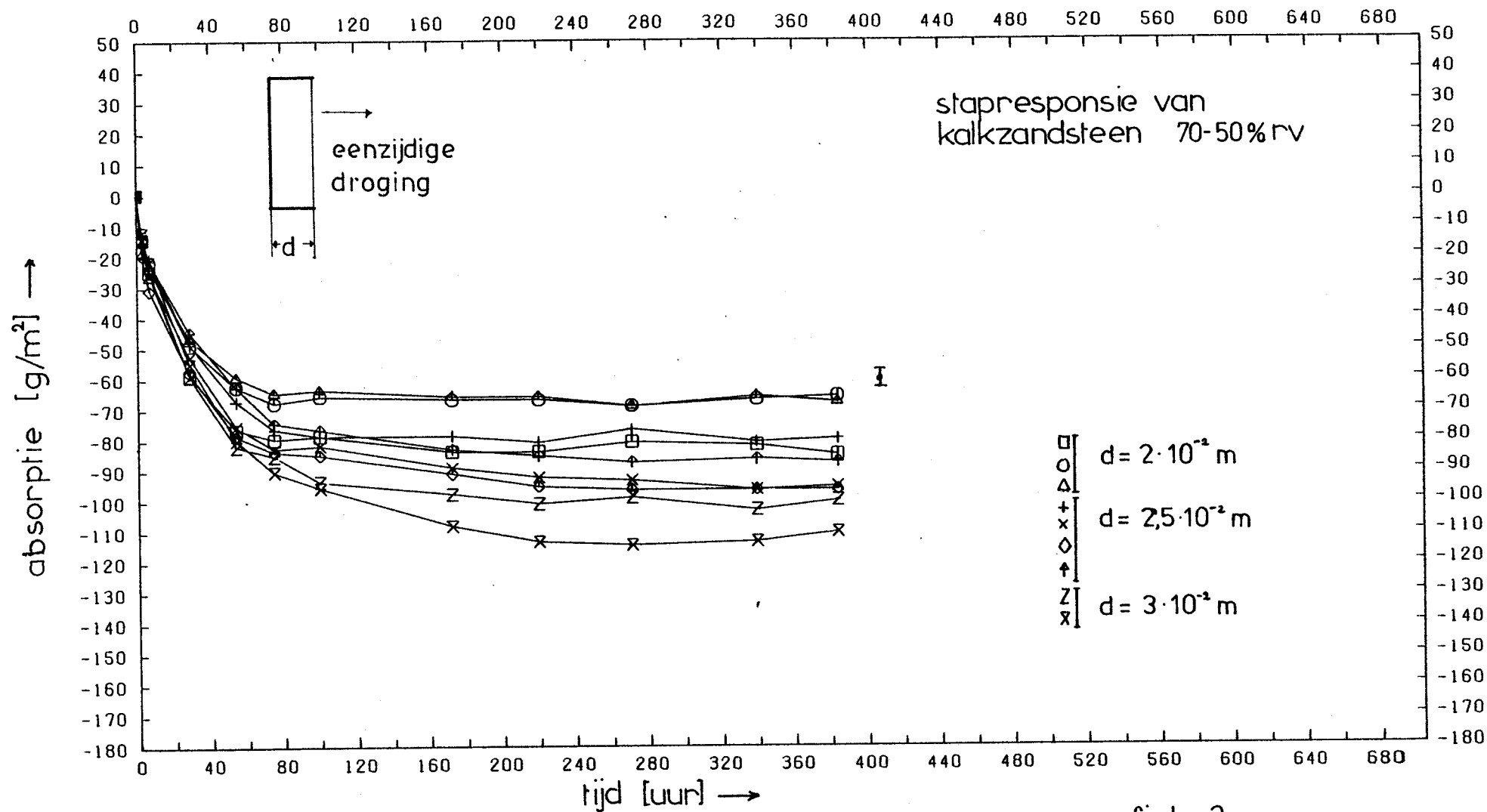
grafiek 1b



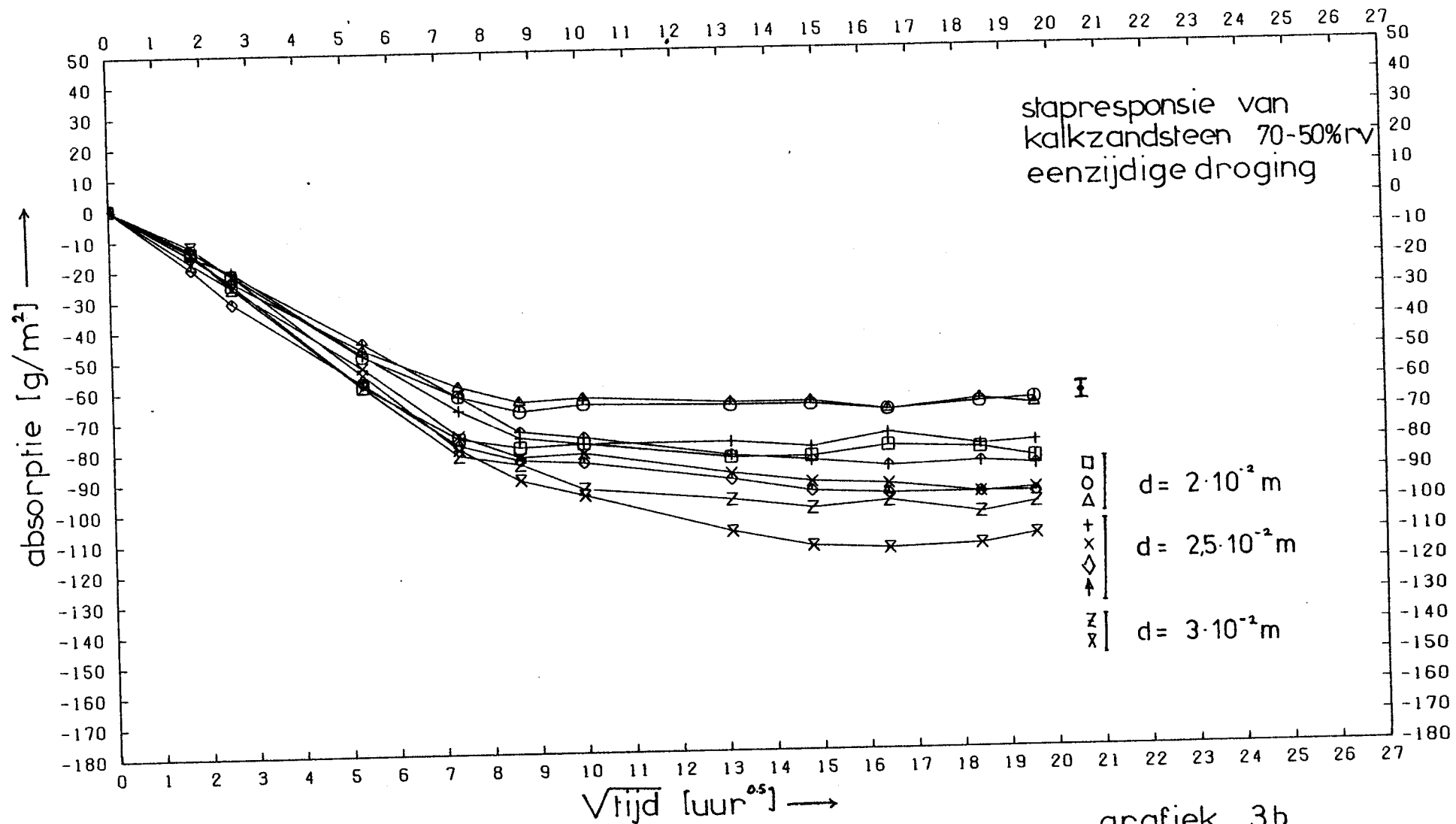
grafiek 2a

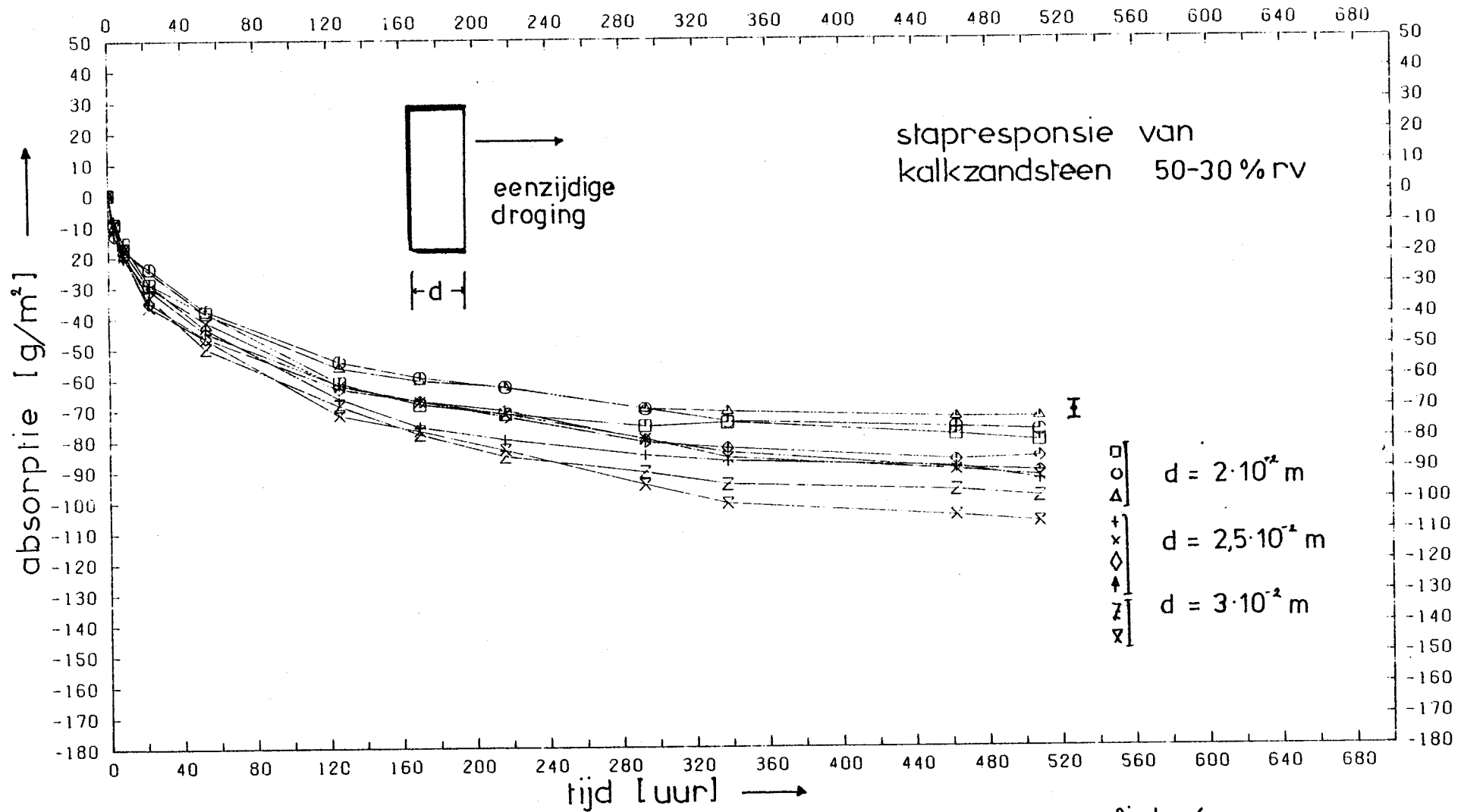


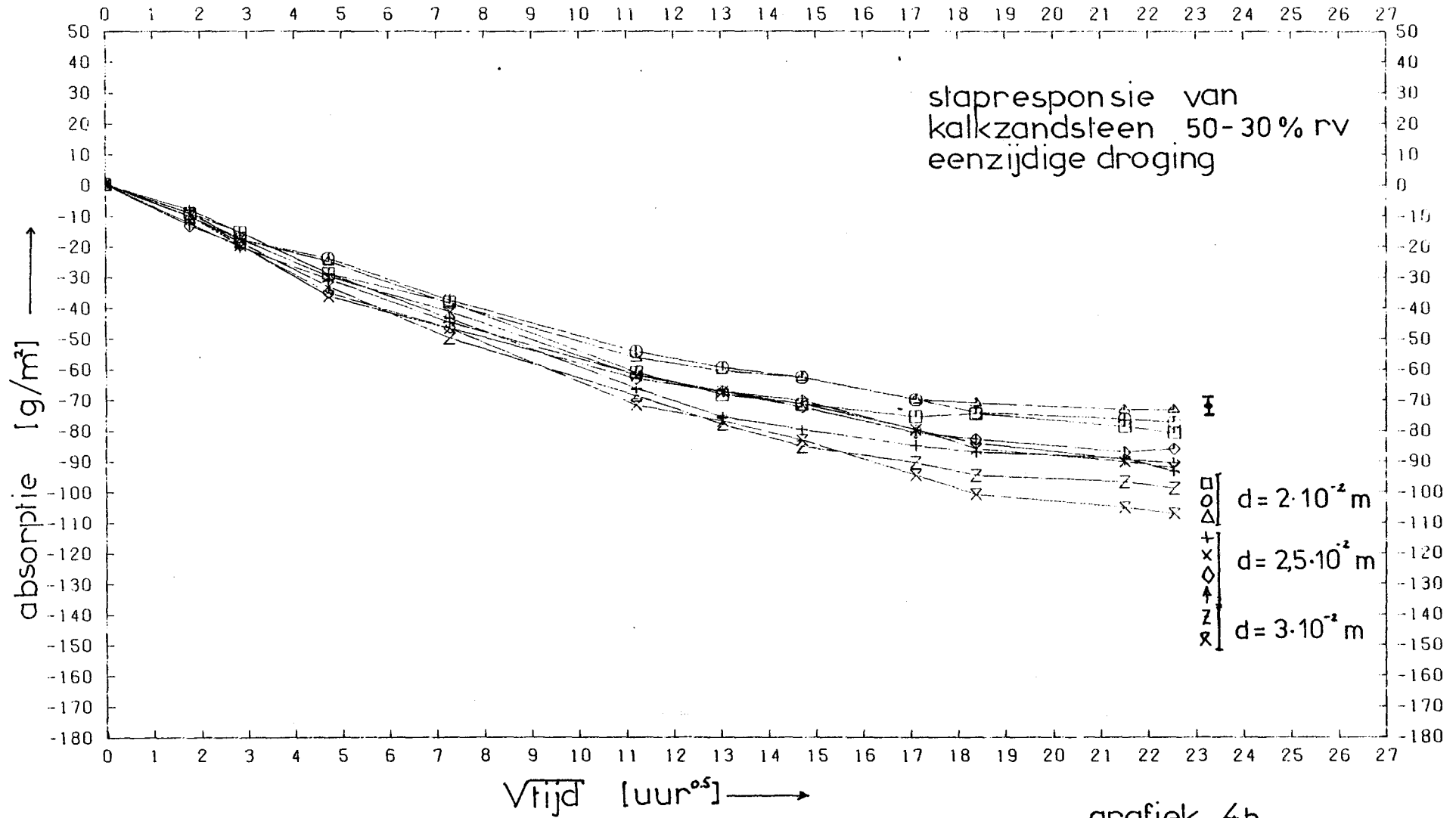
grafiek 2b



