

HoGent

Cursus Bodemkunde

AJ 2023-2024

Matthias Vercauteren
2023-2024

Hoofdstuk 1. Inleiding op bodemkunde	1
1.1 Omschrijving, situering en doelstellingen.....	1
1.2 Vlaams aandeel van landbouwgrond, tuinen en openbaar groen	2
Hoofdstuk 2. Bodemvorming en bodemsamenstelling	3
2.1 Dynamiek in de aardkorst: platentektoniek	3
2.2 Beginselen van de bodemmineralogie en gesteenteleer.....	4
2.2.1 Mineralen	4
2.2.2 Gesteenten	9
2.2.3 Mineralogie en plantenvoedingsaspecten	17
2.3 Verwerking.....	18
2.3.1 Situering	18
2.3.2 Fysische verwerking	18
2.3.3 Chemische verwerking.....	20
2.3.4 Biologische verwerking	23
2.3.5 Factoren die verweringsprocessen beïnvloeden.....	23
2.4 Feitelijke bodemvorming: overzicht.....	27
2.5 Het bodemprofiel	28
2.5.1 Ontstaan van het bodemprofiel	28
2.5.2 Opbouw van het bodemprofiel	29
2.5.3 Studie van het bodemprofiel – zie practicum	31
2.6 Bodemsamenstelling	32
2.6.1 Vaste bestanddelen.....	32
2.6.2 Vloeibare fase.....	32
2.6.3 Gasvormige fase.....	32
2.6.4 Ideale verhouding van de bodembestanddelen.....	34
Hoofdstuk 3. Fysische bodemeigenschappen	35
3.1 Granulometrie en bodemtextuur	35
3.1.1 Korrelgroottefracties bepalen de bodemtextuur	35
3.1.2 Mineralogische samenstelling van de fracties in België.....	36
3.1.3 Bodemtexturen (grondsoorten)	37
3.2 Bodemdichtheid en bodemaggregaten	40
3.2.1 Een goede bodemstructuur door poriekwaliteit en aggregaatstabiliteit	40
3.2.2 Dichtheid en poriënvolume.....	41
3.3 Structuurvormen.....	43
3.3.1 Structuur van de bovengrond.....	43
3.3.2 Structuur van de ondergrond	43
3.3.3 Invloedsfactoren op de bodemstructuur.....	44

Hoofdstuk 4. Water in de bodem	47
4.1 Belang van het water in de bodem	47
4.2 Waterbalans	47
4.3 Water in het bodemprofiel	48
4.3.1 Grondwaterzone	48
4.3.2 Capillaire zone	48
4.3.3 Hangwaterzone	49
4.4 Binding of retentie van water in de bodem	49
4.5 Bodemvochtcharacteristieken of <i>pF</i> -curven	50
4.6 Veldcapaciteit (<i>VC</i>)	51
4.7 Verwelkingspunt (<i>VP</i>)	52
4.8 Beschikbaar watergehalte en <i>pF</i> -curve	53
4.9 Diepgaandere benadering <i>pF</i> -curven	55
4.10 Bodemkenmerken veroorzaakt door het water	56
4.11 Draineringsklassen	58
4.12 Verband tussen grondwatertafel en productie	59
Hoofdstuk 5. Chemische bodemeigenschappen	- 61 -
5.1 Zuurtegraad of pH van de bodem	- 61 -
5.1.1 Reële, potentiële en totale zuurheid	- 61 -
5.1.2 Invloed van de pH op de bodembestanddelen	- 63 -
5.1.3 Optimale pH_{KCl} afhankelijk van grond en teelt: tussen 4,8 en 7,5	- 65 -
5.1.4 Nutriëntenproblemen door een foute bodem-pH	- 66 -
5.1.5 Oorzaken van bodemverzuring	- 67 -
5.1.6 Bodemverzuring en waterkwaliteit	- 69 -
5.2 Kationenuitwisselingscapaciteit of CEC van de bodem ($\neq EC$!!)	- 70 -
5.2.1 Herkomst van kationenuitwisselingscapaciteit	- 70 -
5.2.2 Herkomst van kationen	- 70 -
5.2.3 Eigenlijke uitwisseling van kationen	- 71 -
5.2.4 CEC-waarde van de bodem	- 71 -
5.3 Basenverzadiging in de bodem	- 72 -
5.4 Verband tussen kationen-samenstelling, pH en bodemstructuur	- 73 -
Hoofdstuk 6. Bodem organische stof en bodemleven	75
6.1 Situering	75
6.2 Humificatie: een afbraak- en syntheseproces	75
6.3 Invloedsfactoren op de humificatie	76
6.3.1 Klimaat - temperatuur	76
6.3.2 Klimaat - neerslag of vochtgehalte	76
6.3.3 Het plantaardig materiaal	77
6.3.4 De bodem	79

6.4 Rol van het organisch materiaal	80
6.4.1 Invloed op de fysische bodemeigenschappen	80
6.4.2 Betekenis van het organisch materiaal voor de plantenvoeding.....	81
6.5 Evolutie van het humusgehalte in de bodem: organische stofbalans	83
6.6 C-sequestratie in de bodem: een inleiding.....	84
Hoofdstuk 7. Belgische bodems en hun kartering.....	86
7.1 Geologie en gesteenten van België	86
7.1.1 Belgische ondergrond	86
7.1.2 Geologische geschiedenis van België	86
7.1.3 De oppervlakte-sedimenten in België.....	88
7.2 Toepassingen van bodemkaarten	90
7.3 De bodemlegende van de bodemkaart 1/20.000	90
7.3.1 De aard van het moedermateriaal: textuurklassen	90
7.3.2 De drainage	91
7.3.3 De profielontwikkeling	92
7.3.4 Het substraat, stenige bijmenging	93
7.4 De bodems per landbouwstreek in Vlaanderen	94
7.4.1 Opbouw van de Kustvlakte en bodems van de polderstreek en de duinstreek.....	95
7.4.2 Bodems in de Zandstreek.....	96
7.4.3 Bodems in de Leemstreek	98
7.4.4 Bodems in de Zandleemstreek	99
7.4.5 Bodems van de alluviale vlakten.....	100
7.5 Digitale bodemkaarten: geopunt en dov	101

Hoofdstuk 3. Fysische bodemeigenschappen

3.1 Granulometrie en bodemtextuur

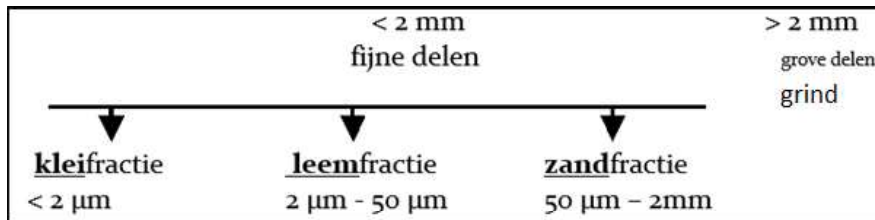
3.1.1 Korrelgroottefracties bepalen de bodemtextuur

Veruit het grootste deel (90-95 %) van de vaste fase van de bodem is samengesteld uit minerale bestanddelen, bestaande uit zeer kleine stukjes gesteenten of mineralen, dit als gevolg van de verwerking van gesteenten.

In verweringsmateriaal kunnen nog grote, onverweerde steenbrokken of keien voorkomen (stenige bodem). Afzettingen zijn over het algemeen veel fijner en bestaan uit zeer kleine korrels. In een zandgrond kan men duidelijk deze gesteentekorrels zien; ook kan men de grofste korrels tussen de vingers voelen schuren. In een zware kleigrond is het onmogelijk een afzonderlijke korrel te onderscheiden; natte klei voelt dan ook vettig aan, omdat de korrels zo fijn zijn. In een leemgrond kan men met veel moeite enkele korrels zien; de meeste zijn echter te klein om met het blote oog te kunnen onderscheiden worden. De afmetingen van de minerale bestanddelen lopen dus sterk uiteen, nl. van een kei tot een microscopisch klein deeltje.

De korrels worden volgens hun grootte in verschillende groepen ingedeeld, die men korrelgroottefracties noemt. Maatstaf is de micrometer: $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$.

In België onderscheidt men



De fracties worden kortweg ook zand, leem en klei genoemd. Deze fracties worden verder onderverdeeld in subfracties:

Klei: < 2μm	Leem: 2-50 μm	Zand: 50-2000 μm
Fijne klei: < 0,2μm	Fijne leem: 2-10μm	Zeer fijn zand: 50 - 100 μm
Grove klei: 0,2 -2μm	Middelmatige leem: 10-20μm	Fijn zand: 100-200 μm
	Grove leem: 20-50 μm	Middelmatig zand: 200-500 μm
		Grof zand: 500-1000 μm
		Zeer grof zand: 1000-2000 μm

In Nederland wordt de fractie < 16 μm slib of afslibbare fractie genoemd; de 2 - 50 μm fractie noemen zij de silt- of stoffractie en de fractie < 2 μm de klei- of lutumfractie. De fractie > 2 mm is de grindfractie.

3.1.2 Mineralogische samenstelling van de fracties in België

A. Grindfractie

Grind komt in de bodems van Laag- en Midden-België weinig of niet voor. Zij hebben trouwens geen invloed op de bodemkundige eigenschappen. In Hoog-België waar talrijke gesteentebrokken in de bodems voorkomen worden zij door de bodemkundigen als bijmenging beschouwd. Gesteentebrokken in de bouwvoor belemmeren in mindere of meerdere mate de bodembewerkingen en verlagen aldus de landbouwwaarde. De grove delen (> 2 mm) zijn volledig inactief in de bodem. Mineralen aanwezig in gesteentefragmenten kunnen door verwerking wel voedingsstoffen afgeven voor de planten. Dit is niet het geval voor kwartsgrind.

B. Zandfractie

De zandfractie bestaat voor 80 % uit kwarts (SiO₂), onder ons klimaat een haast onverweerbaar materiaal (zie verweringssequentie van Bowen) dat trouwens niet de minste voedingsstof inhoudt voor planten, en 20 % weinig (althans onder ons gematigd klimaat) of niet verweerbare mineralen zoals orthoklaas en muscoviet. Zandkorrels vormen het inactief skelet van de bodem. Het zand van Holocene ouderdom (Kwartair) is meestal heel kwartsrijk en bevat heel weinig verweerbare mineralen. Het zand van Tertiaire of Secundaire ouderdom is meestal veel rijker. Volgens de afzetting, kan het sterk verschillen naargelang het gehalte in kalk, glauconiet, mica's, ..

