



Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Ministerie van Onderwijs, Cultuur en
Wetenschap

Hydrologie en archeologie

*Basiskennis over bodemwater en
bodemarchief*

Hydrologie en archeologie

Basiskennis over bodemwater en bodemarchief

Colofon

Hydrologie en archeologie
Basiskennis over bodemwater en bodemarchief

Auteur: N.W. Willemse, RAAP

Illustraties: auteur en Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, behalve de afbeeldingen vermeld in de beeldverantwoording

Tekstredactie: F. Brounen, H. Huisman, G. Mauro, B. van Os en I. Roorda

In opdracht van: project Kennis voor Instandhouding Archeologische rijksmonumenten

Afbeelding omslag: Ven op de Empese en Tondense Heide

Opmaak en productie: Xerox, Osage

© Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort 2021

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

Postbus 1600

3800 BP Amersfoort

www.cultureelerfgoed.nl

Inhoud

Hydrologie en archeologie	4
Water in de ondergrond	5
Waterbalans	7
Holle en bolle grondwaterspiegels	8
Stijghoogte	9
Schijngrondwaterspiegel	10
Zuurstof in de bodem	12
Het conserverend vermogen van een waterverzadigde bodem	13
Instandhoudingsproblemen	15
Verdroging	15
Afdekken en het effect op waterverzadiging	15
Meten en waarnemen	19
Freatisch grondwater	19
Stijghoogte	19
Waterverzadiging	19
Oxidatie-/reductiegrens	19
Ter verdieping	20
Geodatasets	20
Publicaties	20
Beeldverantwoording	20