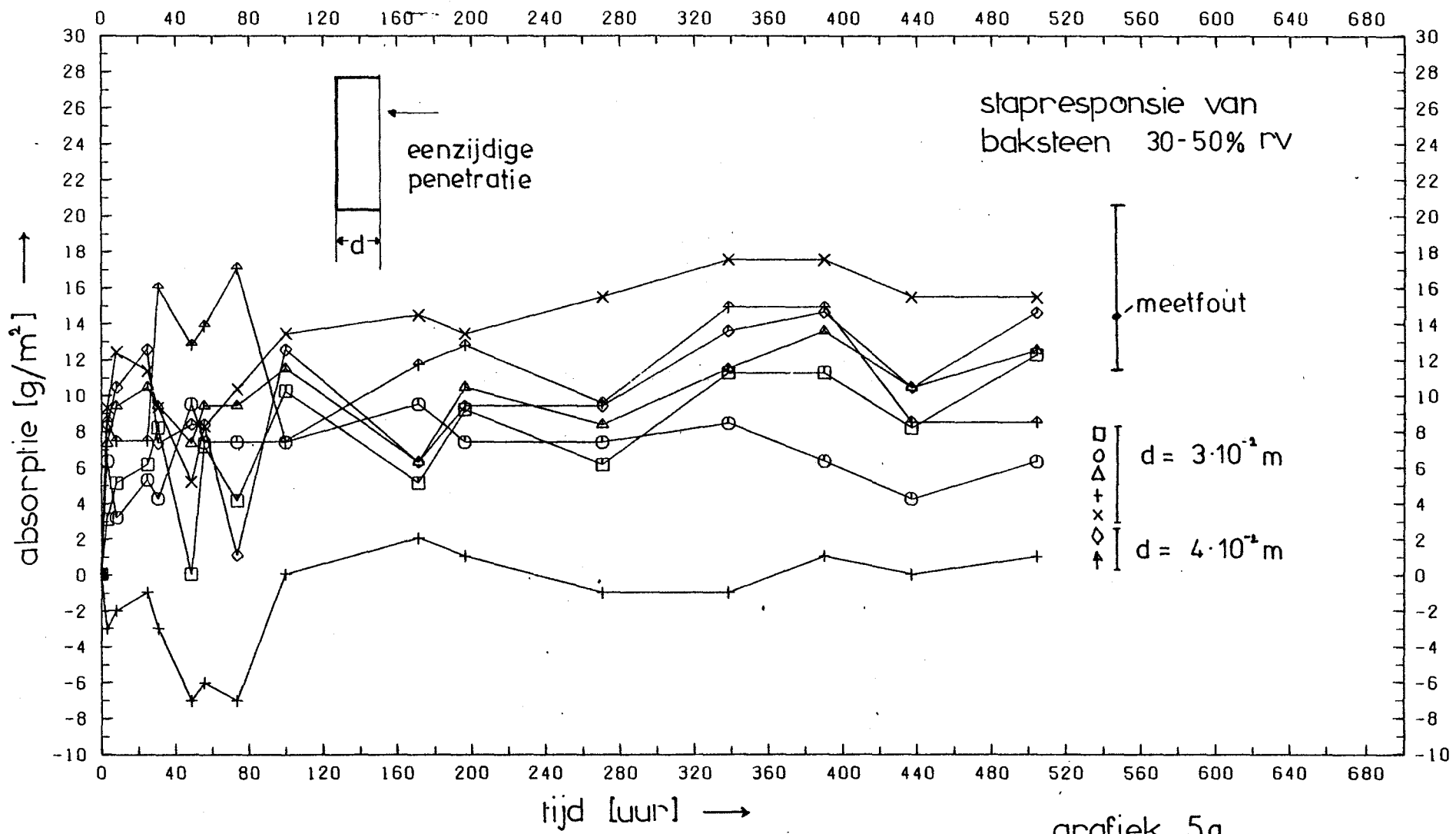
grafiek 3a



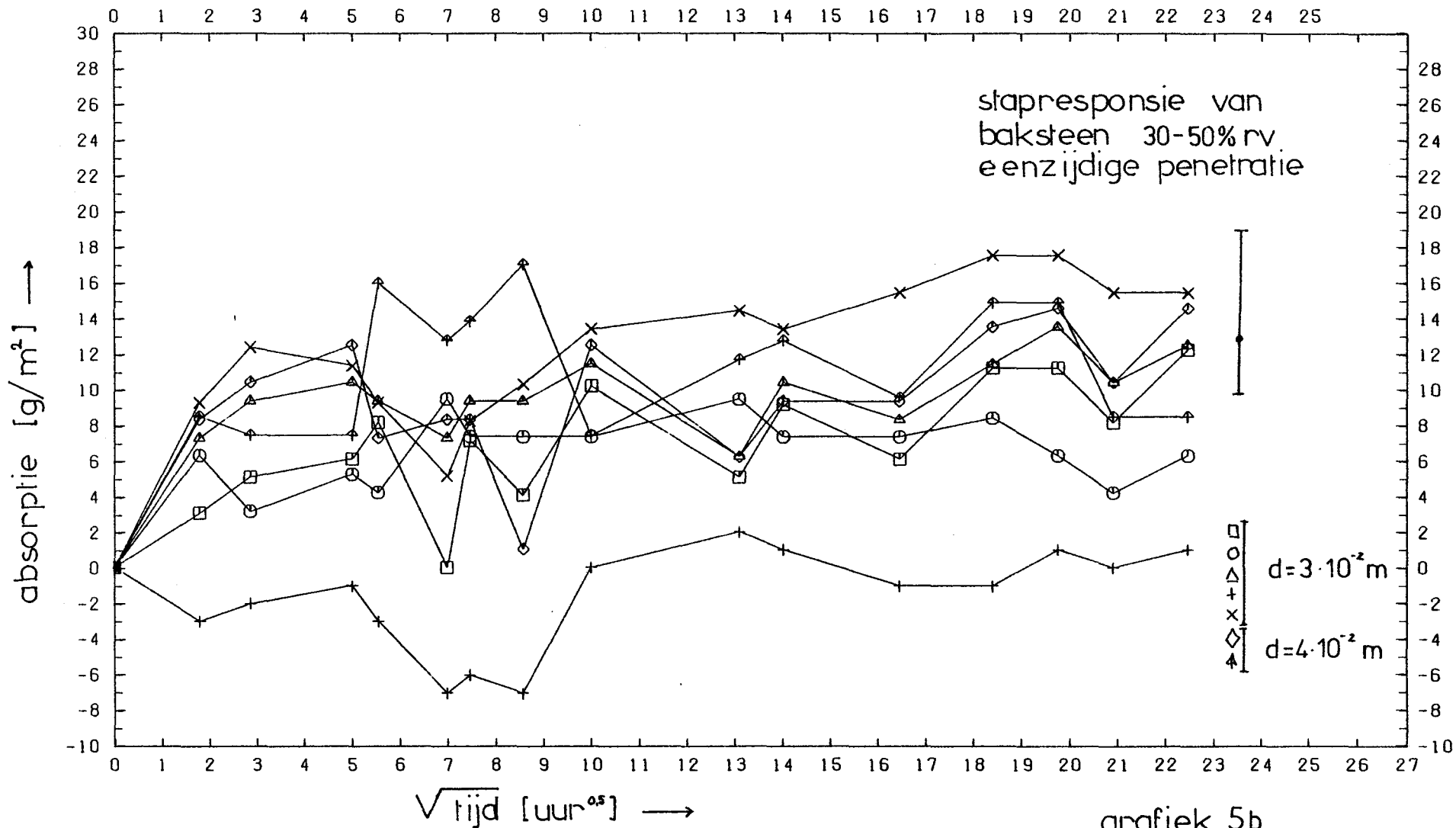


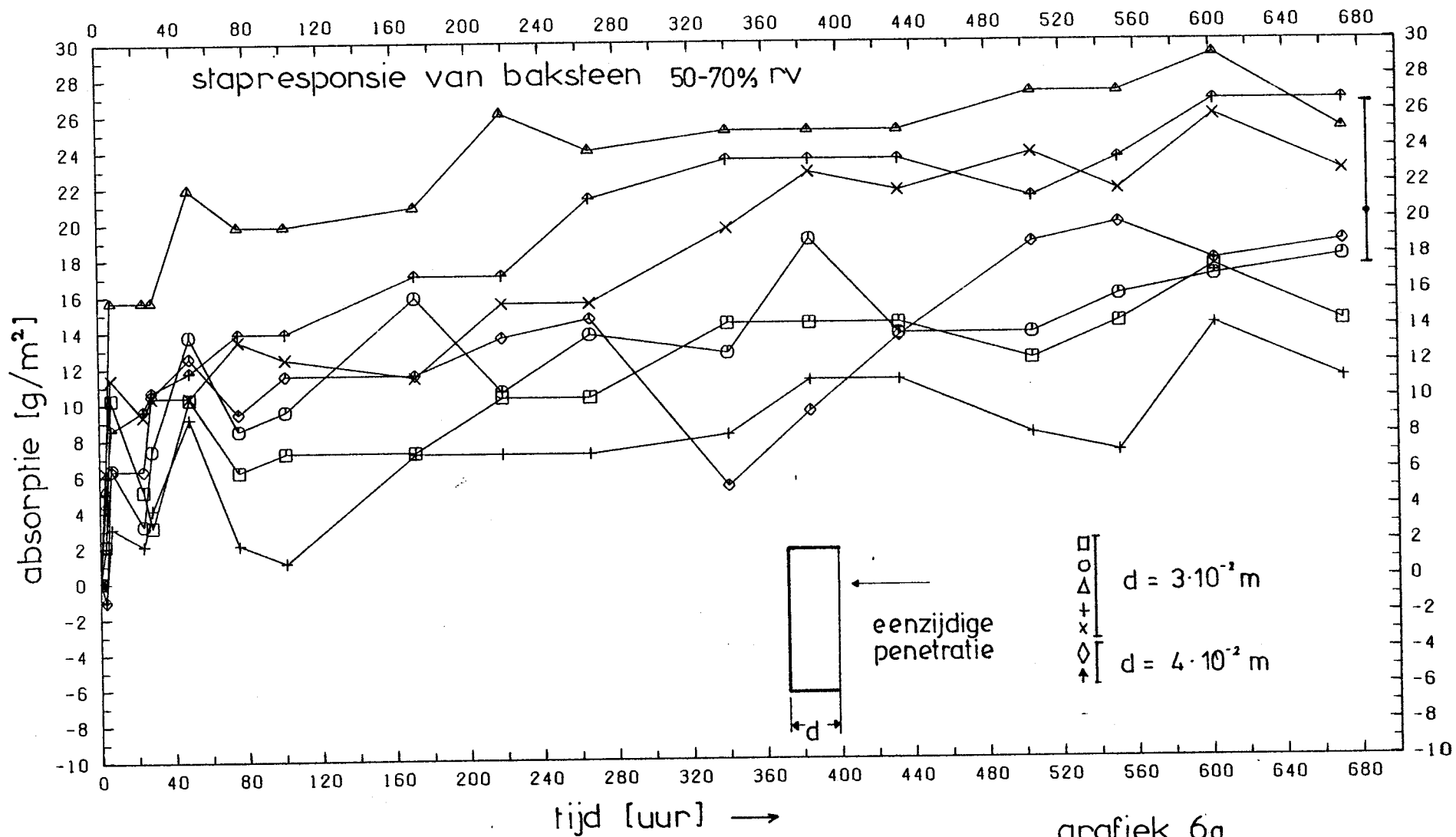


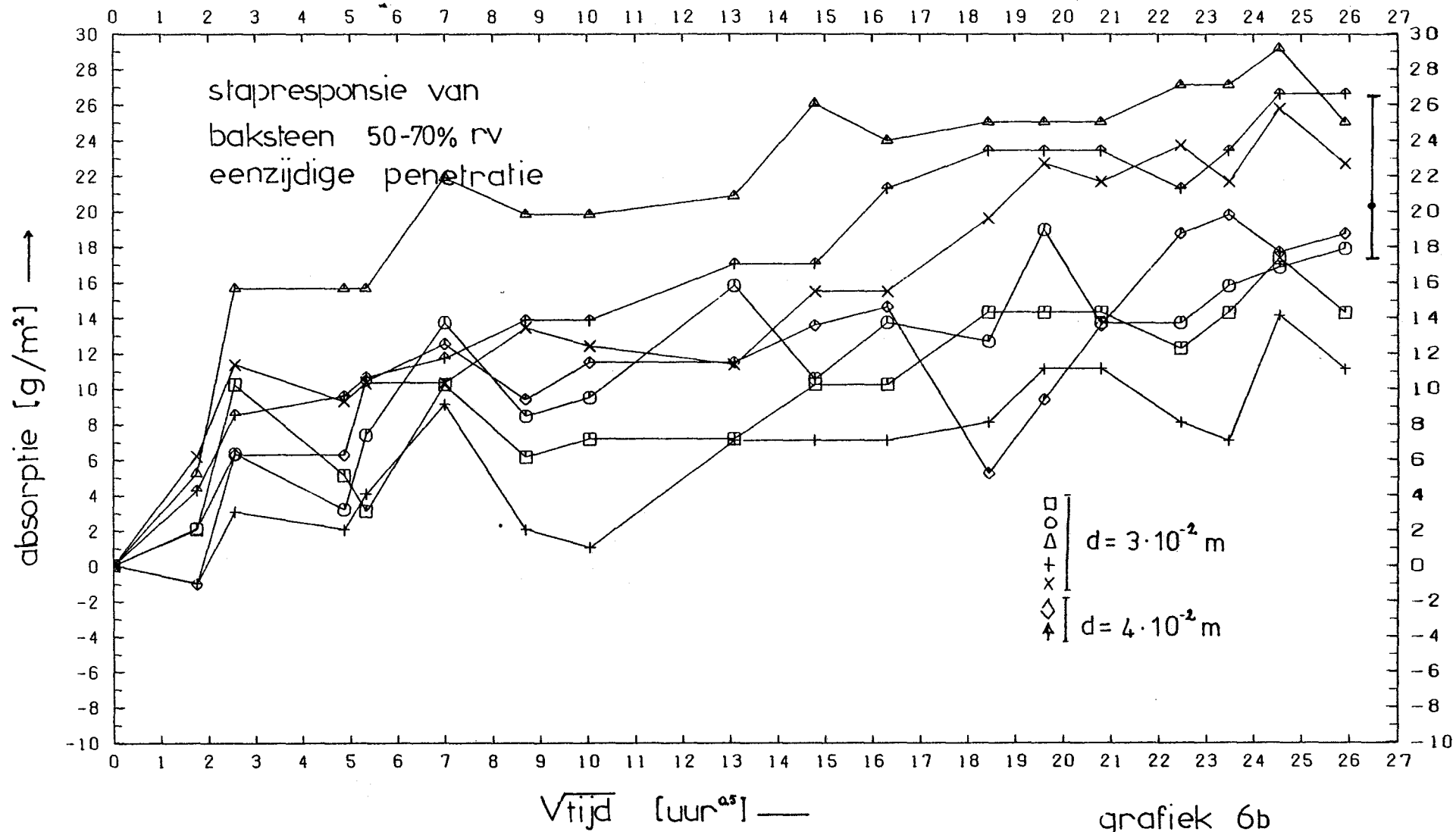
grafiek 4b

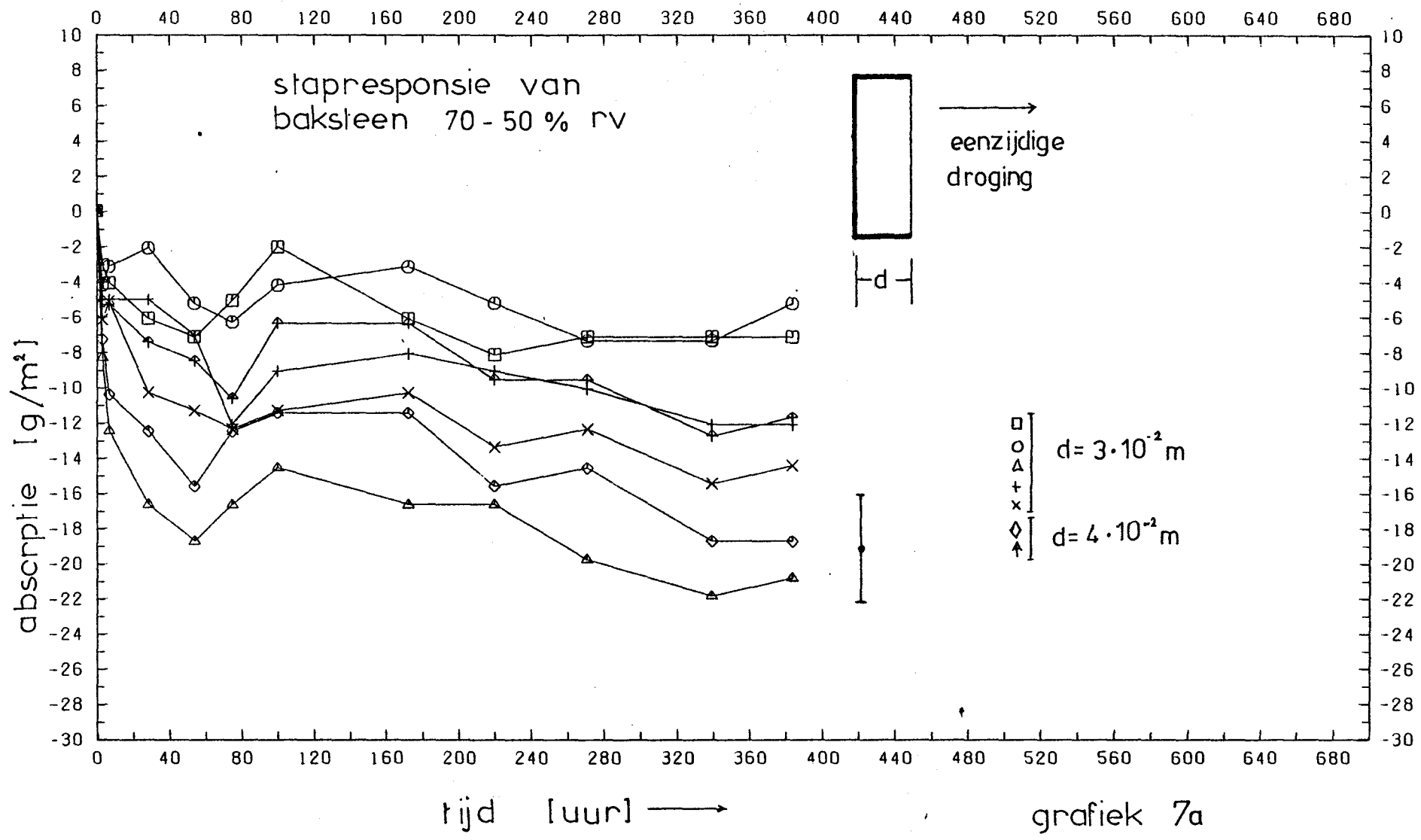