De zandkorrels, wegens hun vrij grote diameter, zullen vrij grote drainageporiën tussen de korrels vertonen. In zandgronden (gronden met een zandfractie van meer dan 80 %), zullen de grote drainageporiën des te meer toenemen naarmate de gemiddelde korreldeurmeter van het zand toeneemt. Tevens wordt de hoeveelheid waterbergingsporiën zodanig gereduceerd dat het neerslagwater vrij vlug en bijna volledig draineert en de oplosbare voedingselementen zoals NO₃⁻, N, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ naar beneden sleurt. Dit is bv. het geval voor de droge zandgronden van de terrasafzettingen van de Hoge Kempen. Deze droge zandgronden vertonen dan ook een zeer geringe landbouwwaarde. Het zijn chemisch arme gronden die erg gevoelig zijn voor droogteperiodes.

C. Leemfractie

De leemfractie (2 - 50 µm): in zuivere onverweerde löss schommelt het aandeel van de leemfractie in de korrelgrootte samenstelling rond de 80 %. In ons land is de grove leemfractie veel belangrijker dan de fijne leemfractie zoals blijkt uit de korrelverdeling, van onverweerde löss :

Tabel 7: Korrelgrootteverdeling van onverweerde löss

Korrelgrootteverdeling van onverweerde löss (%)			
0-2 µm	2-20 µm fijne + middelmatige leem	20-50 µm groe leem	50-2000 µm
15	15	65	5
<i>15% klei</i>	<i>samen 80% leem in löss</i>		<i>5% zand</i>

De leemfracties bevatten steeds heel wat meer verweerbare mineralen dan de zandfractie en dit geldt zeker voor de lössafzettingen in ons land daar hun verwerking slechts begonnen is 10.000 jaar geleden. Zuiver, onverweerd leem (löss) kan tot 12% (soms meer) kalk bevatten ('Ergeron'). Löss

bevat mineralogisch 88% kwarts, 1 tot 4% mica, 7 tot 12% veldspaat en 0,5% zware mineralen. De kleimineralen in de bodems ontwikkeld op löss zijn hoofdzakelijk illiet, vermiculiet en smectiet (en tussenvormen) ontstaan door verwerking van mica's. Het kaoliniet dat in deze bodems wordt aangetroffen, is doorgaans reeds aanwezig in het moedermateriaal.

Door de sterke bemesting en bekalking blijft in de leemgronden de invloed van de verwerking van de leemfractie op de plantenvoeding van minder belang. Wel is bekend dat Mg bemesting op zandleem en leemgronden overbodig is, wat niet het geval is voor zandgronden.

D. Kleifractie

De kleifractie ($< 2 \mu\text{m}$) van sedimenten bestaat hoofdzakelijk uit kleimineralen. De mineralogische samenstelling van klei varieert naargelang de ontstaanswijze. De samenstelling van verweringsklei van vaste gesteenten is heel uiteenlopend: de kleimineralen van een kalksteenverweringsklei bestaan onder meer uit smectiet (in de literatuur vaak aangeduid als montmorilloniet), deze van bepaalde schiefers uit kaoliniet. De aard van het kleimateriaal hangt niet alleen af van de rijkdom van het moedergesteente, maar ook van de graad van de verwerking. Nog meer uiteenlopend is de mineralogische samenstelling van de klei van Tertiaire ouderdom. Vooral de diepe ondergrond bevat hoofdzakelijk onverweerde mineralen zoals mica, glauconiet, .. doch de klei die deelneemt aan de bodemvorming is doorgaans verweerd, zodat aan de oppervlakte allerhande verweringsproducten aangetroffen worden. Alluviale mariene of fluviatiele klei-afzettingen zijn doorgaans heel rijke bodems met hoge kationenbezettingen. Naargelang het milieu waarin ze afgezet worden, kunnen ze heel rijk zijn aan Ca, Na, Mg of K. De kleimineralen behoren voornamelijk tot de groep van de smectieten.

De kleifractie is na humus de meest actieve fractie van een bodem zodat men in ons land reeds spreekt van een lichte kleigrond vanaf een kleigehalte van 17,5 %.

3.1.3 Bodemtexturen (grondsoorten)

A. Belgische textuurdriehoek

De gronden van Laag- en Midden-België bevatten dus vooral fijne korrelgroottefracties: zand, leem en klei. De textuur van een bodem wordt bepaald door het gehalte aan klei (0 - 2 μm), leem (2 – 50 μm) en zand (50 - 2000 μm).

Het % van elk van deze fracties kan weergegeven worden in een driehoeksgrafiek, waarin elk hoekpunt 100 % voorstelt van één van de drie fracties. Het nadeel van dergelijke grafiek is dat slechts 3 fracties kunnen voorgesteld worden. Door het Centrum voor Bodemkartering werd een textuurdriehoek op punt gesteld voor al de bodems van België (Fig. 15). In deze grafiek ligt het % van een bepaalde fractie op een rechte evenwijdig aan de driehoekszijde die tegenover het 100 % hoekpunt van de betreffende fractie ligt. Je kan ook de cijferdrukrichting van de percentagegetallen (10, 20, 30, ...) gebruiken om correct af te lezen hoe groot het aandeel van de fractie op die zijde is. De drie rechten snijden mekaar in een punt dat de samenstelling van de betreffende textuur aangeeft.

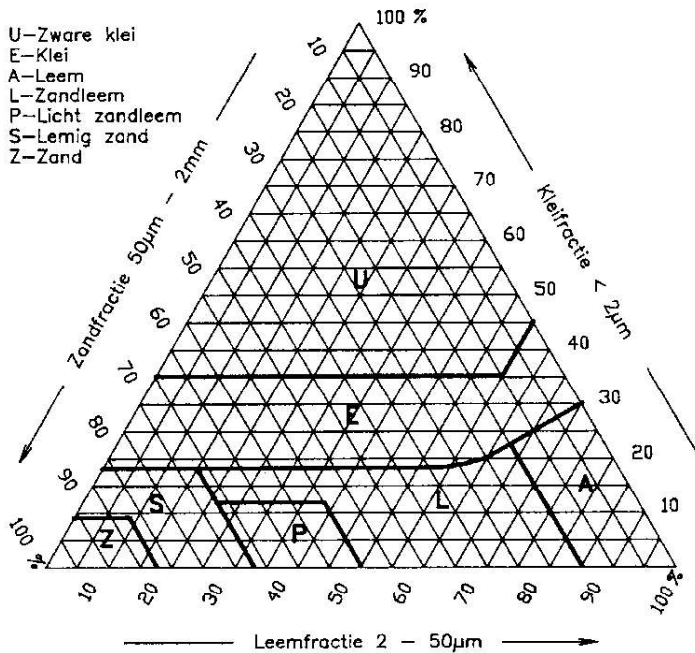


Fig. 15 Belgische textuurdriehoek

In de Belgische textuurdriehoek zijn zones afgebakend die de verschillende textuurklassen of grondsoorten voorstellen. Deze zones zijn grosso-modo als volgt ingedeeld:

- 35 % (0 - 2 µm fractie) zone U; textuur: zware klei
een bodem waarvan de textuur van de bovengrond (0 – 20 cm) in de zone U valt wordt zware kleigrond genoemd
- < 35 % en > 17,5 % (0 - 2 µm fractie) zone E; textuur: klei
een bodem met bovengrondstextuur in zone E wordt kleigrond genoemd

De eolische¹ gronden werden in zones ingedeeld volgens het zandgehalte (fractie > 50 µm)

- < 15 % zone A; textuur: leem
een bodem met bovengrondstextuur in zone A wordt leemgrond genoemd
- < 50 % en > 15 % zone L; textuur: zandleem
een bodem met bovengrondstextuur in zone L wordt zandleemgrond genoemd
- < 67,5 % en > 50 % zone P; textuur: licht zandleem
een bodem met bovengrondstextuur in zone P wordt licht zandleemgrond genoemd
- < 82,5 % en > 67,5 % zone S; textuur: lemig zand
een bodem met bovengrondstextuur in zone S wordt lemig zandgrond genoemd
- 82,5 % zone Z; textuur: zand
een bodem met bovengrondstextuur in zone Z wordt zandgrond genoemd

Een bodemkundige is in staat door palperen de bodemtextuurklassen te onderscheiden voor zover hij zijn veldschattingen regelmatig test aan de hand van de analysegegevens van het laboratorium. Een materiaal met U-textuur is zeer plastisch, moeilijk kneedbaar en voelt vetig aan in vochtige toestand. Droog is het steenhard. Een materiaal met E-textuur is plastisch, kneedbaar en voelt

¹ D.w.z. door de wind afgezet

eveneens vettig aan. Een materiaal met A-textuur voelt meelachtig aan terwijl in een zandgrond de korrels duidelijk te voelen zijn.

Gronden die meer dan 15 % grind bevatten worden stenige gronden genoemd en aangeduid door het symbool G. Gronden met meer dan 30 % organisch materiaal noemt men veengronden; het zijn zg. organische gronden, aangeduid met het symbool V.

B. Lichte versus zware grond

Zand-, lemig zand- en licht zandleemgronden worden in de praktijk lichte gronden genoemd omdat zij gemakkelijk en vroeg te bewerken zijn.

Bij de lichte gronden werden de P-gronden gescheiden van de S-gronden daar op P-gronden de eerste tarweteelt nog mogelijk is; bovendien zijn licht zandleemgronden ideaal voor de tuinbouw, zandgronden verstuiven gemakkelijk, lemig zandgronden weinig of niet. Z- en S-gronden eisen de zwaarste bemestingen.

Leemgronden en vooral kleigronden zijn reeds moeilijk te bewerken en worden zware gronden genoemd. Zandleemgronden, maar vooral leemgronden, zijn de beste gronden wat het opbrengstvermogen betreft. De zware kleigronden zijn goed tot zeer goed zolang de bovengrond kalkhoudend is (zie structuur) vaak zijn zij te nat en daarom aangewezen voor weiland.