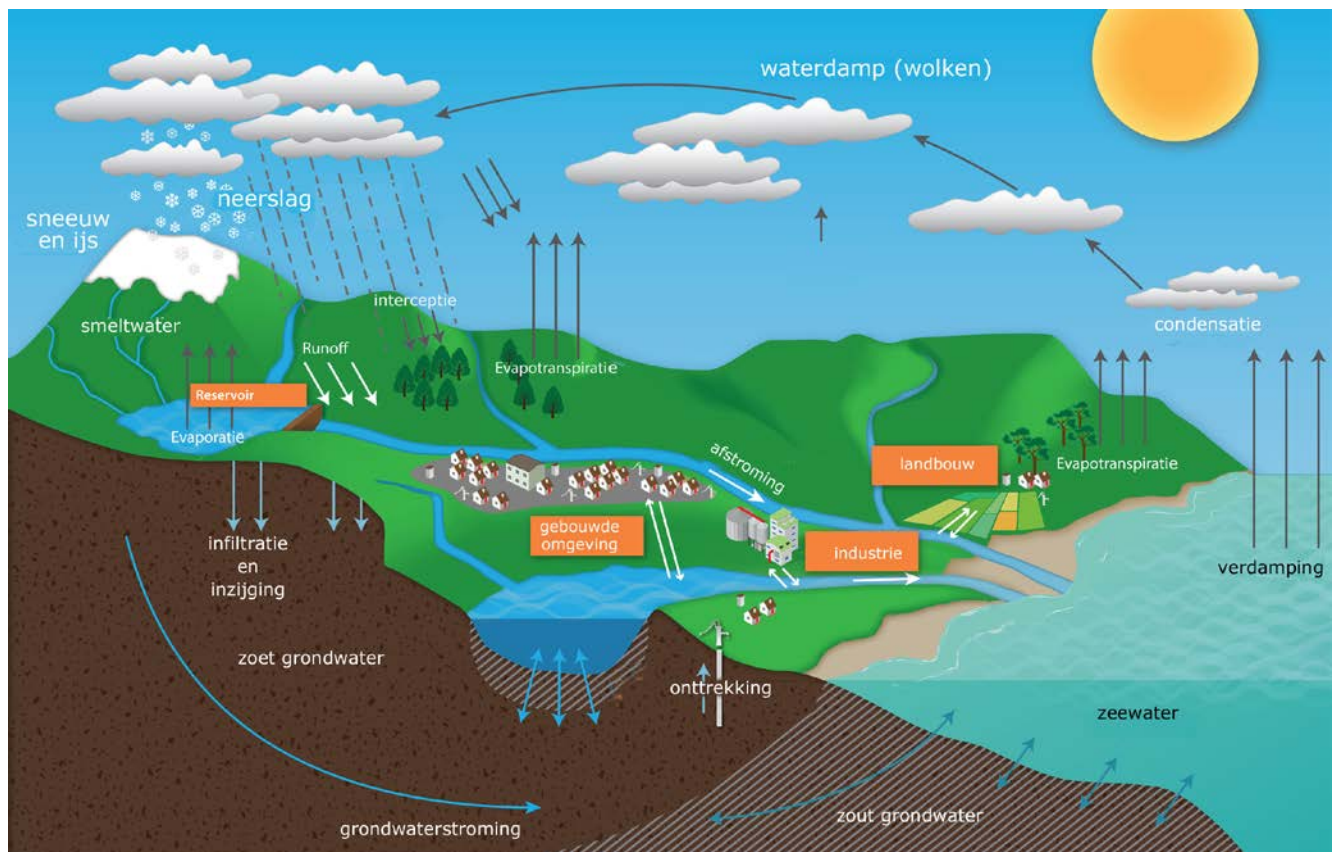
Hydrologie en archeologie

Waterverzadiging is één van de belangrijkste factoren voor de conservering van archeologisch materiaal in de bodem. Water is van cruciaal belang omdat het zuurstof uitsluit, waardoor bepaalde degradatieprocessen, zoals roesten of mineralisatie, niet plaatsvinden. Ook voor de herkenbaarheid van grondsporen is de invloed van de waterhuishouding groot.

Inzijging en verdamping, stagnatie, capillaire werking en lokale en regionale kwel bepalen de mate waarin bodemvocht en waterverzadiging voorkomen. Deze processen worden op hun beurt beïnvloed door het reliëf, de opbouw

en samenstelling van de bodem én door menselijk handelen als ontwatering en afdekking. Al deze processen en factoren vormen samen het hydrologisch systeem.

Voor het in stand houden van terreinen met kwetsbare vondstgroepen en sporen is het nodig kennis te hebben van de werking van het grondwatersysteem. Deze brochure biedt praktische basiskennis voor archeologen die betrokken zijn bij de instandhouding van archeologische (rijks)monumenten of veldonderzoek doen naar de fysieke kwaliteit van het bodemarchief en het conserverend vermogen van de bodem.

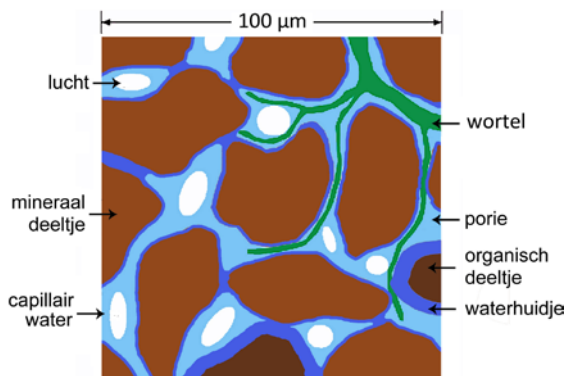


De waterkringloop.

De waterkringloop vormt de basis voor de werking van het bodemwatersysteem. Hemelwater dat op de onverharde bodem valt zakt voor een belangrijk deel naar beneden via de holle ruimten tussen de los gestapelde bodemdeeltjes. Een kleiner deel wordt al boven de grond opgevangen (interceptie) door bijvoorbeeld planten of door oppervlakteverharding. Hier verdampt het water of het stroomt oppervlakkig of via regenkolken weg naar het oppervlaktewater.

Wanneer water in de bodem dringt kan zich een verzadigde en een onverzadigde zone vormen. Wanneer de poriënruimten en plantencellen helemaal met water zijn opgevuld dan spreken we van waterverzadiging en de verzadigde zone. In de onverzadigde zone bevatten de poriën tussen de vaste delen van de grond zowel lucht als water. De bodemdeeltjes zijn namelijk in staat om door adsorptie (hechting aan het oppervlak), tegen de werking van de zwaartekracht in, een bepaalde hoeveelheid water vast te houden. Dit water wordt hangwater genoemd. De maximale hoeveelheid hangwater in de onverzadigde zone is afhankelijk van het aantal en het volume van de poriën en dus van de grondsoort (tabel 1). Klei en veen houden veel meer water vast dan zand. Klei omdat het heel veel zeer kleine poriën bevat waaruit eenmaal geadsorbeerd water nog maar zeer moeilijk kan

ontsnappen. Veen omdat dit voornamelijk bestaat uit dode plantencellen die gevuld zijn met water dat zich alleen bij afbraak van de celwanden kan verplaatsen.