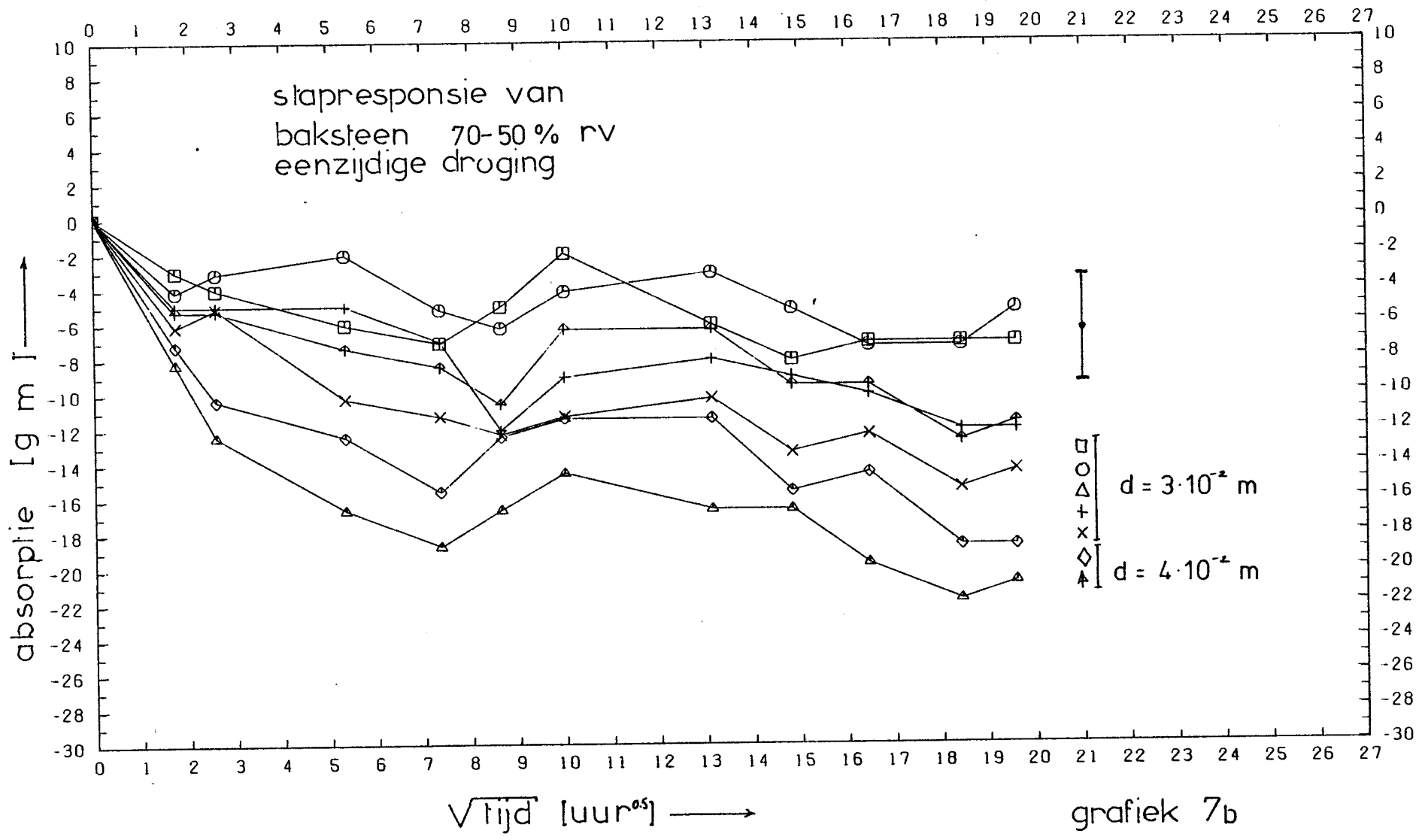
grafiek 5a

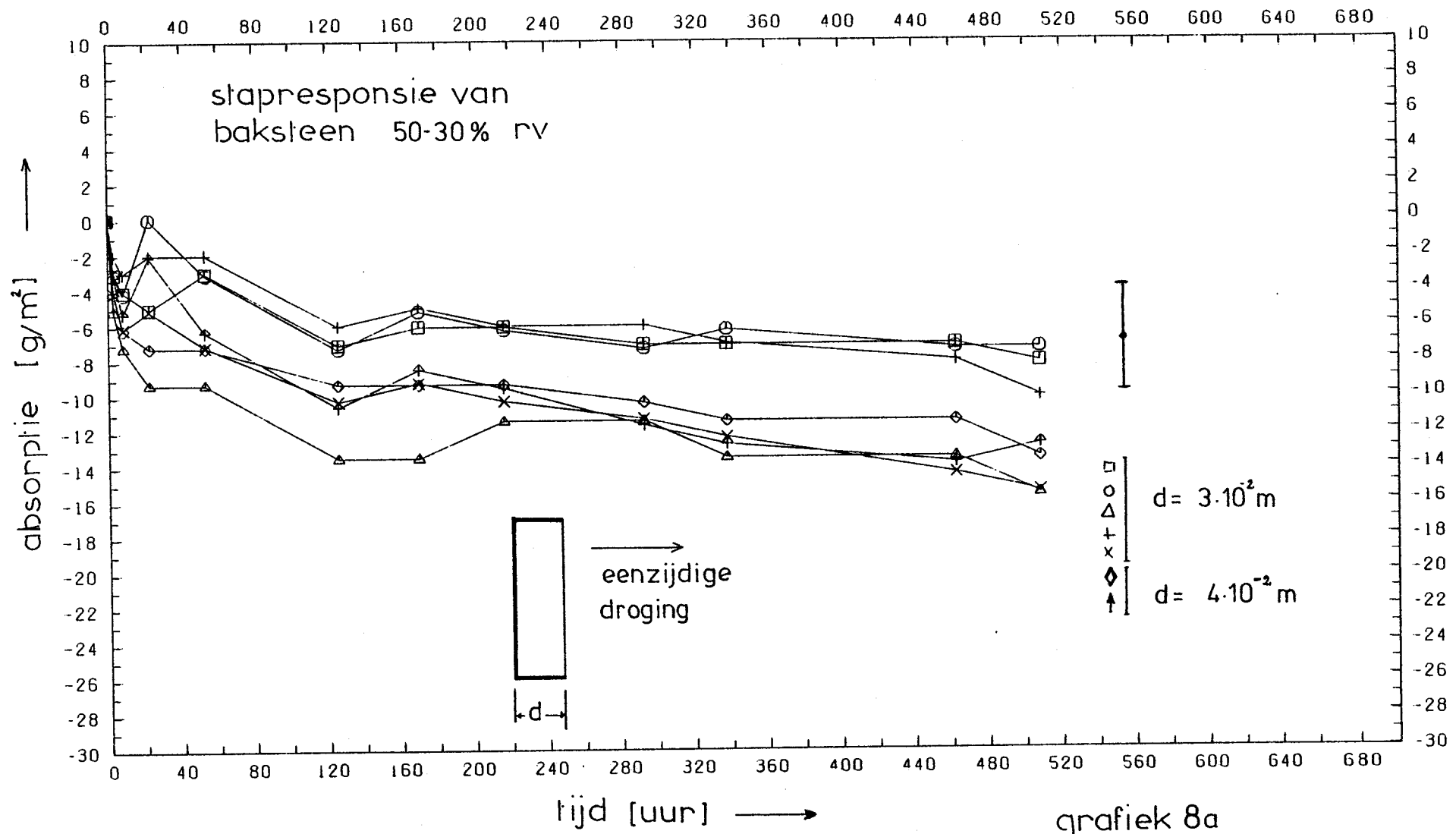




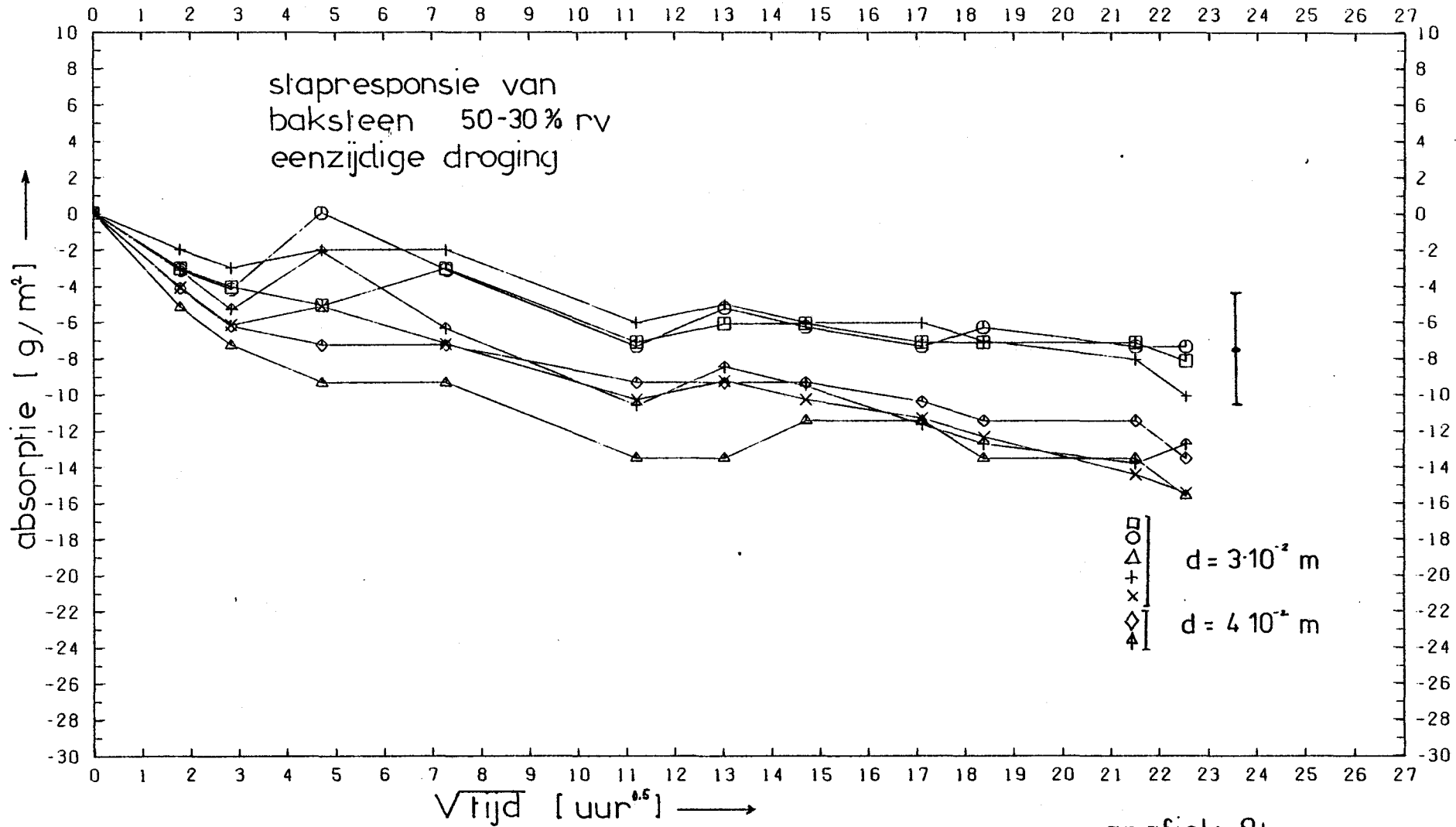








grafiek 8a



grafiek 8b

evenwichtsvochtgehalte [gew %]