C. Textuurprofiel

Onder textuurprofiel verstaat men de verticale opeenvolging van grondsoorten tot op 120 cm diepte. Soms komt slechts één grondsoort voor, dan is het textuurprofiel homogeen. In andere gevallen bestaat de bodem uit twee (soms drie) grondsoorten die mekaar opvolgen, b.v. een zand-bovengrond op een klei-ondergrond, leem op lemig zand, klei op veen enz. Een bepaalde bodem wordt nochtans altijd volgens de grondsoort van zijn bovengrond gedefinieerd. Door "zandgrond" verstaat men grond waarvan de bovenste laag uit zand bestaat, zelfs als op 20 cm diepte een kleilaag voorkomt. De ondergrond met afwijkende textuur t.o.v. de bovengrond wordt substraat genoemd als hij tussen 20 en 120 cm begint.

Men onderscheidt de volgende substraten: s- : zandsubstraat (groepeert de texturen Z, S, P), l- : leemsubstraat (groepeert de texturen L, A), u- : kleisubstraat (groepeert de texturen E, U), w- : klei-zandsubstraat, v- : veensubstraat (ondergrond V), g- : grindsubstraat.

Gronden met een vast gesteente op minder dan 80 cm worden als ondiepe bodems beschouwd. Diepe bodems zijn homogene gronden tot op minstens 80 cm en liefst tot op 120 cm diepte.

D. Belang van de bodemtextuur

1. beïnvloedt bodembewerkbaarheid:
lichte (zandige) gronden gemakkelijker bewerkbaar dan zware (klei) gronden
2. beïnvloedt het poriënvolume
bepalend voor bodemverluchting en waterbergend vermogen
3. beïnvloedt de bodemopwarming
zandige (drogere) gronden warmen sneller op dan kleiige (nattere) gronden
4. bepaalt het ophoudings- en uitwisselingsvermogen van voedingsstoffen

meer kleiige bodems zijn 'rijker' dan zandgronden en hebben doorgaans een grotere opbrengst

5. bepaalde gewassen zijn textuurgebonden:
asperge groeit best op zandgrond, vele groenten verkiezen een lichte zandleembodem.

Let op: 1, 2, 3 en 4 worden mede bepaald door het humusgehalte!

3.2 **Bodemdichtheid en bodemaggregaten**

3.2.1 **Een goede bodemstructuur door poriekwaliteit en aggregaatstabiliteit**

Met bodemstructuur bedoelen we de manier waarop bodemdeeltjes zich in aggregaten hebben verenigd, en de manier waarop die aggregaten in de ruimte gerangschikt zijn. De wijze waarop de grondkorrels gerangschikt zijn, afzonderlijk of aan mekaar klevend tot aggregaten, bepaalt het aantal en de vorm van de poriën in de bodem, d.w.z. de verhouding bodem/lucht + water. Een bodemstructuur is goed wanneer door de opbouw van stabiele aggregaten een gunstige verhouding tussen drainageporiën en nuttige waterbergingsporiën verzekerd is (cf. later).

De aggregaten zijn stabiel wanneer zij niet uiteenvallen, onder invloed van de regenslag op het bodemoppervlak of bij oververzadiging met water. Het is bewezen dat de stabiliteit van de bodemaggregaten voornamelijk afhankelijk is van het humusgehalte of van de organische bemesting. Deze organische bemesting, zoals stalmest, activeert de biologische activiteit. De bacteriën scheiden slijmerige stoffen af die de bodemcomponenten aan elkaar kitten. Anderzijds weten wij dat kleimineralen en humus, negatief geladen bodemcolloïden zijn die, door twee- of driewaardige kationen zoals Ca^{2+} , Fe^{3+} en Al^{3+} kunnen uitgevlokt worden en hierdoor neerslaan onder vorm van micro-aggregaten. Voor onze bodems onder gematigd vochtig klimaat is Ca^{2+} van groot belang; voornamelijk bij kleigronden is het effect van bekalking zeer gunstig op de bodemstructuur. Bekalking zal daarbij eveneens de humificatie bevorderen en de humusmineralisatie afremmen.

Door sommige onderzoekers wordt de stabiliteit en de grondige menging van humus en klei verklaard door de werking van regenwormen. Voor hun voeding zouden regenwormen tot 30.000 kg/ha/jaar, aan plantenresten en gronddeeltjes samen opnemen; in hun darmkanaal worden de minerale en organische bestanddelen innig vermengd. Anderzijds boren de regenwormen tot op grote diepte ontelbare verticale gangen van enkele millimeter doormeter, waardoor de bodem verlucht en gedraineerd wordt. De wortels zullen ook bij voorkeur de regenwormgangen volgen omdat de wanden hiervan bekleed zijn met een dun humuslaagje, rijk aan voedsel. In vruchtbare zandleem- en leemgronden, die regelmatig een zware dosis stalmest toegediend kregen, kunnen regelmatig op een halve meter diepte, 200 à 400 wormgangen per m^2 geteld worden.

Structuur gaat dus in feite om twee zaken: de rangschikking en binding van de bodemdeeltjes. De rangschikking betreft de ligging van de bodemdeeltjes ten opzichte van elkaar en het aantal en de grootte van de poriën tussen de deeltjes. De binding bepaalt vooral de stabiliteit van de aggregaten: vallen de aggregaten uiteen bij het uitoefenen van druk of bij waterverzadiging.

Vooraleer over te gaan naar de beschrijving van de structuurtypes, gaan we eerst aandacht besteden aan enkele bodemfysische aspecten, belangrijk voor de bodembewerking.

3.2.2 Dichtheid en poriënvolume

Samengaand met de poriën in de bodem zijn de volgende begrippen van belang: dichtheid (soortelijk gewicht) en poriënvolume.

A. *Werkelijk soortelijk gewicht: SG*

De dichtheid of het werkelijk soortelijk gewicht SG is de massa in g per cm³ (of in kg per m³) vaste bodembestanddelen: $SG = G/vol = g/cm^3 = kg/dm^3$.

Het werkelijk SG van een bodem is functie van de verhouding tussen de minerale en de organische bestanddelen, daar beide componenten een verschillende dichtheid hebben.

Voor ons land bedraagt de gemiddelde samenstelling van de leem- en zandfractie : kwarts (SG = 2,65 g/cm³) meestal meer dan 80 %, orthoklaas (SG = 2,58 g/cm³) 10 à 20 %, muscoviet (SG = 2,82 g/cm³) enkele %.

De bijzonderste kleimineralen, die de kleifractie uitmaken, nl. illiet en kaoliniet, hebben eveneens een SG van ongeveer 2,65 g/cm³. Het SG van de minerale bestanddelen, bepaald met een pycnometer, bedraagt meestal ongeveer 2,65 g/cm³.

Een waarde van het SG van de minerale bestanddelen groter dan 2,65 g/cm³ wijst doorgaans op een belangrijk gehalte (10 à 20 %) aan ijzeroxiden, o.a. goethiet en haematiet met een respectievelijk SG van ongeveer 4 g/cm³ en 5 g/cm³. Deze ijzeroxiden komen voornamelijk voor in tropische bodems nl. de oxisolen en ultisolen.

Voor humus in droge toestand wordt een gemiddeld SG aangenomen van 1,45 g/cm³. Hoe meer organische stof een grond bevat, des te lager is dus zijn dichtheid.

Het SG van de vaste bodembestanddelen kan men berekenen uit de dichtheid van de organische stof en van de minerale delen, terwijl voorts de gehalten aan humus en minerale delen bekend moeten zijn.

Zijn de gehalten organische stof en minerale bestanddelen gegeven in volumeprocenten, dan is het SG van de vaste bodemdeeltjes te berekenen met de formule:

$$SG_{\text{vaste bodemd.}} = \frac{(\text{vol \% org.stof} \times SG_{\text{org. stof}}) + (\text{vol \% min.best.} \times SG_{\text{min}})}{100}$$

Nota : voor humusgehalten lager dan 20 gewicht % kan men het SG van een grond bij benadering berekenen met de empirische formule: $SG = 2,65 - (0,02 \times \% \text{ humus})$.

B. Schijnbaar Soortelijk Gewicht: SSG

Het schijnbaar soortelijk gewicht SSG of de dichtheid van een ongestoorde bodem heeft betrekking op de grond als geheel, dus vaste bestanddelen en poriën samen. Het SSG is het gewicht in g per cm³ grond in zijn ongestoorde natuurlijke toestand, doch vrij van vocht (ovendroog):

$$\text{SSG} = \frac{\text{gewicht ovendroge ongestoorde grond}}{\text{volume grond}}$$

Daar poriën geen massa hebben, zal een grond met veel poriën een geringer SSG hebben dan een minder poreuze grond. Voor kleiig-lemige texturen varieert het s.s.g. van 1,1 - 1,6 g/cm³; voor zandige texturen van 1,3 - 1,7 g/cm³ en voor compacte lagen van 1,7 - 2 g/cm³.

Het ssg van tuinbouwsubstraten moet gelegen zijn tussen 0,05 en 0,250 g/cm³. Te zware materialen zijn moeilijk te verhandelen, te lichte materialen hebben een onvoldoende stabiliteit van de potplanten tot gevolg.

Bij de bepaling van het s.s.g. is de monstername zeer belangrijk. Bij de monstername mogen er zich geen volume veranderingen voordoen (de zgn. ongestoorde monstername). Nochtans variëren in de loop van het jaar de vochtgehalten zodat de grond zwelt en krimpt; hierdoor varieert dan eveneens het volume. De maximale zwellingstoestand van de bodem doet zich normaal voor in de lente, nadat in de winter het bodemvolume in evenwicht gekomen is met het vochtgehalte. Op dit tijdstip is het SSG dan ook het meest representatief.

Het volume moet wegens de variabiliteit van de bodem voldoende groot en juist gekend zijn (minimum 100 cm³). Daartoe gebruikt men open stalen of koperen cilinders of ringen die in de grond geduwd worden.

C. Totaal Poriënvolume : TPV

Het totaal poriënvolume TPV (porosity, porosité) is het deel van het grondvolume dat door poriën wordt ingenomen. Het wordt uitgedrukt in een fractie van het grond- of substraat-volume.

Uit het SG en het SSG kan het TPV berekend worden, als volgt:

$$\text{TPV} = 100 (1 - \text{SSG}/\text{SG}) \quad \text{vol \%}$$

$$\text{TPV} = 100 \frac{(\text{SG} - \text{SSG})}{\text{SG}} \quad \text{vol \%}$$

$$\text{Het vol \% vaste bestanddelen} = (\text{SSG}/\text{SG}) \times 100$$

D. Belang van de bepaling van SSG en TPV

Zoals wij gezien hebben kan uit het SSG en SG het totaal poriënvolume berekend worden. Het SSG neemt af naarmate het humusgehalte stijgt; omgekeerd kan het humusgehalte, bij benadering, afgeleid worden uit de SSG-waarden. Tabel 8 illustreert het verband tussen humusgehalte en SSG-waarden zoals die werden gevonden voor onze polderkleien.