De holle ruimten tussen de bodemdeeltjes worden poriën genoemd. De afmetingen van de poriën is op de eerste plaats afhankelijk van de korrelgrootteverdeling, de wijze van stapeling en de aanwezige organische deeltjes. Krimpscheuren, wortelkanaaltjes, macroresten en graafgangen van bodemdierpjes vormen een tweede groep van poriën. Als poriën met elkaar in verbinding staan worden dit capillairen genoemd. Via de capillairen kan het water zich in de grond verplaatsen.

Tabel 1 Poriëngehalte, grootteverdeling en waterdoorlaatbaarheid.

Bodemsoort	Poriëngehalte %	Aandeel poriënklassen in %				Waterdoorlaatbaarheid cm per dag
		<0,2 µm	10-0,2 µm	50-10 µm	> 50 µm	
Zandgrond	25-45	2-8	10-15	8-20	10-20	5000-100
Loess	40-55	10-20	10-20	5-15	0-10	30-5
Kleiige siltgrond	35-60	5-20	5-15	0-10	5-10	10-1
Kleigrond	35-55	25-40	10-15	0-5	0-5	5-0,1
Veengrond*	60-90	15-25	30-55	0-10	7-30	10-0,05**

*bij hoogveen hoge waarden voor het bovenste deel met levende planten en zeer lage waarden voor de samengedrukte laag met afgestorven plantenresten.

**Bij laagveen is de waterdoorlatendheid afhankelijk van de kleibijmenging en de structuur en humificatiegraad van de plantenresten.

Tabel 1 Poriën worden onderverdeeld in vier grootteklassen: kleiner dan 0,2 µm (1 µm is gelijk aan 0,001 mm); 0,2-10 µm; 10-50 µm en groter dan 50 µm. Deze grootteklassen zijn gebaseerd op de mate waarin water in deze poriën wordt vastgehouden door minerale bodemdeeltjes. De inhoud van alle poriën tezamen heet het poriënvolume. Daarnaast onderscheiden we het poriëngehalte. Dat is het totale poriënvolume per kubieke meter grond. Typische waarden voor het poriëngehalte zijn 0,15-0,30 voor zand, 0,35-0,55 voor klei en 0,60-0,80 voor veen.

Uitleg van gebruikte termen

Afgesloten grondwater - grondwater in een laag grond die is afgesloten door een ondoorlatende laag aan de bovenzijde (klei of veenlaag).

Bodemvocht - het water dat zich boven de grondwaterspiegel in de onverzadigde zone bevindt.

Capillaire zone - laag boven de grondwaterspiegel waarin door de capillaire (vochtaanzuigende) werking van de poriën een opwaartse waterbeweging is. In de opencapillaire zone zijn de ruimtes tussen de bodemdeeltjes niet volledig met vocht gevuld (onverzadigde zone). Alleen in de kleinste ruimte bevindt zich water. De volcapillaire zone bevindt zich direct boven de grondwaterspiegel en hier is wel sprake van waterverzadiging (verzadigde zone). Nagenoeg alle ruimtes tussen de bodemdeeltjes zijn met water gevuld.

Corrosie - dit is een chemisch proces waarbij een metaaloppervlak onder invloed van zuur en een oxidator oplost en wordt omgevormd tot metaaloxide of metaalcarbonaat. Corrosie is dus een specifieke vorm van oxidatie (zie oxidatie/reductie).

Drooglegging - de verticale afstand tussen het peil van het oppervlaktewater en het maaiveld (grondoppervlak).

Grondwaterspiegel - het vlak in de verzadigde zone waar de waterdruk gelijk is aan de atmosferische luchtdruk en waar het vlak dus alleen bepaald wordt door de zwaartekracht. Ook genoemd het freatisch vlak. De grondwaterspiegel kun je bepalen in een peilbuis. In een peilbuis is namelijk geen sprake van capillaire opstijging.

Grondwatertrap - klasse-indeling van een gemiddeld jaarlijks verloop van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld. Elke grondwatertrap is een combinatie van een bepaald traject voor de gemiddeld hoogste (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) beneden maaiveld. Deze worden gedefinieerd als het rekenkundig gemiddelde van de hoogste drie en laagste drie grondwaterstanden per hydrologisch jaar (1 april – 31 maart) gemeten over een reeks van tenminste acht achtereenvolgende jaren.

Hangwater - water dat in de poriën van de bovenste bodemlagen wordt vastgehouden en dat niet in contact staat met het grondwater. Meestal is het hangwater aangevoerd door neerslag. Het kan ook door het zakken van een eerdere hoge grondwaterstand ontstaan.

Infiltratie - het indringen van water (neerslag, beregeningswater, inundatiewater) in de bodem. De verticale beweging in de onverzadigde bodem richting het grondwater heet percolatie. Water kan ook infiltreren vanuit buizen of sloten.