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

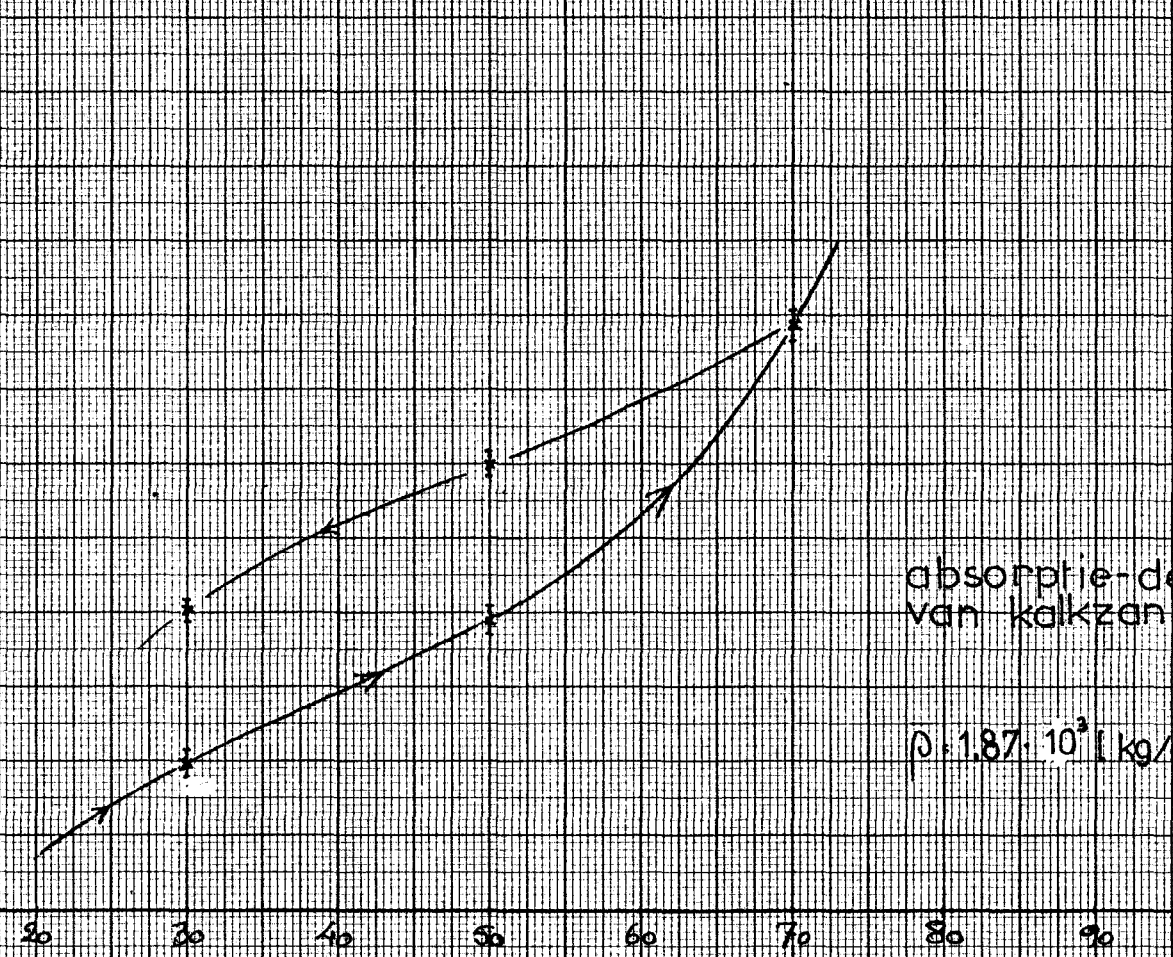
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

relatieve vochtigheid [%]

absorptie-desorptie isotherm
van kalkzandsteen (25 °C)

$\rho = 1.87 \cdot 10^3$ [kg/m³]

grafiek 9



evenwichtsvochtgehalte [gew. %]

0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

relatieve vochtigheid [%]

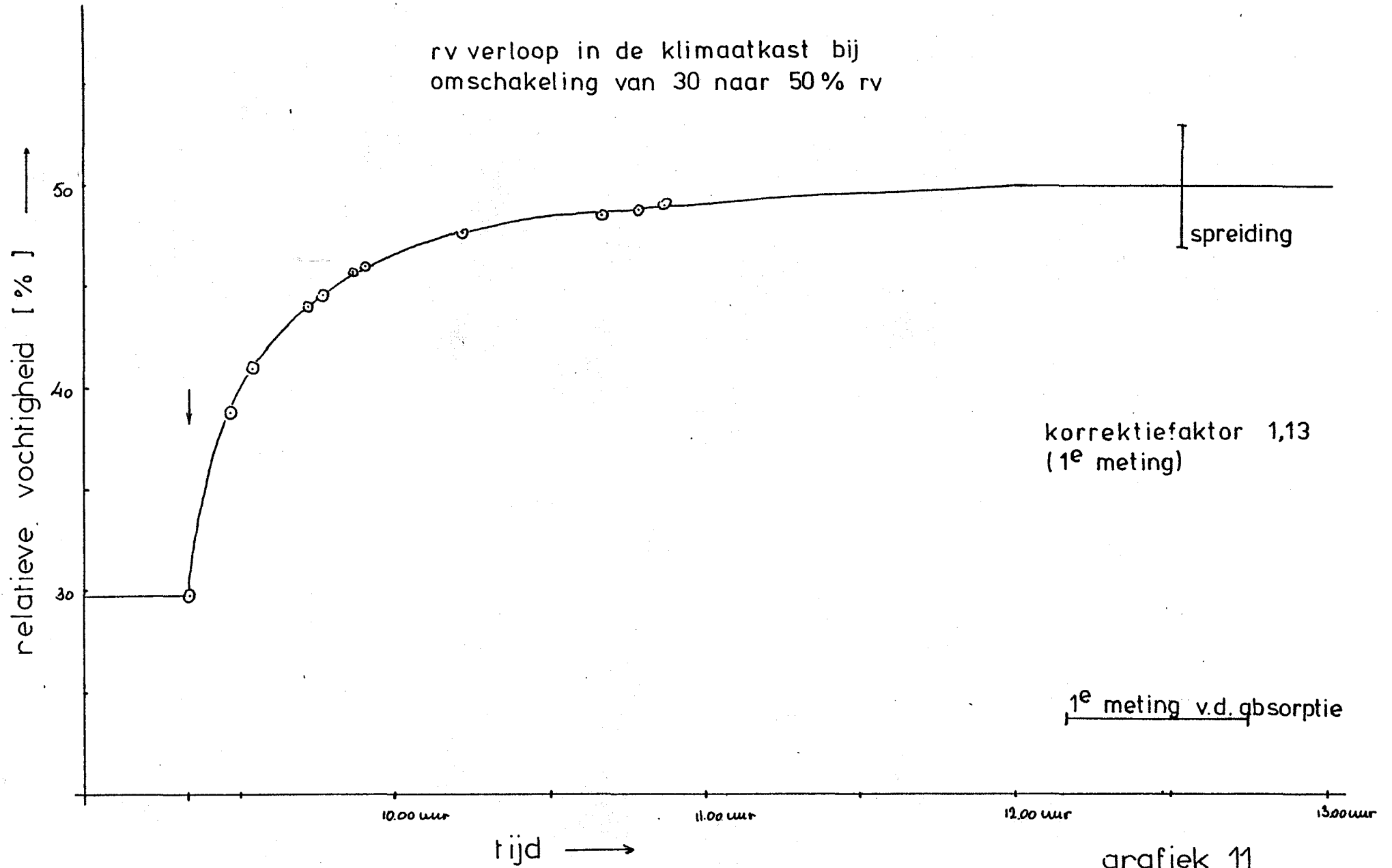
absorptie-desorptie isothermen
van baksteen (25 °C)