Tabel 8 Humusgehalte, SSG (g/cm³) en TPV (%) in polderkleien

% humus	SSG	TPV
2,3	1,504	42,2
5,7	1,316	48,1
10,7	1,139	53,2
14,7	0,988	58,1

In veengronden is het SSG lager dan 0,3 g/cm³ om bij zeer weinig omgezette veengronden zelfs lager uit te vallen dan 0,1 g/cm³. SSG-waarden begrepen tussen 1,6 g/cm³ en 1,9 g/cm³ worden gevonden in verdichte horizonten zoals ploegzolen, gedegradeerde bouwvoren (bv. in blekgronden), enz... Deze horizonten zijn dan meestal ondoordringbaar voor water en wortels.

3.3 Structuurvormen

3.3.1 Structuur van de bovengrond

In de bovengrond komen hoofdzakelijk twee soorten van structuur voor: korrelstructuur en kruimelstructuur (Fig. 16).

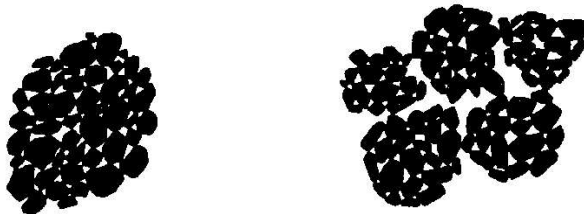


Fig. 16 Voorstelling van de korrelstructuur (links) en de kruimelstructuur (rechts)

Bij de korrelstructuur liggen de grondkorrels afzonderlijk naast en op mekaar; men kan ze vergelijken met een hoop graankorrels. Dat is een slechte structuur, waarbij het poriënvolume klein is (25 vol. %). Een korrelstructuur wordt aangetroffen in humusarme zandgronden. Onder cultuur liggen de korrels los naast elkaar zodat droge zandgronden gemakkelijk verstuiven. Deze verstuiving stelt men in het voorjaar regelmatig vast in de zandstreek. Vooral wanneer de grond nog onbedekt is en hij na de bewerking (ploegen, eggen, rollen) een losse korrelstructuur vertoont.

Bij de kruimelstructuur kleven de gronddeeltjes aan mekaar tot aggregaten en vormen aardkluitjes of kruimels met afgeronde vormen, die ordeloos op mekaar liggen. Dit is een goede structuur, waarbij het poriënvolume groot is (60 vol. %). Een mooie kruimelstructuur vindt men o.m. in uitwerpselen van regenwormen of in molshopen.

3.3.2 Structuur van de ondergrond

In tegenstelling tot de kruimelstructuur met zijn zeer onregelmatige aggregaten van enkele mm³, treffen we dieper in het bodemprofiel aggregaten aan met meer geometrisch-regelmatige vormen,

die goed bij elkaar aansluiten. Deze aggregaten zijn ook beduidend groter, van enkele cm^3 tot dm^3 . De meest voorkomende vormen zijn de prismatische, de platige en de blokkige structuren, zoals weergegeven in Fig. 17.

Bij de prismatische structuren bestaan de structuurelementen uit prisma's. Hierbij is de verticale as van de aggregaten groter dan de horizontale assen. Dit type structuur komt voor in de klei- en leembodems, net onder de bouwvoor. Binnen de prisma's komen weinig poriën voor. De prisma's kunnen verscheidene dm's hoog zijn.

Bij platige structuren zijn horizontale structuurelementen te onderscheiden. Deze hebben een afgeplatte, soms schubachtige vorm. De verticale as is veel kleiner dan de horizontale assen. Dergelijke structuur treft men o.m. aan op slempige gronden. Bij het opdrogen krullen de platen omhoog. Men treft ze ook aan in de ploegzool, waar de aggregaten slechts enkele mm's dik zijn. Plaatstructuren hebben meestal weinig poriën. Ze storen dan de afvoer van water en zijn een belemmering voor de wortelontwikkeling.

Bij een bodem met blokkige structuren hebben de aggregaten een kubusachtige vorm, waarbij de 3 assen ongeveer even groot zijn. Prismatische structuurelementen vallen dikwijls uiteen in blokkige aggregaten. Wanneer de hoeken scherp zijn spreekt men van een hoekige blokstructuur. Dergelijke aggregaten ontstaan in bodems met veel zwellende kleien. In meer zandige en lemige bodems treft men doorgaans aggregaten aan met meer afgeronde hoeken: dit is de subhoekige blokstructuur.

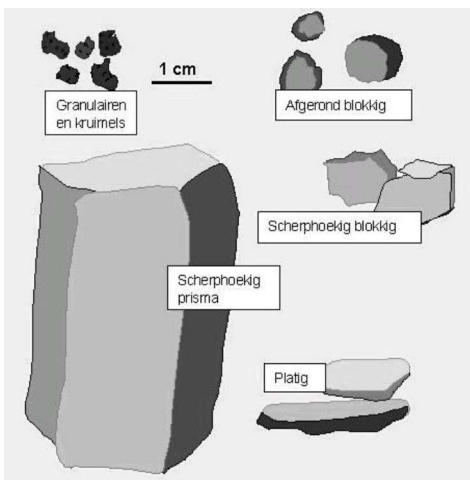


Fig. 17 Voorstelling van een prismatische, platige en blokkige structuur

3.3.3 Invloedsfactoren op de bodemstructuur

A. Belang van de structuur

De betekenis van structuur ligt vooral in de aanwezigheid van poriën en holten tussen de vaste bodemdeeltjes, dit om de volgende redenen:

- er kan lucht en warmte in de bodem dringen;
- er is een goede beworteling mogelijk;
- er kan water in de grond vastgehouden worden;
- een overmaat aan water kan worden afgevoerd.

Zuurstofrijke lucht is nodig voor de ademhaling van de gewassen en de bodemdieren. Aanvoer van verse lucht vindt veelal plaats via de grotere poriën en holten. Wanneer het vol% lucht in de bodem < 10 à 15 % bedraagt, zullen de gewassen aanzienlijk minder groeien (zie verder). Dit varieert van gewas tot gewas: bv. aardappelen en bloemkolen vereisen meer lucht in de bodem dan granen en gras.

De wortels profiteren van bestaande poriën en gangen. Wanneer de structuur van de bodem goed is, zullen de wortels in de bovengrond door een betere vertakking veel beter in staat zijn voedingsstoffen op te nemen. Een goede structuur in de ondergrond laat de wortels toe dieper door te dringen, waardoor de gewassen minder last van droogte zullen ondervinden.

Water is immers nodig gedurende de ganse groeiperiode van de gewassen. Tijdens droge perioden moet het gewas water kunnen opnemen dat in de bodem is opgeslagen. Dit gebeurt vooral in de kleine poriën (zie verder). Een overmaat aan water is echter heel schadelijk voor de gewassen. Uit veel poriën wordt dan de lucht verdreven, waardoor de wortels afsterven.

Een behoud van een goede structuur en het vermijden van structuurverval is daarom onontbeerlijk en aangepaste cultuurtechnische maatregelen zijn daarom noodzakelijk.

B. Bodembewerking - Klimaat

Door het ploegen verhoogt men aanzienlijk de macroporositeit van de bodem. De slagregens verslempen de gronden opnieuw; door vorst verbrokkelen de kluiten, waardoor het poriënvolume opnieuw verhoogt.

Ploegen in natte omstandigheden is steeds nefast. De door het gewicht van de tractor gecompacteerd bodem, gaat bij het ploegen over in grote kluiten, die bij gemis aan vorst, steenhard kunnen worden. Anderzijds ontstaat door het slippen van het wiel van de tractor in de ploegvoor een verstikkende ploegzool. Een ploegzool is een dun (2 à 3 cm) verhard laagje op ploegdiepte (± 25 cm), dat toegesmeerd is en hierdoor slecht doorlatend is voor water en wortels. Vooral gewassen met penwortels, zoals suikerbiet, zijn hiervoor zeer gevoelig. De penwortel vertakt zich, wat achteraf schadelijk uitvalt voor de opbrengst.

Wateroverlast in de bouwvoor, veroorzaakt door een ploegzool, bederft de bodemstructuur eveneens. Door een ondergrondwoeler in te zetten kan de bodemlaag van 20 tot 35 cm diepte opgebroken worden, op voorwaarde dat die bewerking onder droge omstandigheden gebeurt. Voor suikerbieten of aardappelen worden lichtere gronden zoals zandleemgronden beter na de winter geploegd terwijl het aan te raden is de grond tijdens de winter bedekt te houden door een grondbedekkend tussengewas zoals wikke, klaver of raaigras.

Zwaardere gronden zoals leemgronden en kleigronden worden best in de herfst geploegd omdat zij in de lente moeilijk opdrogen en te lang plastisch blijven om te ploegen.

C. Organische bemesting

Een voldoende organische bemesting is noodzakelijk voor het behouden van een goede bodemstructuur. Dit kan gebeuren door:

- het opnemen van een groenbemesting in de rotatie;
 - bv. in de leemstreek : suikerbiet, wintertarwe, winter-gerst-raaigras;
 - bv. in de zandstreek : maïs, wintergerst, raaigras;
- het toedienen van stalmest of drijfmest. Door dergelijke organische meststoffen worden de bodems met een zeer gevarieerde microbiële cultuur ingeënt;
- het inschakelen in de rotatie, indien mogelijk, van tijdelijk grasland;
- het inploegen van de oogstresten zoals bietenbladeren, stro van graangewassen zoals dit op grote schaal gebeurt op grote bedrijven in de leemstreek;
- het toedienen van compost.

D. Bekalking

De zwaardere bodems en vooral de kleigronden zijn zeer dankbaar wat hun structuur betreft, voor een regelmatig bekalken. De beste en goedkoopste bekalkingswijze voor een leem- en kleigrond is de toediening om de 6 à 8 jaar van 30 à 40 ton schuimkalk per ha. Een dosis van 35 ton vochtige schuimkalk komt nagenoeg overeen met de toediening van 15.000 kg fijn verdeeld CaCO_3 , 250 kg P_2O_5 , 100 kg N onder de vorm van 2.500 kg organisch materiaal, rijk aan ruwe eiwitten en 200 kg suiker.