Mineralisatie - dit is het proces waarbij organische verbindingen (plantenresten, afgevallen bladeren,

dierresten) in of op de bodem door micro-organismen worden omgezet in anorganische (minerale) verbindingen (zoals nitraat, koolstofdioxide).

Ontwatering - de afvoer van water uit percelen over en door de grond en eventueel door drainagebuizen en greppels naar een stelsel van grotere waterlopen.

Ontwateringsdiepte - de verticale afstand tussen het maaiveld en de hoogste grondwaterstand tussen de ontwateringsmiddelen (sloten, greppels).

Onverzadigde zone - het gedeelte van de grond boven de grondwaterspiegel waar de poriën zowel water als lucht bevatten.

Opbolling - verticale afstand tussen de hoogste grondwaterstand en het vlak met waterspiegels in de ontwateringsmiddelen (sloten, greppels). Opbolling wordt veroorzaakt door een hoge infiltratie van water en een geringe zijwaartse afvoer en is dus afhankelijk van seizoensinvloeden, de bodemgesteldheid en de wijze van ontwateren.

Oxidatie/reductie - oxidatie en reductie zijn algemene termen voor één en dezelfde chemische reactie (redoxreactie) waarbij elektronenuitwisseling plaatsvindt tussen elektrisch geladen chemische deeltjes zoals atomen of moleculen. Redoxreacties spelen een rol in zowel organische als anorganische omzettingprocessen en al dan niet in aanwezigheid van zuurstof. Een voorbeeld van oxidatie is het roesten van ijzer. Een voorbeeld van reductie is verblauwing van de bodem.

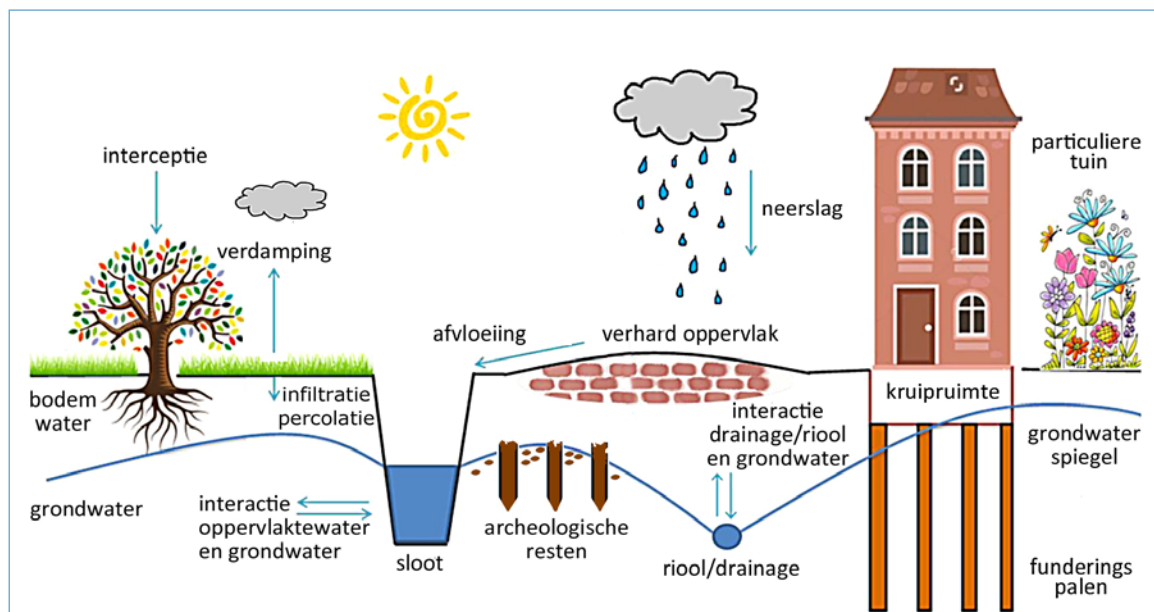
Stijghoogte - bij freatisch grondwater wordt de waterspiegel in een peilbuis bepaald door de luchtdruk. In afgesloten watervoerende pakketten kan de waterdruk hoger zijn dan de luchtdruk (overdruk, bijvoorbeeld door hoogteverschillen) en kan de waterspiegel dus veel hoger uitkomen met opwellen en kwel als gevolg. In het geval van overdruk wordt gesproken van een stijghoogte.

Veldcapaciteit - dit is de hoeveelheid water die een verzadigde bodem na 2 à 3 dagen uitdrogen tegen de zwaartekracht in nog kan vasthouden.