$$\rho = 153 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

grafiek 10

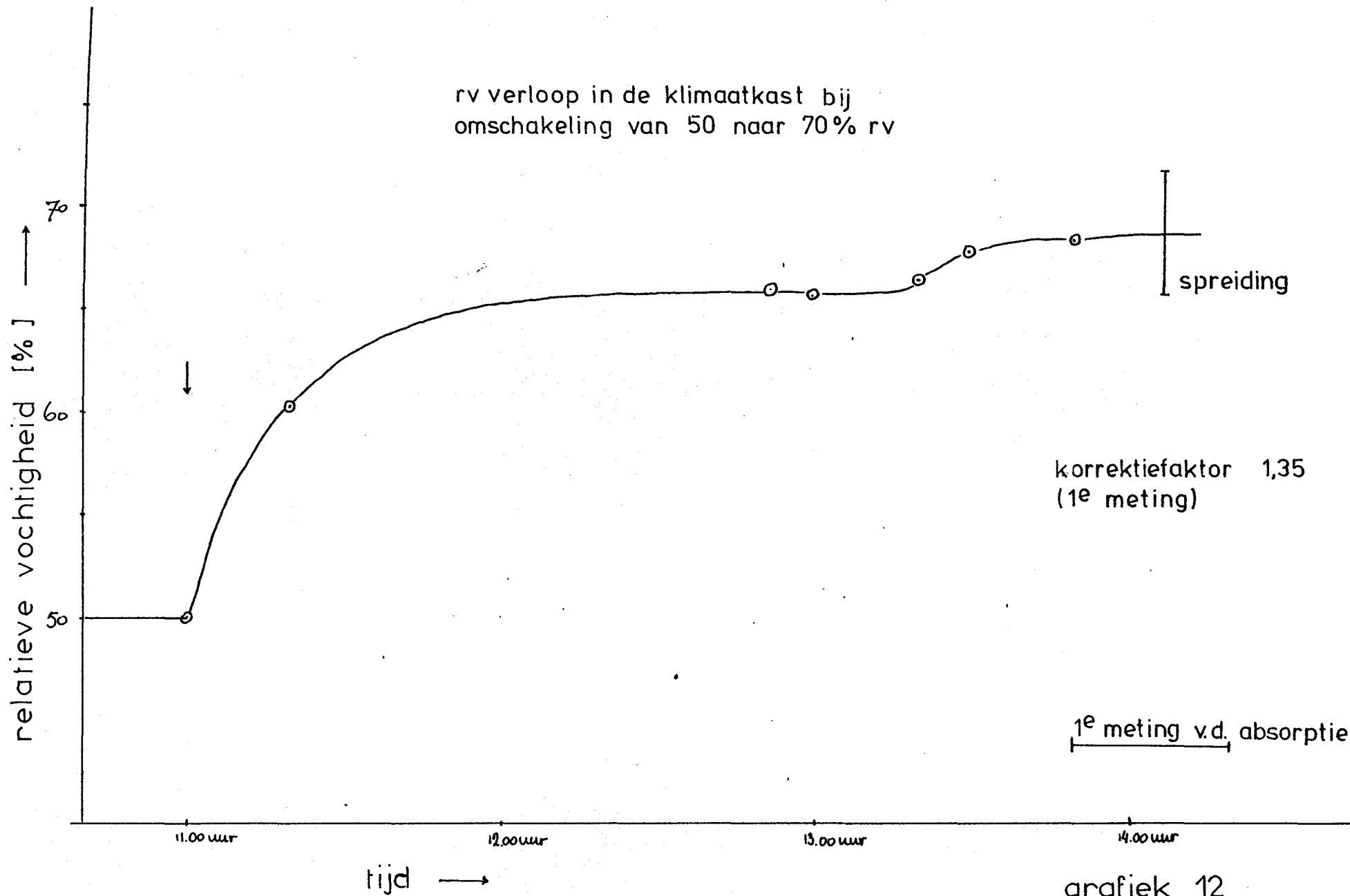


rv verloop in de klimaatkast bij
omschakeling van 30 naar 50 % rv

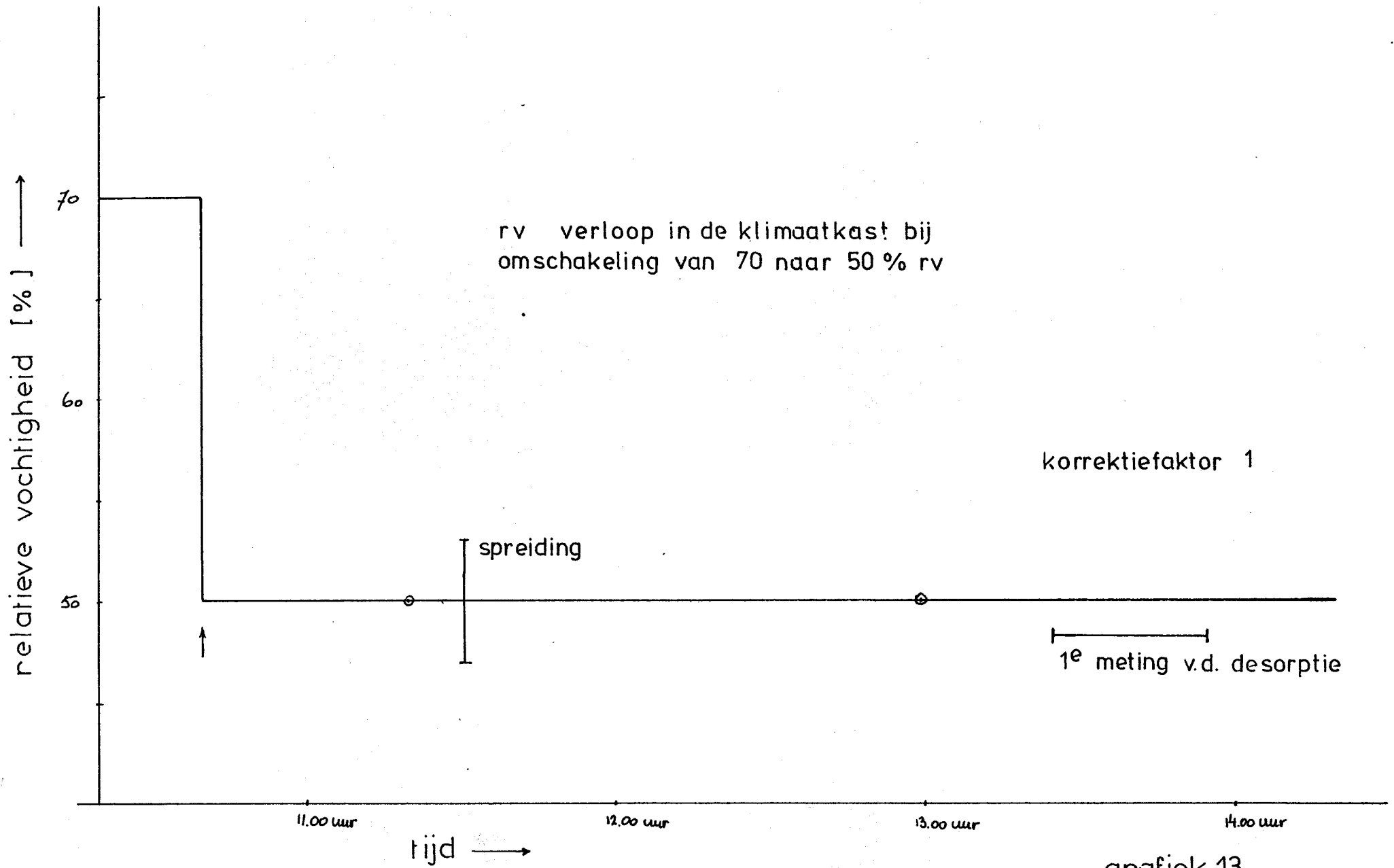


grafiek 11

rv verloop in de klimaatkast bij
omschakeling van 50 naar 70% rv

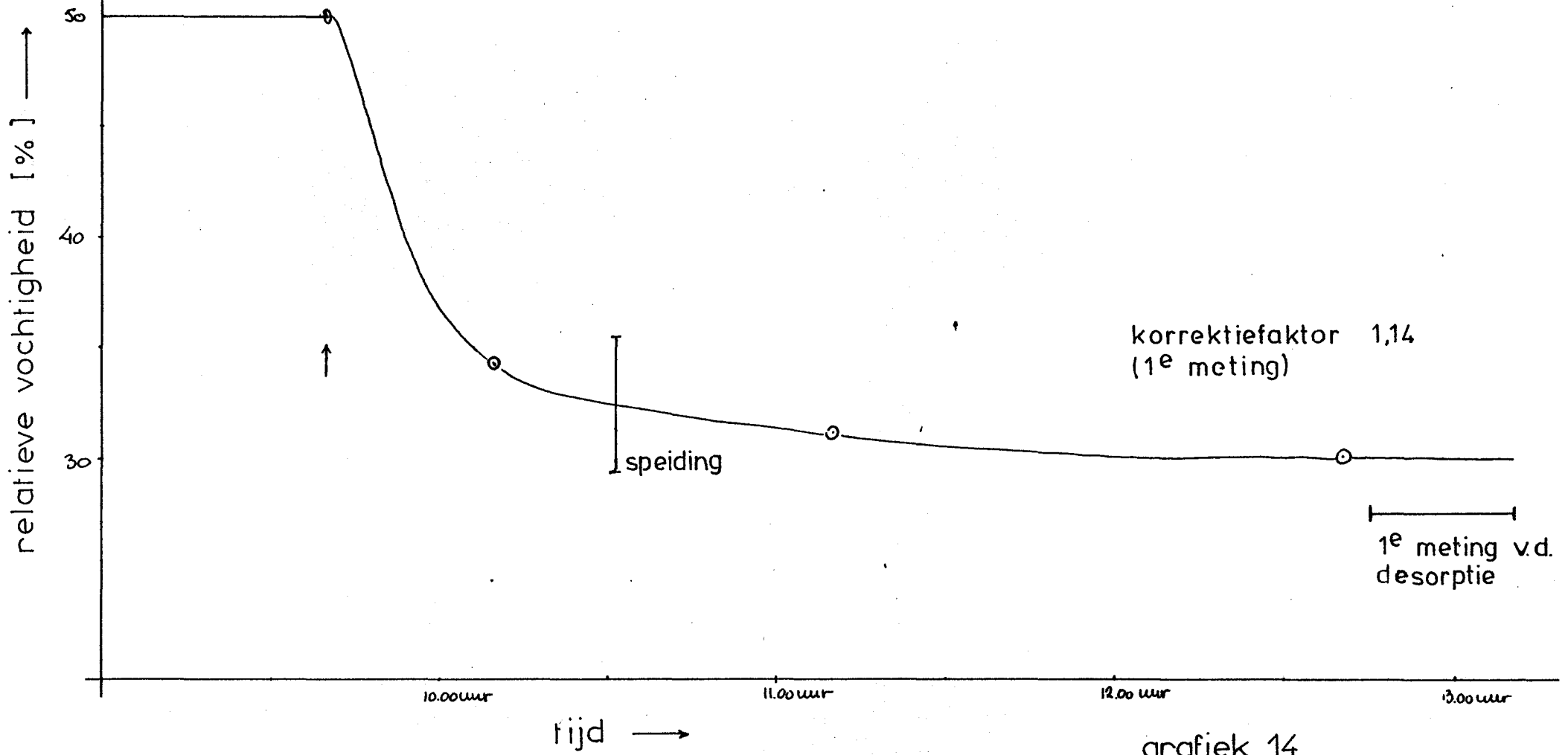


grafiek 12

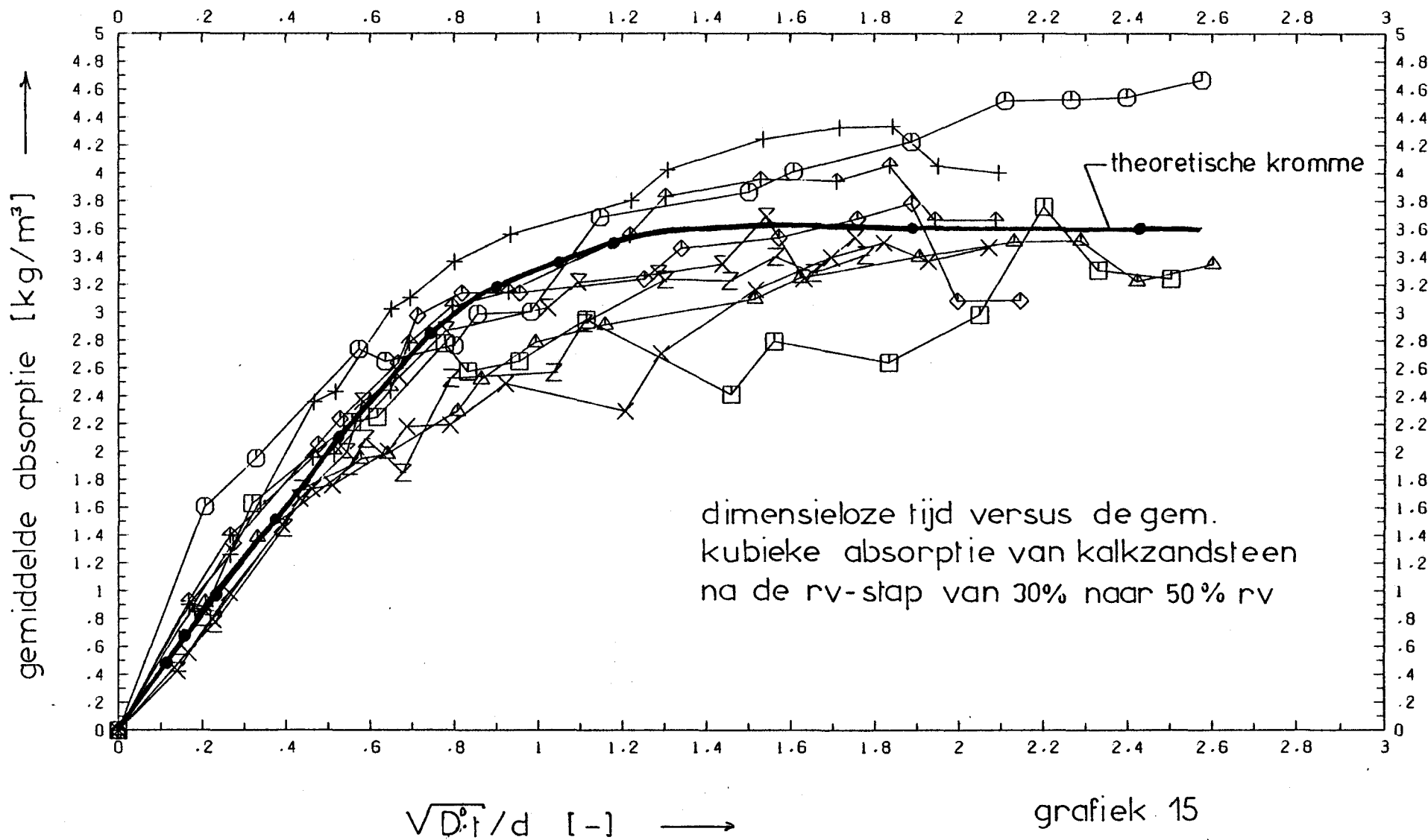


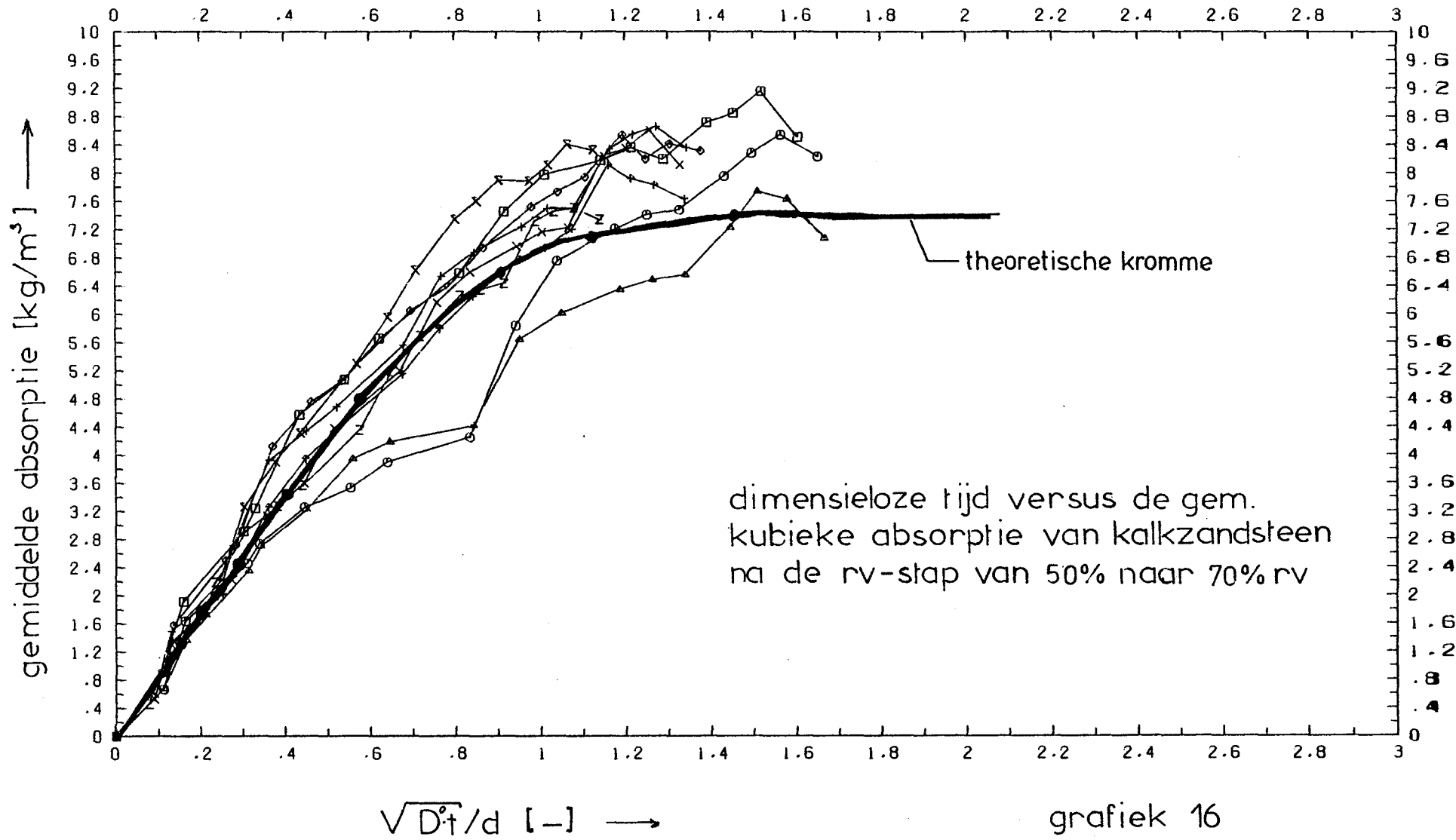
grafiek 13

rv verloop in de klimaatkast bij
omschakeling van 50 naar 30% rv

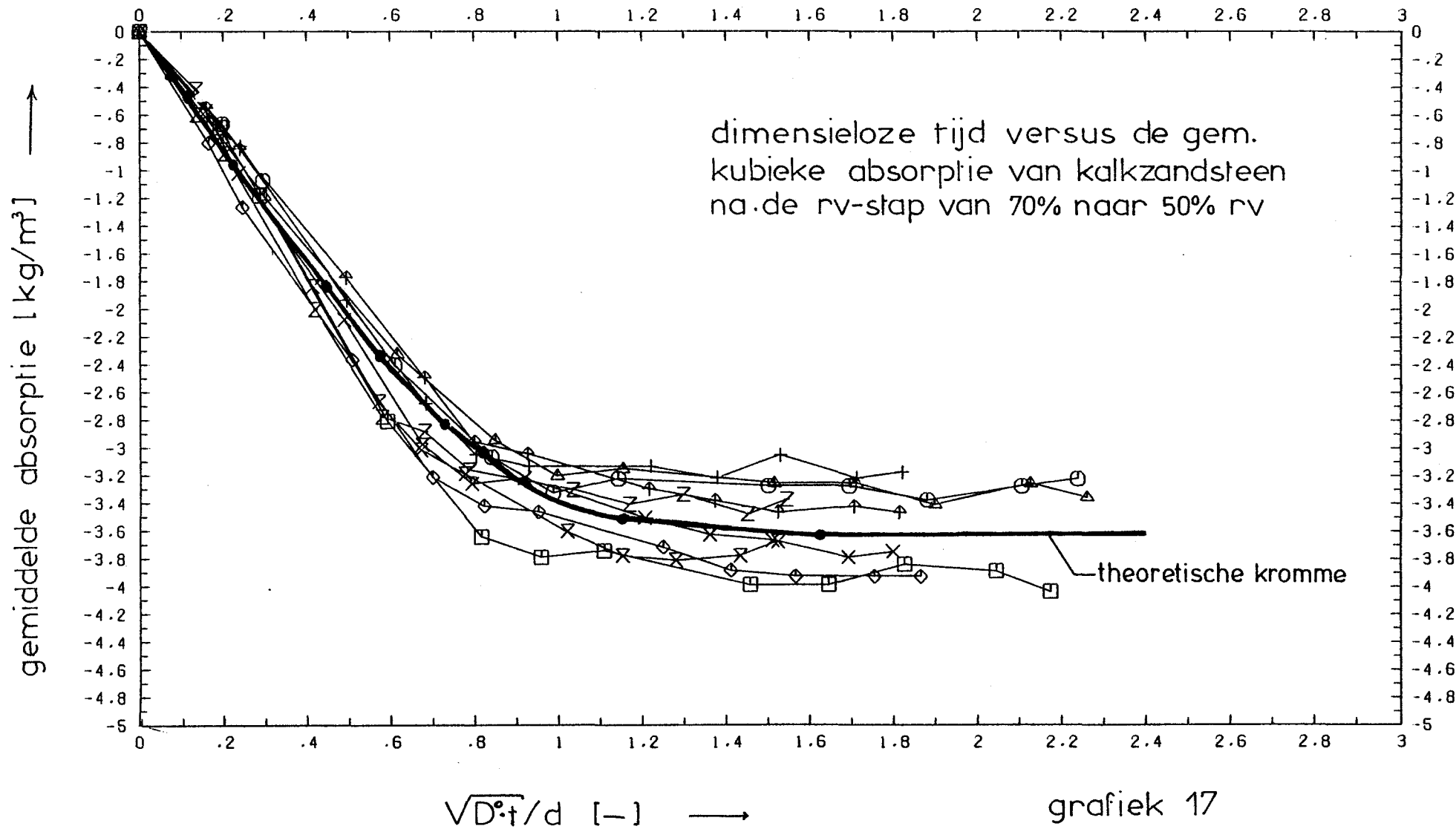