In de zandleemgronden worden in de rotatie om de zes jaar gewoonlijk aardappelen geplant. Daar CaCO_3 schadelijk is voor dit gewas blijft het aan te bevelen de 30 ton schuimkalk te strooien onmiddellijk na de aardappelteelt (door deze bekalking spaart men humus!).

E. Voorzorgen bij de minerale bemesting

Men dient het gebruik van belangrijke hoeveelheden Na-rijke kunstmeststoffen of ruwe kalizouten (die rijk zijn aan NaCl) te vermijden. Natriumionen vertonen een dikke hydratatiemantel waardoor ze sterk peptiserend inwerken op de klei, waardoor structuurverval kan optreden. Dit resulteert in de vorming van een korst aan de oppervlakte. Deze belet de verluchting van de bodem, de infiltratie van het water en de kieming van de zaden.

F. Maatregelen tegen erosie en compactie

Erosie komt in een apart hoofdstuk aan bod. Compactie wordt via de slides besproken.

Hoofdstuk 4. Water in de bodem

4.1 Belang van het water in de bodem

Een totaal uitgedroogde bodem is een tijdelijk dode bodem. Een met water verzadigde of overstromde grond is dat ook. Door teveel water wordt de lucht verdrongen en wordt het leven onmogelijk voor organismen die lucht behoeven zoals wortels en micro-organismen.

Naast de transpiratie door de plant is er ook verdamping door de grond zelf: 'evaporatie'. Beide vormen samen de evapotranspiratie. Om te verdampen verbruikt het water een zekere hoeveelheid warmte, zodat het water de warmteregelaar is van de bodem. In de zomer zal het verdampende water beletten dat de temperatuur van de bodem te hoog oploopt. In het voorjaar echter is wateroverlast er de oorzaak van dat een natte bodem zeer traag opwarmt.

Het water beïnvloedt tevens sterk de structuur van de bodem. Indien een zandgrond volledig uitgedroogd is, kleven de zanddeeltjes niet meer aan elkaar en zal de grond stuiven. Zware klei wordt bij uitdroging steenhard. Is de bodem verzadigd met water, dan vloeit hij open tot een pappige, slijkerige massa, waarin alle leven moet verstikken. Bij een goed vochtgehalte kunnen de bodemdeeltjes aan mekaar kleven, en een luchtige maar stabiele structuur toelaten.

4.2 Waterbalans

Watertransport in de onverzadigde zone of zone boven de grondwatertafel, is vnl. verticaal. Het speelt echter een doorslaggevende rol in de verdeling van het water in de hydrologische balans over het oppervlaktewater, het grondwater en het bodemwater (Fig. 18).

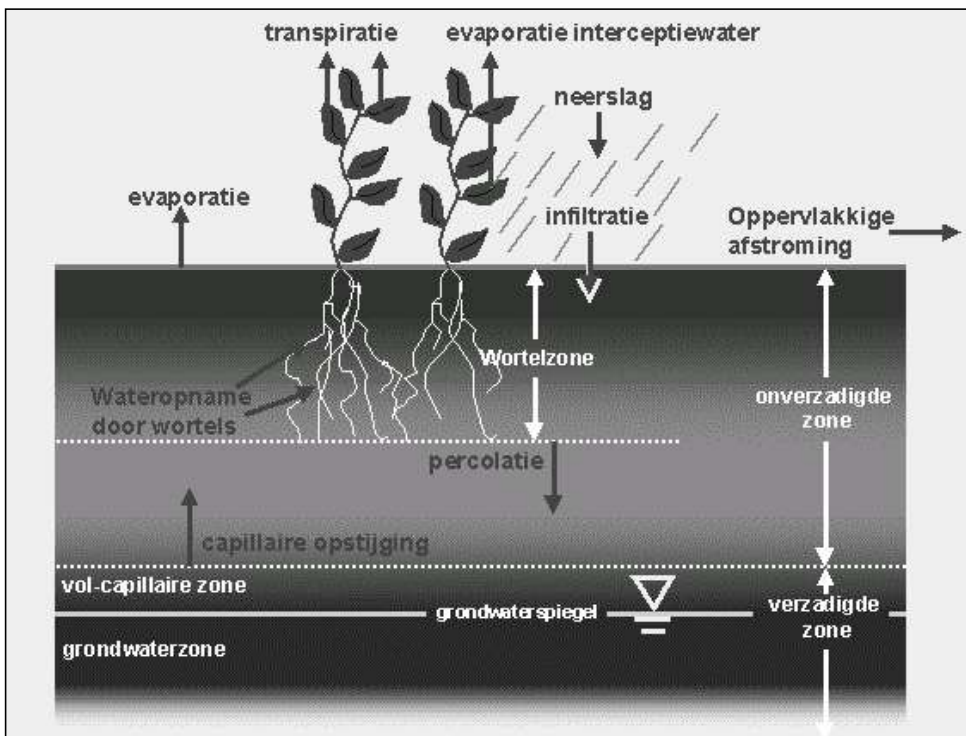


Fig. 18 De waterbalans

Van de vallende neerslag blijft het interceptiewater aan de plant hangen, dat verdampt later weer. De rest zal vooral in de grond infiltreren en een ander deel wordt langs het oppervlak afgevoerd. Wat infiltreert, vult de vochtvoorraad in de wortelzone aan. Hieruit vindt weer onttrekking van water door plantenwortels plaats, als gevolg van de bladtranspiratie.

Infiltrerend water dat niet door de wortels wordt opgenomen kan via percolatie worden afgevoerd. In tijden van droogte kan echter ook wateraanvoer via capillaire opstijging plaatsvinden. Afvoer naar het grondwater is dus de resultante van percolatie en capillaire opstijging.

4.3 Water in het bodemprofiel

In het bodemprofiel zijn er drie zones met water zoals weergegeven in Fig. 19.

4.3.1 **Grondwaterzone**

Wanneer men een put maakt in een laag, vlak gebied, zal er op max. enkele m diepte water inkomen; dat is het grondwater. Het grondwateroppervlak, dat zich nagenoeg horizontaal in de bodem voortzet, heet grondwatertafel of grondwaterspiegel. Hieronder is de grondwater-zone: alle poriën zijn met water gevuld zodat er geen lucht meer is en wortels afsterven.

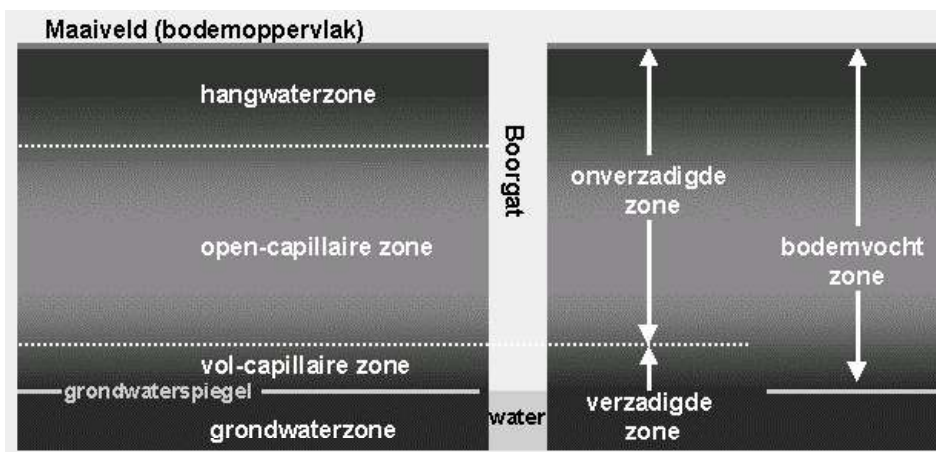


Fig. 19 Water in de bodem

4.3.2 **Capillaire zone**

Uit de grondwatertafel stijgt het water omhoog in de talrijke openingen die door fijne kanaaltjes onderling verbonden zijn, dat als gevolg van de capillaire kracht. De hoogte boven de grondwatertafel tot waar het capillaire water kan stijgen of capillaire zone hangt af van de grootte van de kanaaltjes en poriën, die vooral bepaald wordt door de grondsoort (Fig. 20, links). De hoogte is gering bij de grove grondsoorten (zand), matig bij fijnere grondsoorten (leem) en zeer groot bij de fijnste grondsoorten (klei). De stijgsnelheid van het capillaire water is echter trager in fijne grondsoorten dan in grovere (Fig. 20, rechts).

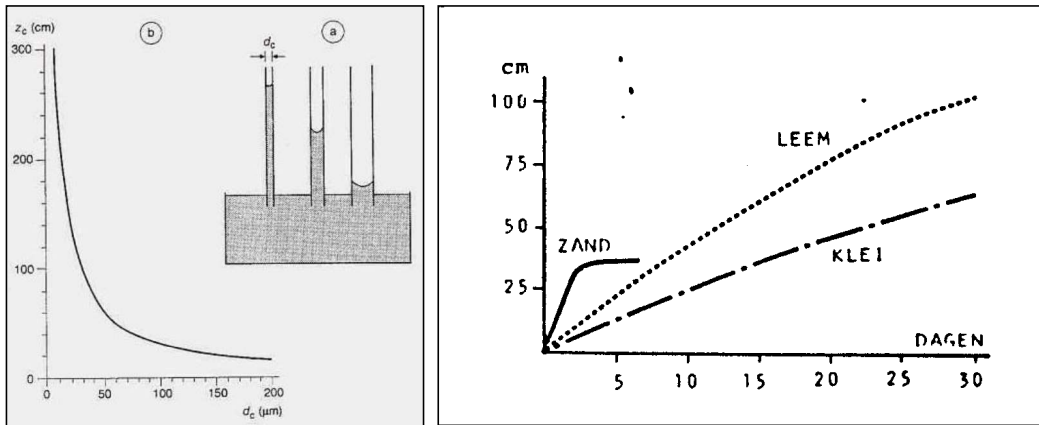


Fig. 20 De hoogte van capillaire opstijging z_c in buisjes van verschillende diameter d_c (links). De capillaire stijghoogte vanuit de grondwatertafel in drie verschillende grondsoorten (rechts).

Zand: het water bereikt snel de maximale stijghoogte, die echter gering is.