grafiek 14

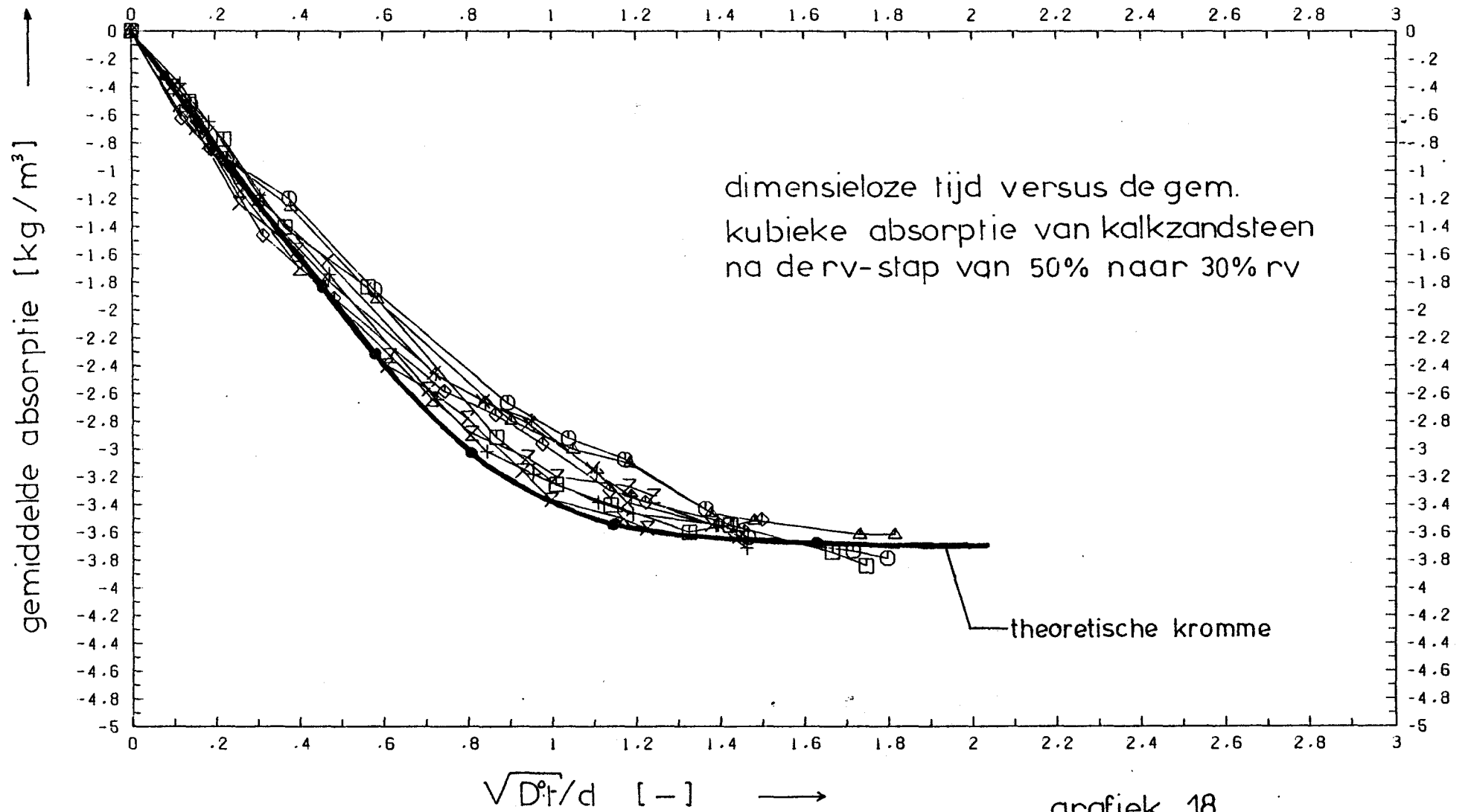




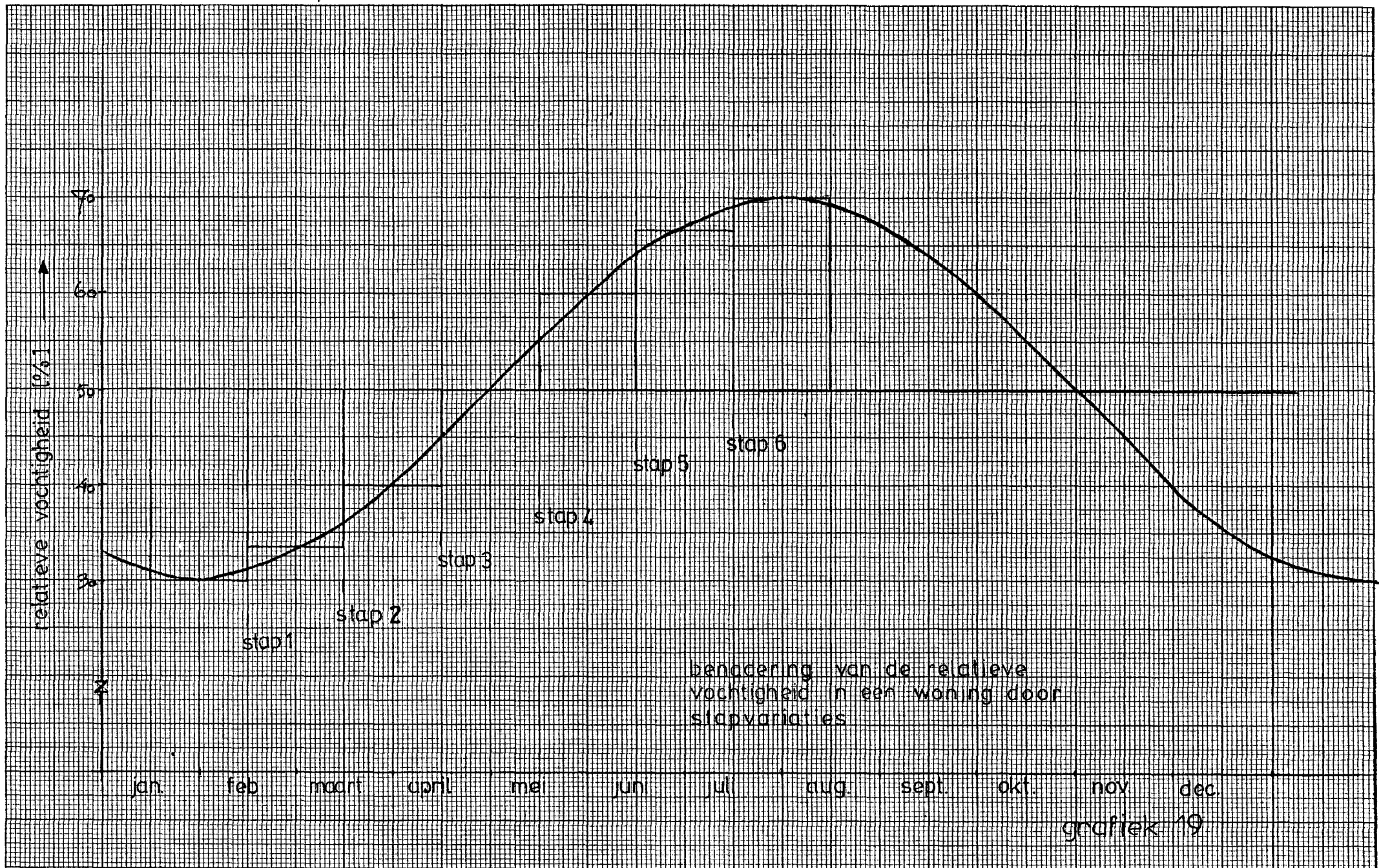
grafiek 16



grafiek 17

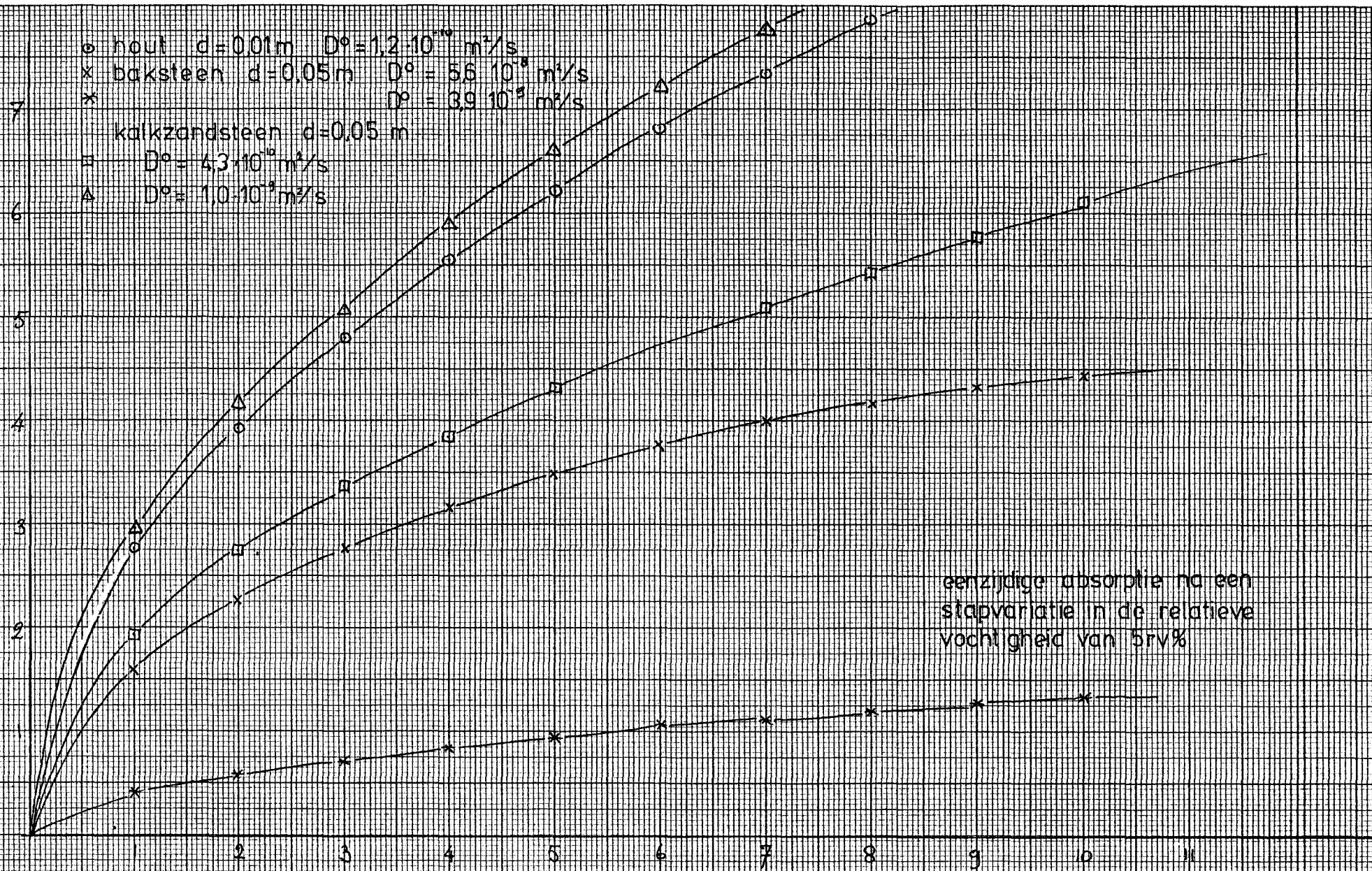


grafiek 18



geabsorbeerde waterdamp [g/m²] ↑

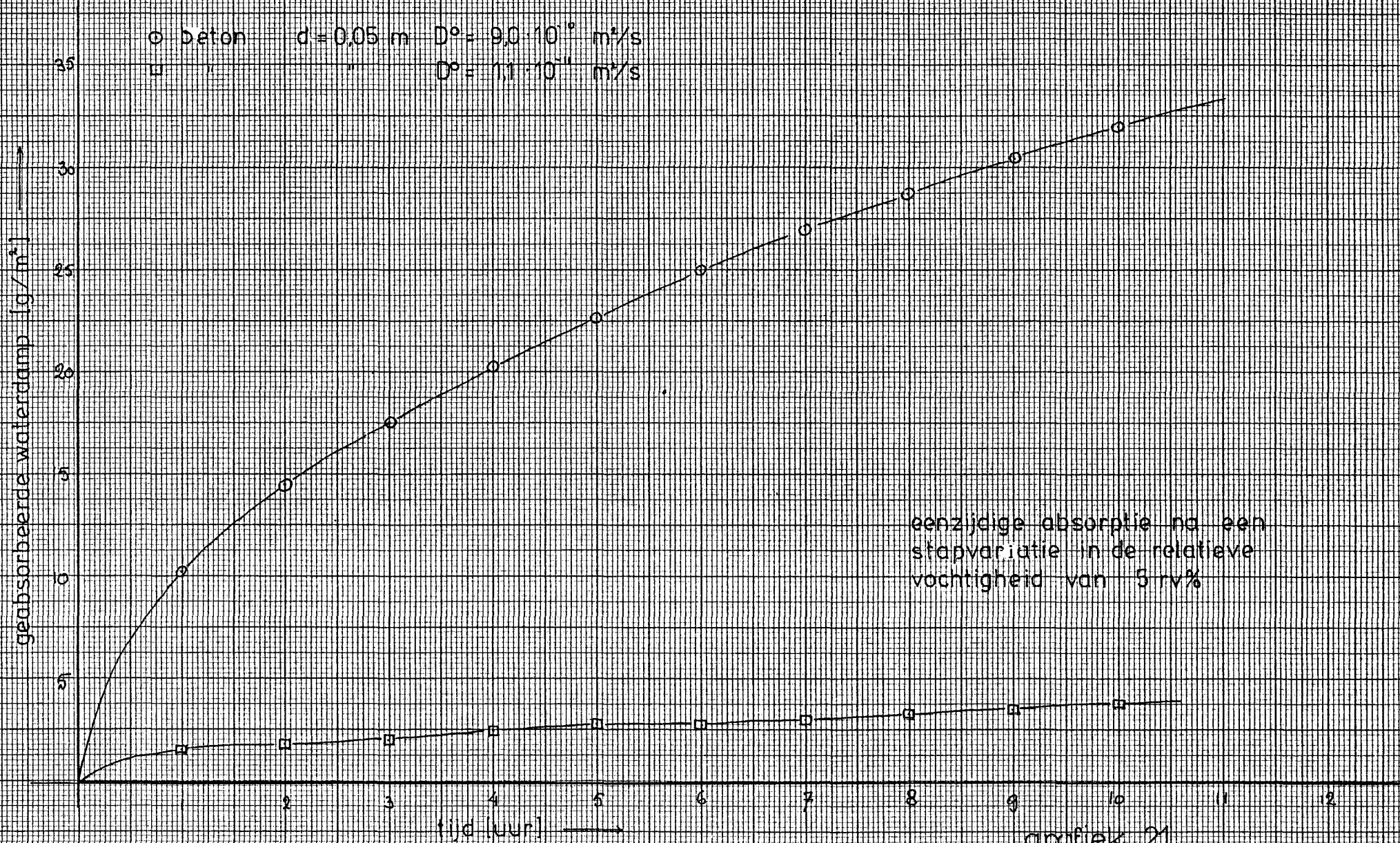
- hout d=0,01m $D^{\circ} = 1,2 \cdot 10^{-10}$ m²/s
- x baksteen d=0,05m $D^{\circ} = 5,6 \cdot 10^{-9}$ m²/s
- * kalkzandsteen d=0,05 m $D^{\circ} = 3,9 \cdot 10^{-9}$ m²/s
- $D^{\circ} = 4,3 \cdot 10^{-10}$ m²/s
- △ $D^{\circ} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ m²/s