Leem: het water stijgt matig snel en bereikt een aanzienlijke hoogte.

Klei: het water stijgt zeer langzaam en bereikt slechts na lange tijd zijn maximale hoogte.

In haar onderste deel, nabij de grondwatertafel, bevat de capillaire zone veel water; slechts de grootste poriën en de holten zijn met lucht gevuld. Dat is de gesloten capillaire zone, waar de meeste wortels afsterven. In haar bovenste deel bevat de capillaire zone meer lucht; alleen nog in de nauwste capillairen stijgt het water: de open-capillaire zone, hierin kunnen wortels leven.

4.3.3 Hangwaterzone

Het gedeelte van de grond boven de capillaire zone kan eveneens water bevatten, dat tijdens het doorsijpelen bleef hangen in de fijnste capillairen en poriën of bleef kleven aan de colloïden (klei en humus). Dat is het hangwater of aanklevingswater. Zand kan weinig water ophouden, leem veel en klei zeer veel.

4.4 Binding of retentie van water in de bodem

Wanneer een droge grond flink nat gemaakt wordt zal hij na het beëindigen van de watertoevoer niet zo spoedig weer droog zijn. Een vrij grote hoeveelheid water blijft, tegen de zwaartekracht in, aan de grond hangen. Het is zelfs zo, dat een grond die voor het gevoel droog is, toch nog vocht bevat. Er moeten dus bepaalde krachten in het spel zijn die deze binding van water aan de grond bewerkstelligen. Naar de aard en sterkte van deze krachten komt water op verschillende manieren in de grond voor:

- (a) in en rond de vaste bodemdeeltjes (als zwel- en adhesiewater; sterk gebonden);
- (b) gebonden aan de in de grond aanwezige zouten;
- (c) in de fijne poriën en gangetjes van de grond (capillair gebonden water);
- (d) in de grotere holten en gangen van de grond (niet-gebonden of vrij water).

Het water dat zich in de vaste bodemdeeltjes bevindt (zwelwater), is hierin zeer sterk gebonden. Klei en humus hebben het vermogen op deze manier water vast te houden. Ook het water dat als huidje rond de bodemdeeltjes is gehecht (adhesiewater), zit zeer vast. Elke grond bevat een zekere hoeveelheid zouten, en zouten trekken door osmose water aan.

Deze vochtaantrekking kan zo groot zijn dat het gewas te weinig vocht kan opnemen en dat er zelfs vocht uit de wortelcellen wordt getrokken, waardoor de plant doodgaat. Men ziet dit wel in verzoute kasgronden, op zoute kwelplekken en percelen met late voorjaarsbemesting.

In de fijne poriën en nauwe gangen die zich tussen de gronddeeltjes bevinden worden kleine waterkolommen sterk vastgehouden. Dit door (1) de sterke adhesiekrachten tussen de wanden van de poriën en de watermoleculen en (2) de cohesie tussen de watermoleculen onderling: dat is capillair gebonden water. Hoe smaller de nauwe gangen (capillairen) zijn, hoe steviger het water wordt vastgehouden. Door hun zuigkracht kunnen de planten uit capillairen vocht opnemen. Bij wateronttrekking verliezen de grote poriën en gangen het eerste het vocht.

In de brede gangen en de grotere holten van de grond daarentegen wordt geen water vastgehouden. Wanneer deze holten bij grote regenval of door opstijgend grondwater gevuld worden, zullen ze direct weer leeglopen als de regen ophoudt of het grondwater weer zakt. De zwaartekracht is hier groter dan de zuigkracht van de grond. Dit water wordt daarom niet-gebonden of vrij water genoemd. De onder (a) en (b) genoemde krachten zijn voor de vochthuishouding meestal van weinig betekenis. Wij hebben in hoofdzaak te maken met de capillaire en de zwaartekracht.

In verband met de sterkte van de binding van het water zijn volgende begrippen van belang: verzadigd, veldcapaciteit of veldvochtigheid, verwelkingspunt, beschikbaar water.

4.5 Bodemvocht karakteristieken of pF-curven

Het gebruik van de pF-waarde is bedoeld om de zuigkrachten uit te drukken.

De pF wordt gedefinieerd:

$$pF = \log_{10} \text{drukhoogte (cm water)}$$

pF = maat voor de kracht waarmee het water gebonden is

Dit betekent bv. dat met een hoogte van 100cm water een pF-waarde van 2 overeenstemt. Aangezien pF een logaritmische functie is kan een zuigspanning = 0 niet exact weergegeven worden op de pF schaal. Conventioneel neemt men aan dat pF = 0 overeenkomt met 1cm drukhoogte ($9,80 \times 10^{-4}$ bar of $9,80 \times 10^{-5}$ MPa).

Het verband tussen de drukhoogte en het vochtgehalte wordt de vocht karakteristiek of ook wel de waterretentiecurve genoemd. Dit verband is voor iedere grondsoort weer anders en dient dus voor elke grondsoort afzonderlijk te worden bepaald (Fig. 21).

4.6 **Veldcapaciteit (VC)**

We noemen een grond met water verzadigd, als alle gangen en holten, grote zowel als kleine, gevuld zijn met water. Dat is het geval in de grondwaterzone en in de bovengrond onmiddellijk na een langdurige en hevige regenval. Het watergehalte is dan maximaal en komt overeen met het totaal poriënvolume. Waterverzadiging stemt overeen met een $pF=0$ (geen zuigkracht).

Veldcapaciteit is de term die gebruikt wordt om het maximale watergehalte weer te geven dat in de bodem achterblijft na vrije drainage van het overtollige water onder invloed van de zwaartekracht. In de praktijk betekent VC gewoonlijk het watergehalte in een bodemhorizont 1 à 2 dagen na overvloedige regens, waarbij het drainagewater onder invloed van de zwaartekracht verdwenen is. Het is ook nagenoeg het watergehalte dat in onze streken bij het begin van de *lente* in de bodem achterblijft nadat het overtollige water dat zich in de winter opgehoopt heeft uit het bodemprofiel is weggedraineerd.

Een grond op veldcapaciteit kan nog wel water verliezen. De gewassen zijn namelijk in staat met hun wortels een deel van het in de fijne poriën en gangetjes gebonden water op te nemen. Hiertoe oefenen ze een kracht uit die groter moet zijn dan de kracht waarmee het water in deze fijne capillairen is gebonden. De zuigkracht die planten kunnen uitoefenen is verschillend. Erwten en bonen hebben b.v. een vrij lage zuigkracht, gerst een veel grotere en zonnebloemen een zeer grote.

In het labo wordt de veldcapaciteit van een bodemmonster bepaald door dit vooraf met water te verzadigen, waarna het water uit de poriën (zgn. drainageporiën) verwijderd wordt door het monster te onderwerpen hetzij aan een zuigkracht of onderdruk, hetzij aan een overdruk.

Dit watergehalte bij VC wordt in zwaardere gronden het best bepaald door een overdruk van $1/3$ atm. ($pF = 2,5$) uit te oefenen op het verzadigde monster. Voor zuivere zandgronden wordt echter een onderdruk of overdruk verkozen van slechts $1/10$ atm. ($pF = 2$).

De waarden van de capillaire zuigkracht bij VC, die overeenstemmen met de hier gekozen onder- of overdrukken, kunnen gemeten worden met behulp van een tensiometer die op een bepaalde diepte in de bodem ingegraven wordt. In praktijk ligt zuigkracht bij VC doorgaans lager dan de theoretisch voorgestelde pF waarden van 2 en 2.5.

De poriëngrens waarbij de capillaire zuigkracht in evenwicht is met de zwaartekracht bedraagt bij VC voor de meeste gronden ongeveer $10 \mu\text{m}$. De grotere poriën ($> 10 \mu\text{m}$) of macroporiën waaruit het water verdwijnt noemt men de drainage poriën (DP).

De poriën kleiner dan $10 \mu\text{m}$ zijn dan de waterbergingsporiën of microporiën.

De VC-waarde is een zeer belangrijk bodemfysisch kenmerk: het is een maat van de waterreserve die een bodem kan opslaan.

4.7 Verwelkingspunt (VP)

Water in en rond de gronddeeltjes en in de fijnste poriën is heel sterk gebonden en kan dus niet worden opgenomen door de gewassen. Wanneer dat punt is bereikt, gaan de gewassen verwelken: "verwelkingspunt".

Het verwelkingspunt wordt arbitrair gedefinieerd als het watergehalte van de bodem waarbij bladeren van zonnebloemplanten permanent verwelken, d.w.z. dat zij hun normale turgordruk niet meer herstellen nadat zij in een met water verzadigde omgeving geplaatst worden. Meer algemeen echter is veldcapaciteit het watergehalte van de bodem bij -15 bar waterpotentiaal ($pF = 4,2$ of 15000 cm water).

Het wortelstelsel van de plant met zijn vele vertakkingen en talloze wortelhaartjes zuigt aanvankelijk het water op uit de grovere waterbergingsporiën. Met de tijd echter blijft er alleen maar water in de kleinere poriën over. Als gevolg van de toenemende capillaire kracht zal de zuigkracht die de plant moet aanwenden om nog meer water uit deze fijner wordende poriën te onttrekken steeds groter worden. Nu weten wij dat, onder gematigd klimaat, de gemiddelde zuigkracht van het wortelstelsel voor onze gewassen ongeveer 15 atm. bedraagt. Dit wortelstelsel is dus in staat het water te onttrekken uit poriën tot een grenswaarde, gelijk aan de capillaire zuigkracht, nl. 15 atm. wat overeenkomt met een poriëndiameter van 0,2 μm . Zijn de poriën groter dan 0,2 μm geledigd, dan begint de plant te verwelken en is het verwelkingspunt bereikt.

De nuttige waterbergingsporiën (symbool WP) zijn de poriën met een doormeter begrepen tussen 10 en 0,2 μm . Die poriën bevatten bij veldcapaciteit de maximale hoeveelheid water die beschikbaar is voor opname door plantenwortels.

De niet-nuttige waterbergingsporiën (symbool OP) hebben een diameter < 0,2 μm en bevatten het niet-nuttige water.

Het spreekt vanzelf dat de poriënverdeling afhankelijk is van de bodemtextuur, zoals geïllustreerd door de gegevens van Tabel 9.1.

Tabel 9 Poriënverdeling in functie van de textuur of korrelgrootte-fractie [al de gronden bevatten < 3 % humus]

Textuur	0-2 μm	20-50 μm	SSG g/cm ³	DP	WP	OP
	Gewichts %			Volume %		
zand	2,4	4,9	1,628	31,4	1,2	6,0
zandleem	7,8	48,0	1,461	16,2	20,0	8,2
leem	17,6	50,2	1,531	5,3	22,5	13,3
Klei	24,1	15,9	1,558	5,4	15,5	18,9
zwarte klei	40,0	12,1	1,423	3,2	15,9	15,9

Er is voor ons land een duidelijke correlatie tussen het kleigehalte en het gehalte aan niet-nuttige poriën (OP) en wel zo dat nagenoeg geldt :

$$\% \text{ OP} = \frac{\% \text{ klei}}{2} + 5$$

Deze vereenvoudigde formule geldt slechts voor niet-humusrijke gronden.

Anderzijds vertonen de bodems met de grootste grove leemfractie steeds het grootste gehalte aan nuttige waterbergingsporiën. Het is ook duidelijk te zien dat de zware gronden (leem en kleigronden), wegens de geringe hoeveelheid aan DP, weinig doorlatend zijn, waardoor het overtollige water dan ook slechts traag zal wegdraineren.

4.8 Beschikbaar watergehalte en pF-curve

Dit is de de hoeveelheid bodemvocht die de plant maximaal kan opnemen. Dit is minder dan het totale bodemvochtgehalte. Tabel 10 geeft een voorbeeld van belangrijke watergehalten. Om het vochtgehalte te bepalen dat in een monster weerhouden wordt bij een bepaalde zuigspanning kan men o.a. gebruik maken van de zandbak voor pF waarden van 0 tot 2; van de zand/kaolienbak met vacuümpomp voor pF waarden van 2 tot 2,7; en tenslotte van de membraanpers voor pF waarden >2,7. Zo wordt Tabel 10 bekomen.

Tabel 10 Watergehalten in verschillende grondsoorten (eenheid: vol %)

Watergehalte	pF	Zand	Leem	Klei
	(geen eenheid)	%	%	%
Maximaal watergehalte	0	39	50	55
Veldcapaciteit	2-2,5	10	38	49
Draineringswater		29	12	6
Verwelkingspunt	4,2	4	9	29
Beschikbaar water		6	29	20
Watergehalte nul	7	0	0	0
Onbeschikbaar water		4	9	29

Voor het maximaal watergehalte geldt klei > leem > zand, maar voor het beschikbaar water: leem > klei > zand en voor het onbeschikbaar water klei > leem > zand.

In pF-curven wordt het watergehalte steeds uitgedrukt in vol % (per 100 cm³) ovendroge grond (Fig. 21). Het watergehalte bij luchtdroge grond stemt overeen met een pF van 4,7, terwijl een pF 7 het watergehalte weergeeft bij ovendroge grond (gedroogd bij 105°C).

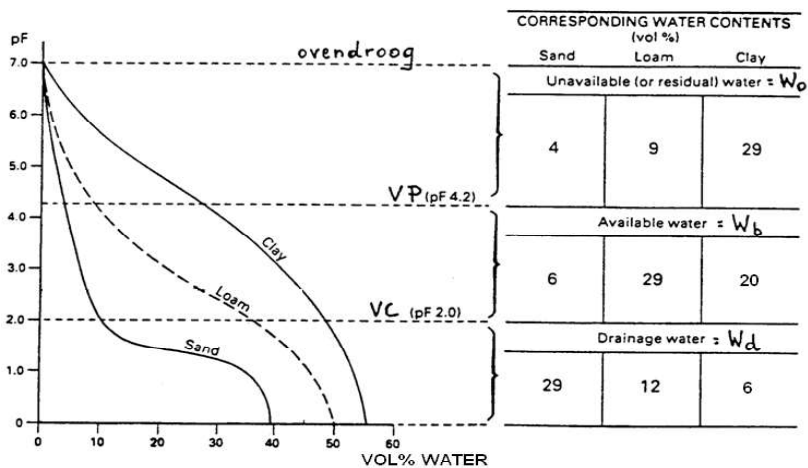


Fig. 21 Voorbeelden van pF-curven voor een klei-, leem- en zandgrond

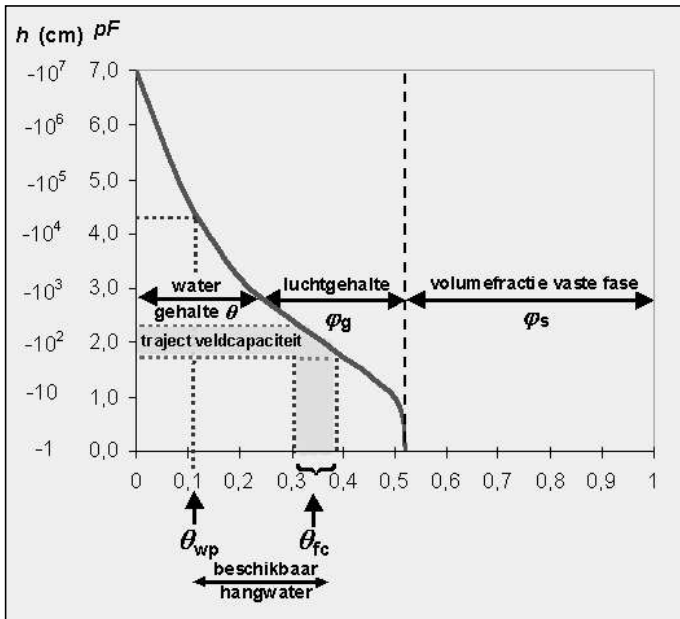


Fig. 22 Detail pF curve

Fig. 22 toont een pF curve en alle af te leiden parameters. Om tot Fig. 21 te komen, werd voor veldcapaciteit een pF waarde van 2 genomen voor alle gronden. Uit deze pF-curve kunnen verschillende dingen worden afgelezen:

- het totale poriënvolume: snijpunt van de curve met de abscis. Bij $pF = 0$ (drukhoogte = 1 cm H₂O) zijn nagenoeg alle poriën en holten van de grond met water gevuld;
- de vochtgehalten bij veldcapaciteit ($pF = 2$ of $2,5$) en bij verwelkingspunt ($pF 4,2$) en hieruit door verschil de hoeveelheid beschikbaar water;
- het vol % lucht bij een bepaald vochtgehalte = TPV - vol % H₂O;
- het vol % vaste delen = $100 - TPV$;
- het waterbergingsvermogen van de bodem db is het vol % H₂O nodig om een deel van de grond, met gegeven waterinhoud, in verzadigde toestand te brengen. Het waterbergingsvermogen db, uitgedrukt in mm neerslag, wordt gegeven door:

$$db = (TPV - \text{vol \% H}_2\text{O}) \cdot d \quad \text{met } d = \text{dikte van de grondlaag in dm}$$
 of $db = \text{vol \% lucht} \cdot d$
- het totaal nuttig waterbergingsvermogen of de totale nuttige regencapaciteit R (uitgedrukt in mm neerslag) wordt gegeven door $R = (VC - VP) \cdot d$ (dikte grondlaag in dm);
- de grootteverdeling van de poriën. Een meer horizontaal verlopend gedeelte van de pF curve (bv. zandgrond) betekent, dat bij een geringe toename van de pF veel water uit de bodem treedt. De grond bevat dus veel poriën die bij deze zuigspanning behoren.

Tabel 10 en Fig. 21 kunnen als volgt bestudeerd worden. Bij bevochtiging van een poederdroge, vochtloze bodem door regen of irrigatie zal de vochthoeveelheid initieel toenemen van ovdroog tot het VP. Bij VP bevat een kleibodem reeds 29% vocht, terwijl een zandbodem hier slechts 10% vocht bevat. Op dit moment is er nog geen druppel vocht voor planten opneembaar!

Bij verdere bevochtiging zal op de duur de VC bereikt worden. De vochthoeveelheid bekomen door het verschil $VC - VP$, is het beschikbare water, opneembaar door planten. Leem en klei scoren

hier veel beter dan zand. Dat betekent dat vanuit landbouwwaarde bekeken, leem en klei het voordeligst zijn op vlak van watervoorziening voor de planten en dus bodemvruchtbaarheid. Bij een zandbodem dient een grotere hoeveelheid organische stof in de bodem voorzien te worden, om de beschikbare vochthoeveelheid te doen toenemen buiten de bodemtextuur om.

Wordt er nog verder bevochtigd, dan komt er verder water in de bodem tot het maximale watergehalte (verzadigde bodem of: plassen zichtbaar). Absoluut genomen, kan een kleibodem het meeste water bevatten (55%).

Uit deze duiding mag blijken dat een leem- en kleibodem, doorsnee genomen, het meeste plantbeschikbare water bevatten en dus het interessantst zijn om te cultiveren.

4.9 **Diepgaandere benadering pF-curven**

A. Verdere verbanden

In pF curven wordt het watergehalte steeds uitgedrukt in vol % per 100 cm³ (vol% per dl) volledig droge grond (gedroogd bij 105°C).

Soms wordt het watergehalte uitgedrukt in mm, hetgeen een gemakkelijke vergelijking mogelijk maakt met de neerslag die ook in mm wordt weergegeven (Laag- en Midden-België : 800 mm/jaar; Hoog-België : 900-1400 mm/jaar); hierbij moet echter ook de dikte van de beschouwde grondlaag aangegeven worden. Voor de omrekening volume % water → mm water geldt:

$$\begin{aligned}1 \text{ mm water} &= 1 \text{ liter/m}^2 \\1 \text{ vol \% water} &= 1 \text{ mm}^3/100 \text{ mm}^3 \text{ grond} = 1 \text{ mm} / 100 \text{ mm} \text{ grond} \\1 \text{ vol \% water} &= 1 \text{ liter/m}^2 \cdot 100 \text{ mm grond} = 1 \text{ liter/m}^2 \cdot 10 \text{ cm grond}\end{aligned}$$

B. Nuttige regencapaciteit

Het beschikbaar water is dus de hoeveelheid water bij veldcapaciteit verminderd met de hoeveelheid water bij het verwelkingspunt. Het is de hoeveelheid vocht die de plant maximaal uit de grond kan opnemen.

$$W_b = VC - VP$$

Het dient nochtans aangestipt dat het water weerhouden tussen VC en VP niet even gemakkelijk opneembaar is door de plant. Voor de meeste gewassen is het water tot een pF waarde ≤ 3 even gemakkelijk opneembaar. Als vuistregel neemt men aan dat 50-66 % van het totaal beschikbaar water gemakkelijk opneembaar is. Dit is van belang met het oog op het opstellen van irrigatieschema's.