eenzijdige absorptie na een
stapvariatie in de relatieve
vochtigheid van 5rv%

tijd (uur) →

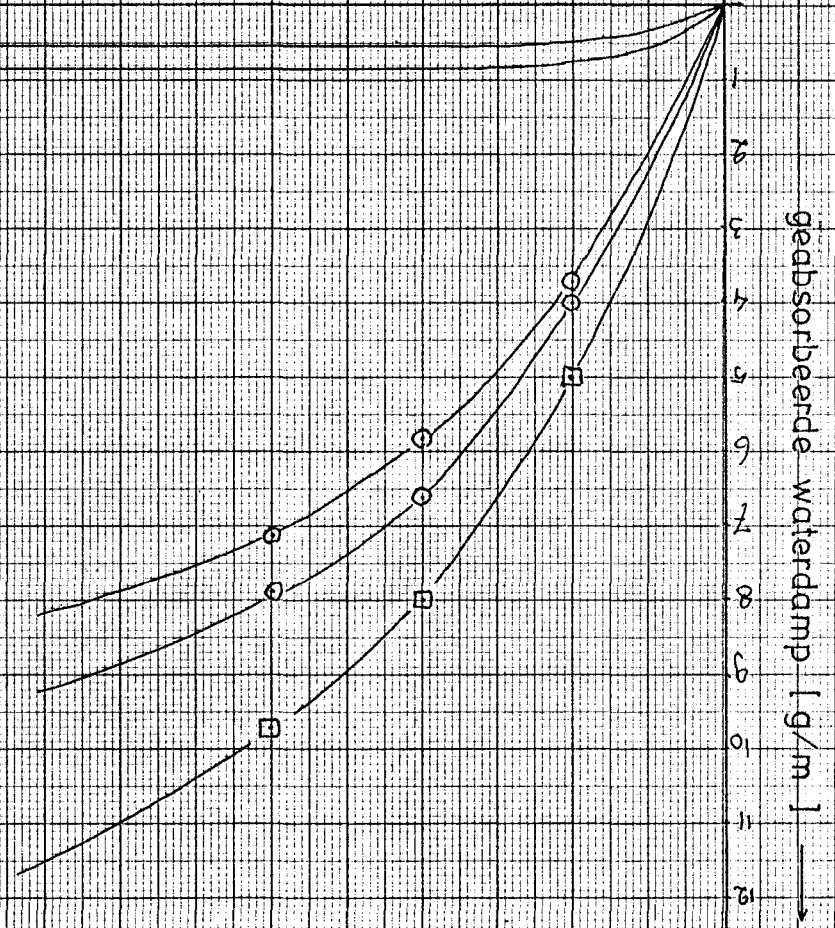
grafiek 20



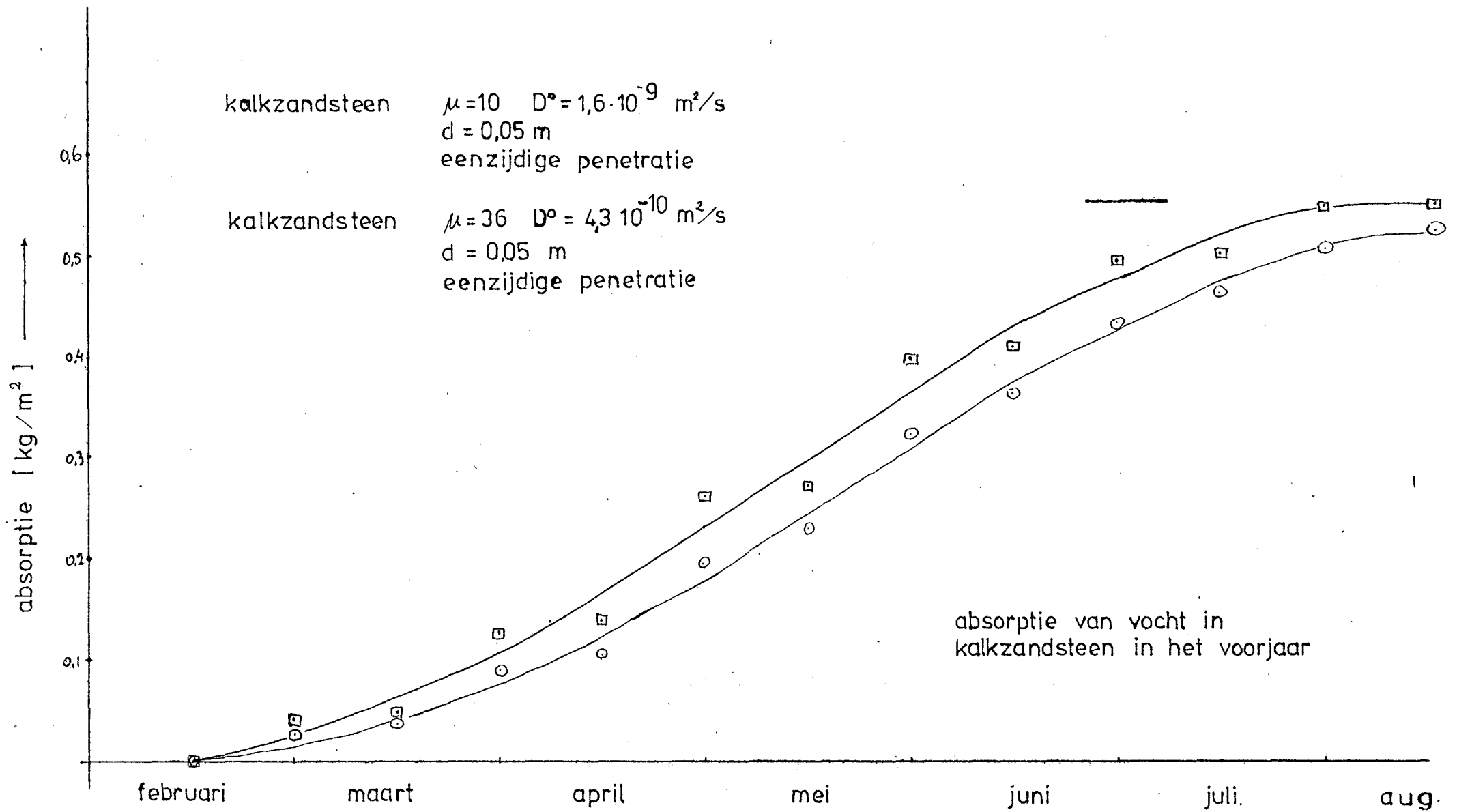
grafiek 21

- houtw cementplaat
- tapijten sisal haargaren 2 kg/m²
- behang met onderlaag op glas

absorptie na een stapvariatie in de relatieve vochtigheid van 5 r.v.% [29]



grafiek 22



Appendix A

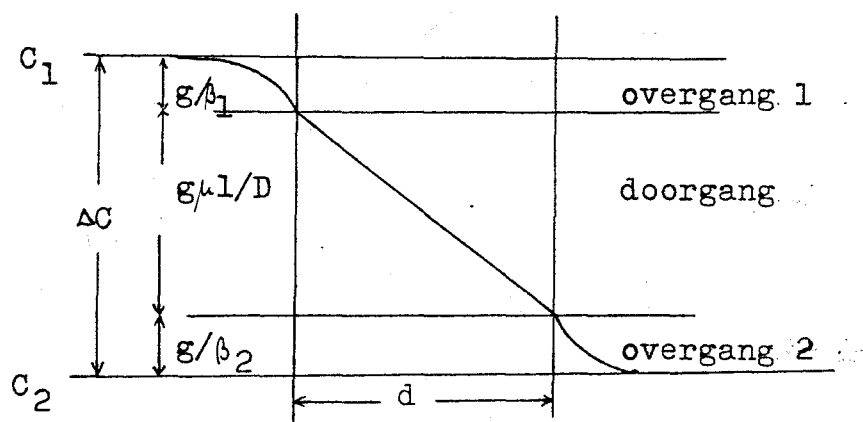
De invloed van de diffusie-overgangsweerstand op het damptransport.

De dampstroomdichtheid door een stuk materiaal wordt in een stationaire toestand bepaald door het dampdrukverschil (of concentratieverschil) van de waterdamp in de lucht en de grootte van de opeenvolgende dampweerstand.

In stationaire situatie geldt dan

$$g = \frac{\Delta C}{1/\beta_1 + \mu d/D + 1/\beta_2}$$

Daarbij zijn $1/\beta_1$ en $1/\beta_2$ de diffusie-overgangsweerstanden en $\mu d/D$ is de diffusie-doorgangsweerstand in de materiaal-laag (zie onderstaande tekening).



In de literatuur vinden we voor de overgangscoefficiënt waarden van $0.5 \cdot 10^{-2}$ m/s voor stilstaande lucht en $2.3 \cdot 10^{-2}$ m/s bij luchtsnelheden van 5 m/s (litt. [1] en [11]). Ter plaatse van de proefstukken zijn de luchtsnelheden gemeten met een anemometer (meetoppervlak ca. 3 cm^2). De aldus gemeten luchtsnelheden bleven beneden de 5 m/s. De diffusie-overgangs weerstand is in de experimentele situatie dus maximaal 200 s/m. Ter vergelijking volgt hieronder een tabel met waarden van de diffusie-doorgangsweerstand.

Diffusie-doorgangsweerstanden

	$d = 10^{-3}$ m	$d = 10^{-2}$ m
$\mu = 5$	$1,9 \cdot 10^2$ s/m	$1,9 \cdot 10^3$ s/m
$\mu = 30$	$1,2 \cdot 10^3$ s/m	$1,2 \cdot 10^4$ s/m
$\mu = 200$	$7,7 \cdot 10^3$ s/m	$7,7 \cdot 10^4$ s/m

Na vergelijking van de diffusie-overgangsweerstand en de diffusie-doorgangsweerstanden kan geconcludeerd worden dat bij materialen met een zeer laag diffusie-weerstandsgetal (gasbeton, lichte baksteen) voor dunne lagen materiaal van dezelfde orde zijn. Voor materialen met grotere diffusie-weerstandsgetallen en bij dikkere materiaallagen is de diffusie-overgangsweerstand minstens een orde kleiner dan de doorgangsweerstand.

Appendix BEnkele oplossingen van het diffusieprobleem bij eindige afmetingen.

De differentiaalvergelijking heeft de algemene gedaante:

$$a_1 \cdot d^2u/dx^2 + a_2 \cdot du/dx + a_3 \cdot u + b_1 \cdot d^2u/dy^2 + b_2 \cdot du/dy + b_3 \cdot u = 0$$

Voor het geval dat $a_2 = 0$ en a_1 en a_3 constanten zijn zijn er eenvoudige oplossingen voor het x-afhankelijke deel van de oplossing.

Men volgt de volgende methode. Splits de functie u in een x en in y-afhankelijk deel en pas splitsing van variabelen toe.

Voor de volgende randvoorwaarden vindt men als oplossing van u

$$\text{i) } u = 0 \text{ voor } x = 0 \text{ én } x = d \quad u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(y) \cdot \sin(n\pi x/d)$$

$$\text{ii) } du/dx = 0 \text{ voor } x = 0 \text{ én } x = d \quad u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(y) \cdot \cos(n\pi x/d)$$

$$\text{iii) } u = 0 \text{ voor } x = 0 \text{ en } du/dx = 0 \text{ voor } x = d \quad u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(y) \cdot \sin((2n-1)\pi x/(2d))$$

$$\text{iiii) } du/dx = 0 \text{ voor } x = 0 \text{ en } u = 0 \text{ voor } x = d \quad u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(y) \cdot \cos((2n-1)\pi x/(2d))$$

Bron litt. [29].

Het probleem dat gegeven wordt door

$$du/dt = D \cdot d^2u/dx^2$$

$$u = C_2 \text{ voor } x = 0 \text{ (} t \geq 0 \text{)}$$

$$du/dx = 0 \text{ voor } x = d \text{ (} t \geq 0 \text{)}$$

$$u = 0 \text{ voor alle } x \text{ voor } t = 0$$

is van bijzonder belang, daar de experimentele omstandigheden beantwoorden aan deze randvoorwaarden.

Door de keuze van $v(x,t) = u(x,t) - C_2$ voldoet $v(x,t)$ aan de homogene randvoorwaarden en is het plaatsafhankelijke deel van v overeenkomstig iii).

Na scheiding van variabelen volgt voor het tijdafhankelijke deel van $v(x,t)$, $T(t)$

$$T'(t) = -\frac{\lambda}{D}T(t) \quad \text{met } \lambda = \text{constant.}$$

Vul de algemene oplossing iii) in in de bovenstaande differentiaalvergelijking.

$$-\frac{\lambda}{D} \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \sin((2n-1)\pi x/(2d)) = \sum_{n=1}^{\infty} dT_n(t)/dt \sin((2n-1)\pi x/(2d))$$

$$\lambda = (2n-1)\pi x/(2d).$$

Stel in deze vergelijking de coëfficiënten van $\sin((2n-1)\pi x/(2d))$ aan elkaar gelijk en de oplossing voor elke n is

$$T_n = A_n \exp[-(2n-1)^2 \pi^2 \cdot D \cdot t / (4d^2)]$$

De oplossing van $v(x,t)$ wordt:

$$v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[-(2n-1)^2 \pi^2 \cdot D \cdot t / (4d^2)] \sin((2n-1)\pi x/(2d))$$

Voor $t = 0$ is A_n de fourriercoëfficiënt van een functie $f(x)$ ontwikkeld naar sinusfuncties met periode $4d$.

$f(x)$ is hier een constante nl. $-C_2$.

$$T_n(0) = A_n$$

$$v(x,0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin((2n-1)\pi x/(2d)).$$

$$A_n = \frac{2}{d} \cdot C_2 \int_0^d \sin(\frac{1}{2}(2n-1)\pi x/(2d)) dx = -C_2 \frac{4}{\pi(2n-1)}$$

De oplossing van $u(x,t)$ is dus:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} -C_2 \frac{4}{\pi(2n-1)} \exp[-(2n-1)^2 \pi^2 D t / (4d^2)] \sin((2n-1)\pi x/(2d)) + C_2$$

Het diffusieprobleem dat gegeven wordt door:

$$du/dt = D \cdot d^2u/dx^2$$

$$u = C_2 \text{ voor } x = 0 \text{ (} t \geq 0 \text{)}$$

$$u = 0 \text{ voor } x = d \text{ (} t \geq 0 \text{)}$$

$$u = 0 \text{ voor alle } a \text{ voor } t = 0$$

kan op identieke wijze als voorgaand probleem worden opgelost met dien verstande dat de keuze van $v(x,t)$ als volgt is:

$$v(x,t) = u(x,t) + C_2/d x - C_2$$

Bovendien is het plaatsafhankelijke deel van de oplossing overeenkomstig i).

Appendix C

Listing van het programma dat met gebruik van vgl. -25- de relatieve absorptie berekent.

```

LIST
1000 BEGIN REAL L, X, FUNCTIEWAARDE, EPS, A, CONST, D;
1010 REAL INTEGRAAL;
1020 INTEGER N, I, J, EX;
1030 REAL ARRAY TIJDCI:101, CONCENTRCI:10, 0:1001;
1040 FILE UIT (KIND=REMOTE, MAXRECSIZE=120);
1050 FILE IN (KIND=REMOTE);
1060 FILE UIT2 (KIND=PLOTTER11);
1070 REAL PROCEDURE FUNCTIE(N, X, T, L, D);
1080 VALUE N, X, T, L, D;
1090 INTEGER N, T;
1100 REAL X, L, D;
1110 BEGIN REAL PI, CONST, PIN;
1120     PI:=(ARCTAN (1))*4;
1130     CONST:=1.0;
1140     D:=D;
1150     L:=L;
1160     PIN:=PI*(2*N-1);
1170     FUNCTIE:=-CONST*4/PIN*EXP(-(PIN/(2*L))**2*T*D)*
1180     SIN(PIN*X/(2*L));
1190 END FUNCTIE;
1200 READ(IN,/,L,D,EX);
1210 CONST:=1.0;
1250 WRITE(UIT,</, 'TIJD [SEC] '>);
1260 FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 10 DO
1270 BEGIN TIJDCI:=I*3600*(10**EX);;
1280     WRITE(UIT,</,F9.1>,TIJDCI);
1290     FOR J:=0 STEP 1 UNTIL 100 DO
1300 BEGIN X:=J*L/100;
1310     N:=1;
1320     FUNCTIEWAARDE:=0;
1330     WHILE N<100 DO
1340         BEGIN A:=FUNCTIE(N,X,TIJDCI,L,D);
1350             FUNCTIEWAARDE:=FUNCTIEWAARDE+A;
1360             N:=N+1;
1370         END;
1380     CONCENTRCI,JJ:=FUNCTIEWAARDE+CONST;
1400 END;
1405 INTEGRAAL :=0;
1410 FOR J:=0 STEP 1 UNTIL 99 DO
1430     INTEGRAAL:=INTEGRAAL+0.5*(CONCENTRCI,JJ+CONCENTRCI,J+1);
1440 WRITE(UIT,<'GEABSORBEERDE HOEVEELHEID VOCHT',F9.1,'%>,
1450     INTEGRAAL);
1460 END;
1470 END.
#

```

Appendix DEen model van de verandering van de absolute en relatieve vochtigheid in een woning.

Algemene gegevens:

Vochtproduktie Samengesteld uit gegevens uit de literatuur [9] en geschatte waarden voor ontbrekende gegevens.

Uitgesplitst naar bron: grafiek a t/m g.

Totale vochtproduktie: grafiek ag.

volume woning $V = 500 \text{ m}^3$

oppervlakte van de muren $A = 600 \text{ m}^2$

ventilatievoud $n = 1 \text{ per uur}$

temp. binnen $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

temp. buiten $T_u = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

rv buiten $rv = 87 \%$

absorptie en desorptiecapaciteit

van de muren $\text{abs.} = 0,25 \text{ g}/(\text{uur} \cdot \text{m}^2 \cdot \%rv\text{-verandering})$

In tijdsintervallen van 0.25 uur wordt de vochttoename en vochtafname berekend met de volgende vergelijking:

$$M_{i+1} = V \cdot C_{ii} + \text{vocht}_{i-i+1} - V \cdot n \cdot \left[C_{ii} \cdot \frac{\text{vocht}_{i-i+1} - C_u}{2 \cdot V} \right] \cdot \text{tijd}_{i-i+1}$$

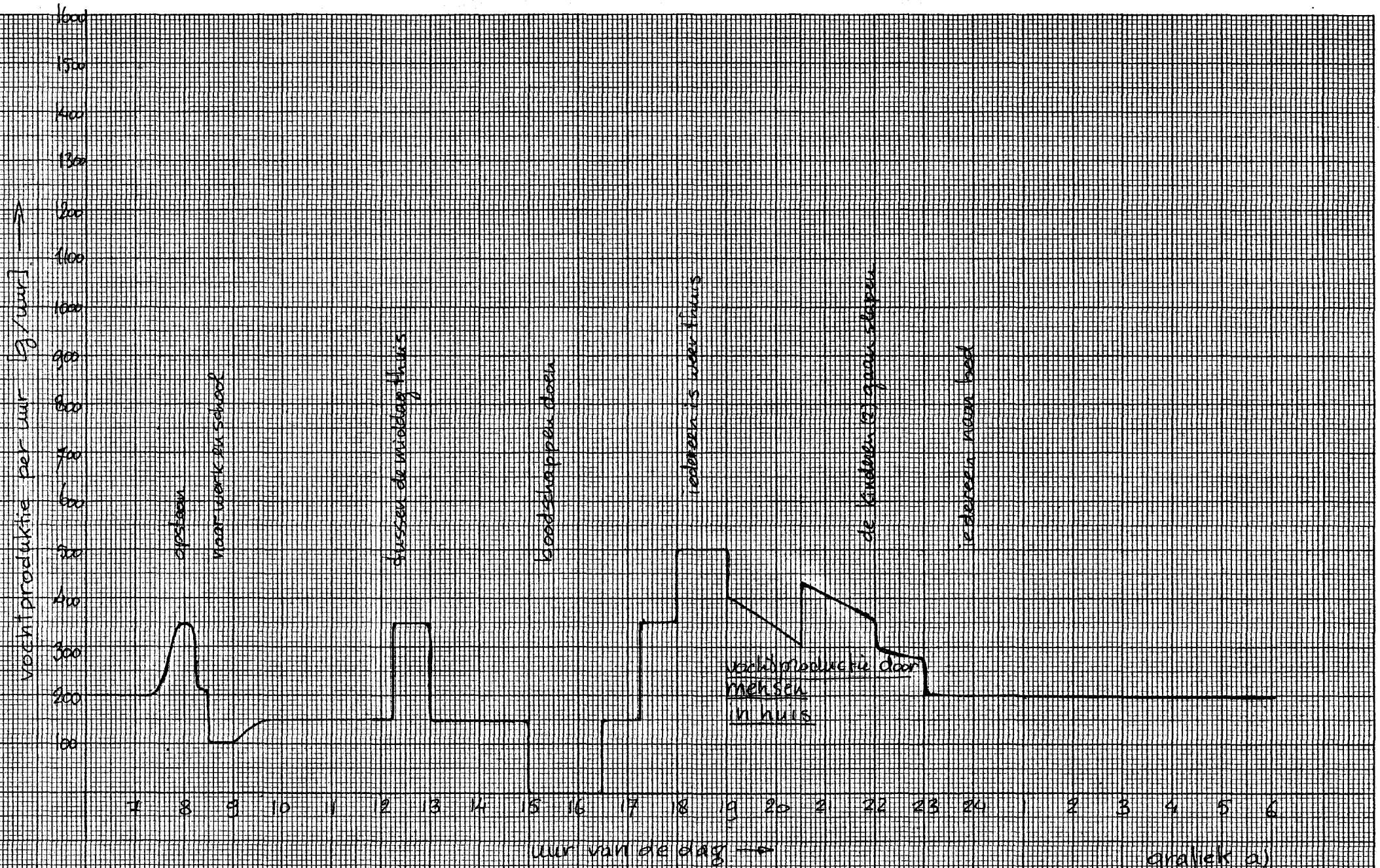
met

$$\text{vocht}_{i-i+1} = \text{vochtproduktie}_{i-i+1} - A \cdot \text{abs.} \cdot \frac{C_i - \bar{C}}{C_{\text{sat}}(20^\circ\text{C})} \cdot 100 \%$$

De betekenis van de symbolen in de vergelijkingen is:

M_{i+1}	totale massa waterdamp in de woning ten tijde $i+1$ (i is een natuurlijk getal)
V	volume van de woning
C_{ii}	concentratie waterdamp in de woning ten tijde i
$\text{vocht}p_{i-i+1}$	vochtproduktie in het tijdinterval $i-i+1$ (netto)
n	ventilatievoud
C_u	constante waterdamconcentratie buiten
$\text{vocht}p_{i-i+1}$	vochtproduktie van alle vochtbronnen uitgezonderd de verdamping uit de muren
A	oppervlakte van de absorberende/desorberende muren
\bar{C}	gemiddelde waterdamconcentratie binnen
C_{sat}	verzadigde waterdamconcentratie

Het resultaat van deze berekening voor één dag is te vinden in grafiek h. De lijn a) geeft de resultaten weer als de absorptie in de muren nul is. De lijn b) in grafiek h geeft de resultaten als er wel absorptie en desorptie plaatsvindt.



grafiek a)

Vochtopproductie per uur [g/uur] →

150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 1 2 3 4 5 6

uur van de dag →

ontbijt

Soep tussen de middag

afwas

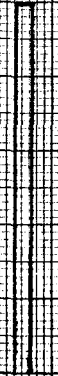
Waarom eten

Vaken

afwas

koffie

grafiek b)



vochtproductie per uur [g/uur] →

1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 1 2 3 4 5 6

uur van de dag →

grafiek c)

duurte van de gang en de kouten



vochtproductie per uur [g/uur] →

800
700
600
500
400
300
200
100

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 2 3 4 5 6

donderdag

donderdag

donderdag

uur van de dag →

Grafiek d)



Vochtproductie per uur [g/uur] →

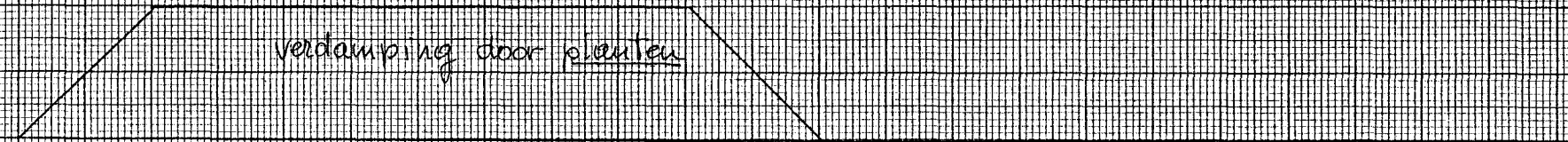
400
300
200
100

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 2 3 4 5 6

uur van de dag →

verdamping door planten

grafiek e)



vochtproductie per uur [g/uur] →

500
400
300
200
100

verdamping van water uit waterverdammers

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 2 3 4 5 6

uur van de dag →

grafiek f)

nodig productie per uur [g/uur]

→

500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500

wassen

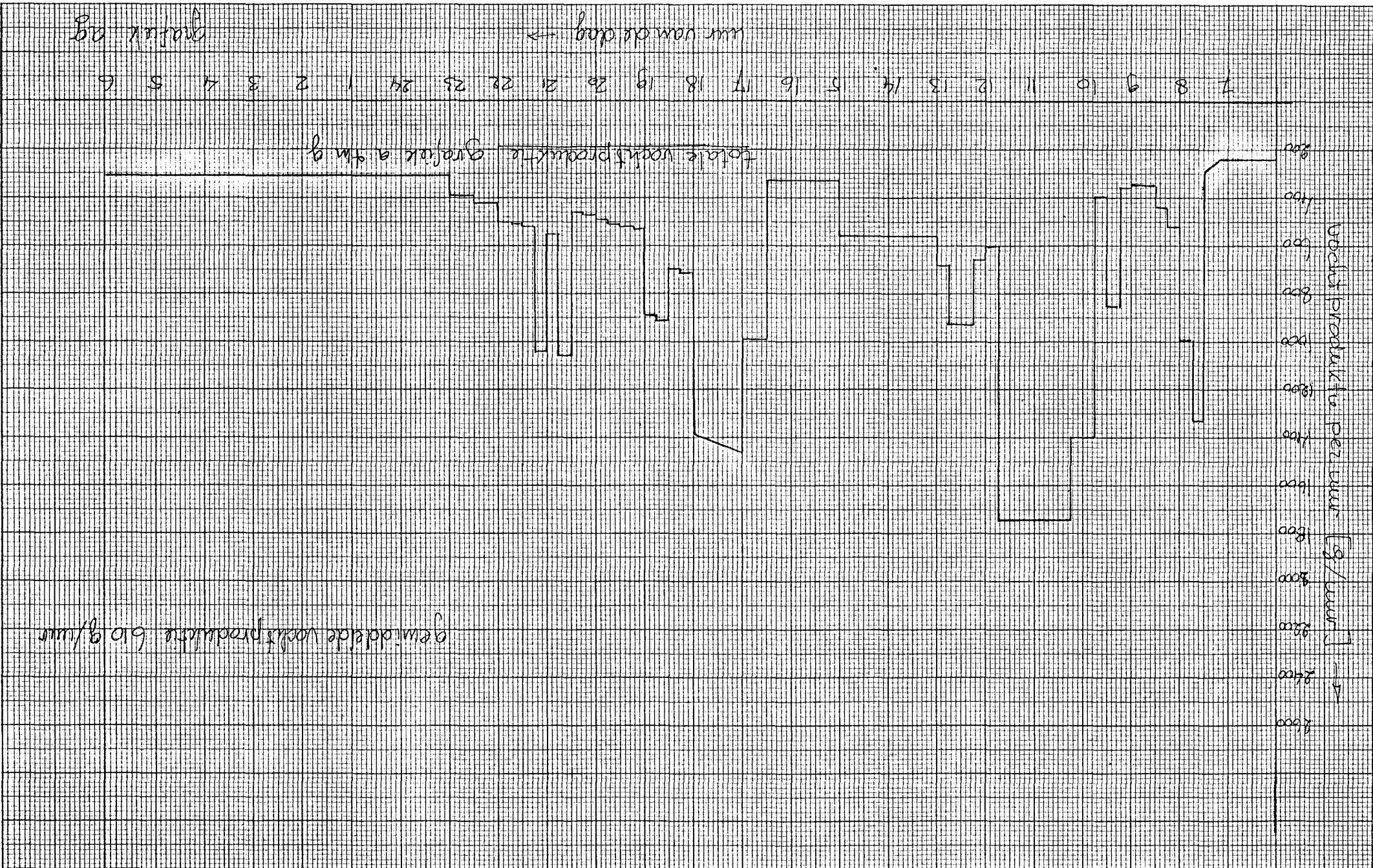
wassen in de wasketten

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 1 2 3 4 5 6

van vande dag →

drogen vande was

grafiek g)

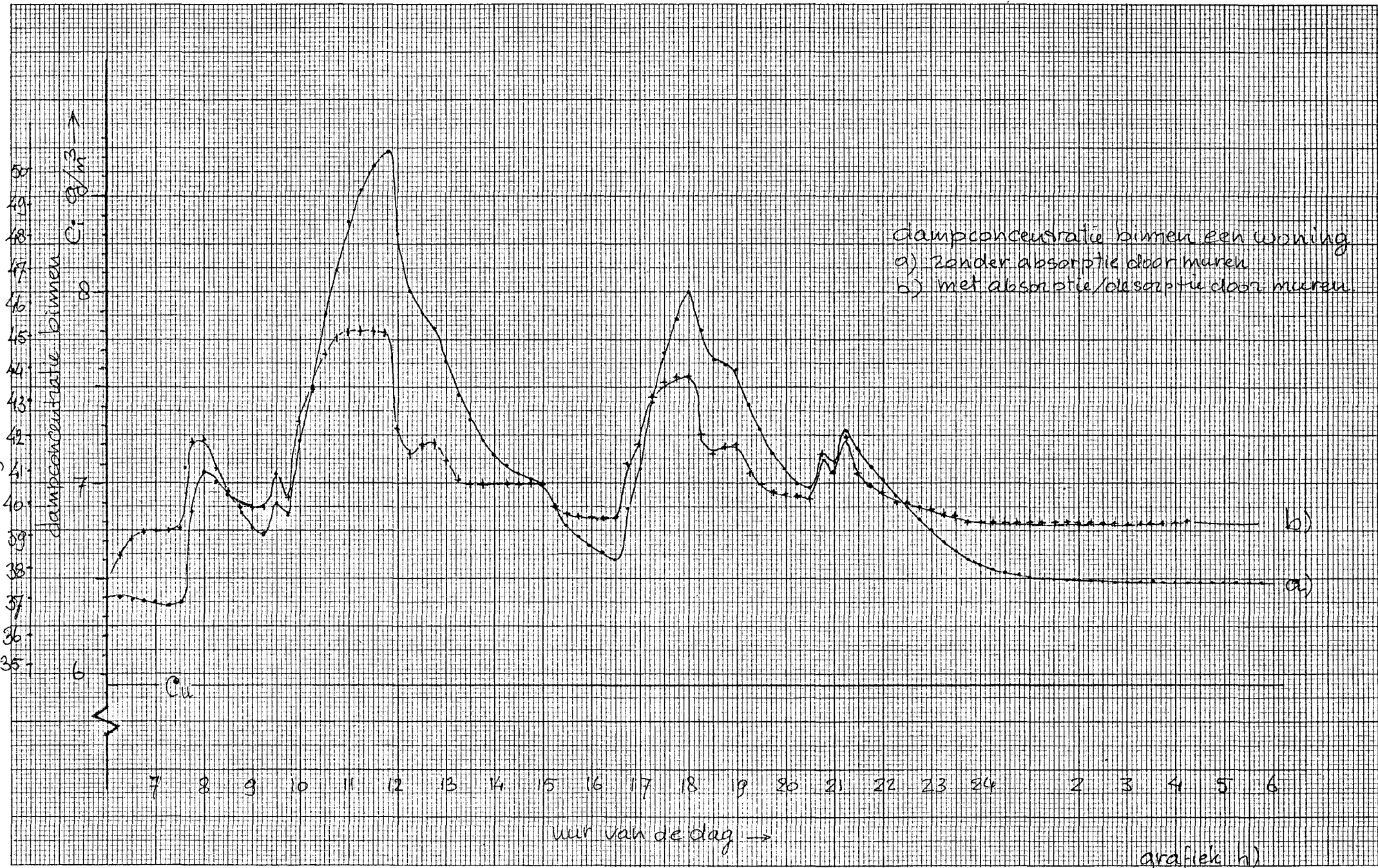


grafiek 09

totale voedselproductie grafiek 09 t/m 9

gemiddelde voedselproductie 610 g/uur

RV bij 20°C [g] →



dampconcentratie binnen een woning
a) Zonder absorptie door muren
b) met absorptie/desorptie door muren

uur van de dag →

grafiek h)