In de bodemkunde is het wenselijk, voor het beschouwde bodemprofiel, de nuttige waterbergingscapaciteit (het door de plant opneembaar water) om te zetten, of uit te drukken, in "nuttige regencapaciteit R":

$$R = (VC - VP) \times d \quad (\text{mm of l/m}^2)$$

waarin VC en VP het vol % H₂O bij veldcapaciteit en verwelkingspunt voorstellen en de dikte van de beschouwde bodem uitgedrukt in dm.

4.10 **Bodemkenmerken veroorzaakt door het water**

De aanwezigheid van water in de bodem is de oorzaak van bijzondere kenmerken. Het bodemwater omvat verschillende stoffen in oplossing, o.a. ijzerverbindingen. De kleur van die verbindingen hangt af van het al of niet aanwezig zijn van zuurstof. Bij de aanwezigheid van O₂ is het Fe geoxideerd en aanwezig als Fe³⁺, waardoor het onoplosbaar wordt en een bruine neerslag vormt. Bij de afwezigheid van O₂, en in aanwezigheid van organische stof als elektron donor, wordt het Fe³⁺ gereduceerd naar Fe²⁺. De bodemmaterialen nemen dan de natuurlijke kleur aan, meestal grijze of blauwe tinten. Vanaf de diepte waarop de grond steeds verzadigd is met water, nl. de laagste grondwaterstand of zomerwaterstand, is er geen lucht aanwezig. Het Fe is gereduceerd en de bodem heeft een grijze of blauwe kleur. Roestverschijnselen zijn meestal slechts aanwezig langs wortelgangen. Deze laag noemt men de gereduceerde horizont of reductiehorizont.

In vlakke, laag gelegen gebieden met hoogteligging < 20 m O.P., zoals de Polders, de zandstreek en sommige valleien gaat het surplus (± 200 mm) een permanente grondwatertafel voeden. In de winter zal deze stijgen en in de zomer dalen. De grondwatertafel is het vlak waaronder al de macroporiën verzadigd zijn met water; onder het grondwateroppervlak heerst er dan ook een uitgesproken luchtdeficiet.

De zone waarin de grondwatertafel schommelt is afwisselend nat en droog. Tijdens de winter is deze zone met water verzadigd en het Fe is aanwezig in gereduceerde toestand. In de zomer is ze vochtig tot droog, het Fe wordt geoxideerd en vormt bruin-roestige vlekken. De schommelingszone van het grondwater wordt gekenmerkt door deze bruin-roestige vlekken, die steeds vergezeld zijn van bleke, ijzerarme vlekken. Dit noemt men de roestverschijnselen of gleyverschijnselen. Ze kenmerken dus een laag die afwisselend nat (O₂-arm) en droog (O₂-rijk) is. De zone met hangwater is steeds luchthoudend en vertoont geen roestverschijnselen.

De schommelingen van de grondwatertafel kan men op elk ogenblik vaststellen in een kuil. De laagste stand komt overeen met de top van de permanente reductiehorizont (blauw, grijs) of vormt de basis van de roestverschijnselen. De hoogste stand komt overeen met de top van de roestverschijnselen (grijze + roest-bruine vlekken).

Stuwwatergronden komen voor op sommige heuvels in Laag- en Midden-België. Deze bodems zijn gekenmerkt door de aanwezigheid van een ondoorlatende kleilaag (meestal Tertiaire klei) op geringe diepte. Tijdens de winter laat deze laag het doorsijpelende water niet door en vormt er zich een stuwwatertafel. Deze gronden vertonen volgende lagen:

- de bovenste laag zonder gleyverschijnselen;
- de middenste laag mét roestvlekken;
- de kleiige ondergrond die niet gereduceerd is.

De stuwwatergronden vertonen dus zoals de permanente grondwatergronden, gleyverschijnselen, maar deze gaan in de diepere horizonten niet over in een gereduceerde zone. Om onderscheid te maken tussen beide fenomenen spreken Duitsers en Fransen van pseudogley.

Deze bodems zijn heel nat in de winter en heel droog in de zomer, daar het stuwwater er dan verdwenen is en het hangwater er spoedig uitgeput is.

De diepte waarop de gleyhorizont aanvangt stemt doorgaans overeen met het winterpeil. De diepte van het zomerwaterpeil is doorgaans de diepte waarop de gleyhorizont normaal eindigt en de reductiehorizont, met zijn grijze of blauwe kleuren aanvangt.

4.11 **Draineringsklassen**

De draineringstoestand wordt bepaald door de diepte en de schommelingen van de watertafel, de doorlatendheid van de verschillende horizonten, de diepte van de bodem en de helling van het oppervlak. De draineringsklassen worden onderscheiden op basis van de gley- en reductieverschijnselen (Tabel 11). Een goede drainering voor akkerland betekent dat er gley optreedt op ongeveer 0,5 m diep, voor weiland slechts min. 30 cm diep.

De beste drainageklassen voor akkerland en weiland, zijn dus respectievelijk drainageklasse d en e, omdat er dan in de meimaand normaal geen tekort is aan water. De waterhuishouding wordt slechter naarmate er meer wateroverlast of watergebrek is. Droogtegevoelige gronden kunnen verbeterd worden door bevloeiing en beregening, wat van economisch standpunt uit gezien, niet altijd interessant is.

Vanaf drainageklas d wordt het voor de meeste gronden voordelig ze kunstmatig te draineren door buizendrainage. Deze kan nochtans alleen toegepast worden, indien de algemene ontwatering van de laag gelegen gebieden, verbeterd kan worden door ontwateringskanalen of door grachten.

Om slecht gedraineerde stuwwatergronden te karakteriseren werden in ons land de drainageklassen h en i; h is weergegeven in Tabel 11 (ondiepe gley en geen reductiehorizont).

De ontwatering van zware kleigronden kan tijdelijk verbeterd worden door een moldrainage. Moldrainage geschiedt met een speciale ploeg voorzien van een stalen spitse kogel die gangen in de bodem kan trekken. Moldrainage wordt op geringe diepte, en op dichtere afstand toegepast, dan bij buizendrainage. Deze methode kan slechts toegepast worden in sterk plastische en vochtige materialen, zodat de gangen voldoende tijd open zouden blijven om water te kunnen afvoeren. Vanzelfsprekend is moldrainage goedkoper dan buizendrainage. Haar werking duurt echter slechts enkele jaren, bij buizendrainage is dit 30 jaar en meer.

De waterhuishouding van stuwwatergronden is ongunstig. Indien de ondoordringbare laag op meer dan 1,2 m voorkomt, dan kunnen deze bodems gemakkelijk door buizendrainage verbeterd worden, te meer daar zij meestal voorkomen in een zwak golvend landschap (bv. natte leemstreek boven Ieperiaanse klei).

De nadelen van een te hoge grondwaterstand zijn :

- moeilijke grondbewerkingen in het voorjaar;
- slechte- en oppervlakkige wortelontwikkeling van de wintergraangewassen;
- trage opwarming van de bodem, waardoor de vegetatie een kortere groeiperiode heeft;
- verlies aan NO₃⁻ - N, door reductie tot gasvormige N-verbindingen, die opneembaar zijn;
- sterke onkruidgroei.

Tabel 11 Natuurlijke draineringsklassen voor zandige gronden (Z, S en P) en voor lemig-kleige gronden in België (textuur A, L, E en U)

Z, S, P

Symbool	Definitie	Natuurlijke drainering	Diepte (cm) van gley en eventueel reductie	
			Roest	Reductie
a	zeer droog	veel te sterk	-	-
b	Droog	te sterk	90-120	geen
c	matig droog	iets te sterk	60-90	geen
d	matig nat	matig	40-60	geen
e	nat, met reductiehorizont	tamelijk slecht	20-40	> 80
f	zeer nat, met reductiehorizont	slecht	0-20	40-80
h	Nat	tamelijk slecht	20-40	geen
i	zeer nat	slecht	0-20	geen
g	uiterst nat	zeer slecht	geen	< 40

A, L, E, U

Symbool	Definitie	Natuurlijke drainering	Diepte (cm) van gley en eventueel reductie	
			Roest	Reductie
a	-	-	-	-
b	niet gleyig	goed	> 120	geen
c	zwak gleyig	matig goed	80-120	geen
d	matig gleyig	onvoldoende	50-80	geen
e	sterk gleyig, met reductiehorizont	tamelijk slecht	30-50	> 80
f	zeer sterk gleyig, met reductiehorizont	slecht	0-30	40-80
h	sterk gleyig	tamelijk slecht	30-50	geen
i	zeer sterk gleyig	slecht	0-30	geen
g	gereduceerd	zeer slecht	geen	< 40

4.12 Verband tussen grondwatertafel en productie

De optimale diepte van de grondwatertafel neemt toe naarmate de bodem een grotere reserve heeft aan nuttige waterbergingsporiën, zodat de beste zandleem- en leemgronden, deze zijn zonder gleyverschijnselen, dus goed gedraineerde bodems zonder grondwatertafel of stuwwatertafel.

Voor lichte zandleemgronden is de beste natuurlijke drainage, drainageklasse c. In de maand mei zal de grondwatertafel op een diepte voorkomen van ongeveer 1,30 m. De capillaire opstijging in deze lemige bodem is van die aard, dat de wortels geen tekort zullen hebben aan water. Zand- en lemigzandgronden, die behoren tot drainageklasse d, geven de hoogste rendementen. In de maand mei bevindt zich de grondwatertafel op een diepte van ongeveer 1 m.

De onvoldoende gedraineerde bodems, alsook de tamelijk slecht gedraineerde bodems (voornamelijk drainageklasse h) op texturen L, A, E en U, dienen voor akkerland kunstmatig gedraineerd te worden door buizendrainage (gemiddelde diepte = 1 m).

Op droogtegevoelige gronden, zoals zandgronden, wordt in de tuinbouw, beregening zeer veel toegepast. De intensiviteit van de teelten laat toe, de betrekkelijk dure beregeningsinstallaties te gebruiken. Beregening kan eveneens aangewend worden om nachtvorst te bestrijden.