Verdamping en transpiratie (evapotranspiratie)

- verdamping (evaporatie) staat voor de beweging van water via waterdamp naar de atmosfeer. Verdamping vindt plaats vanuit de bodem, in het bladerdak, en vanaf het wateroppervlak. Transpiratie staat voor het ontsnappen van waterdamp via de huidmondjes in de bladeren. De som van beide processen wordt evapotranspiratie genoemd en is een belangrijk onderdeel van de waterkringloop.

Verzadigde zone - het gedeelte van de bodem waarin de poriën van de grond geheel met water zijn gevuld, dus de zone onder de grondwaterspiegel én de volcapillaire zone boven de grondwaterspiegel.



Model voor het grondwatersysteem in de gebouwde omgeving.

Waterbalans

Infiltratie

Het binnentreden van hemelwater in de grond wordt infiltratie genoemd. Meestal komt het water dan eerst in de onverzadigde zone terecht. Ook aanvulling van water onder het grondoppervlak door middel van een buizen- of slotenstelsel wordt infiltratie genoemd.

Hoeveel water er infiltreert is afhankelijk van de waterdoorlatendheid. Dit wordt bepaald door de grondsoort en de grootte van de poriën (tabel 2) maar ook door de hoeveelheid water die al in de bodem aanwezig is. Hoe meer water in de poriën zit, en hoe meer dit poriënwater met elkaar in contact staat, hoe hoger de doorlatendheid. In de praktijk is dit goed te zien als je water uitgiet over een uitgedroogde bodem. Het water zal dan niet snel infiltreren omdat de poriën vol lucht zitten.

Eenmaal in de onverzadigde zone kan het water óf verdampen (direct, of eventueel via wortelstelsels en de bladeren) óf wegzakken naar het grondwater. Dit laatste wordt percolatie genoemd. Verder blijft een deel van het water in de holle ruimten aan de bodemdeeltjes 'vastkleven' (door adsorptiekrachten). Als na een hevige of langdurige regenbui het hangwater enige dagen de tijd heeft gehad om uit te zakken ontstaat er een evenwicht tussen verdampen, wegzakken en adsorptie. De bodem heeft dan een evenwichtsvochtgehalte bereikt. Hydrologen spreken in zo'n evenwichtssituatie van een bodem op veldcapaciteit.

Opstijging vanuit het grondwater

Wanneer het vochtgehalte in de onverzadigde zone lager wordt dan het evenwichtsvochtgehalte, door sterkere verdamping, door opname door plantenwortels of door ontwatering, zal vanuit de verzadigde zone een naar

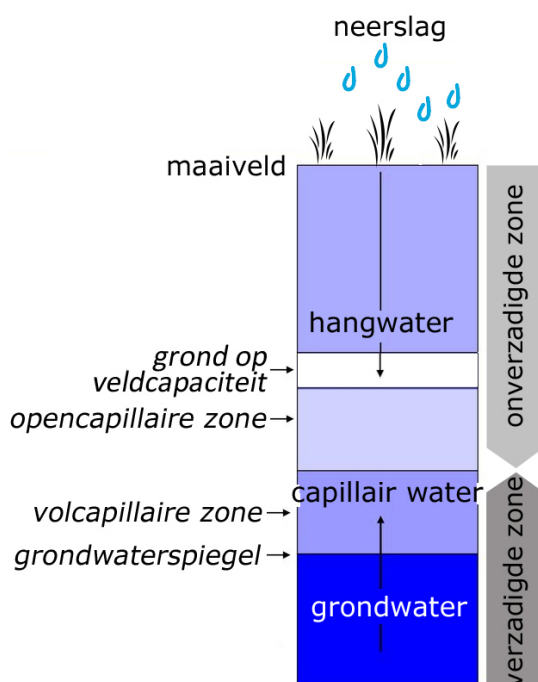
Tabel 2 De waterdoorlatendheid van enkele grondsoorten.

Textuur	Doorlatendheid	
	m per dag	kwalificatie
Grind		
Fijn grind	1.000-10.000	zeer hoog
Grof grind	10.000-100.000	zeer hoog
Zand		
Zeer tot uiterst grof zand	80-200	zeer hoog
Grof, met enig grind	10-50	zeer hoog
Duinzand	7	zeer hoog
Middelfijn (dekzand)	1-5	hoog
Uiterst fijn	0,2-0,5	matig
Loess	0,05-0,3	laag tot matig
Veen		
Zandig veen	0,3	matig
Ongerijpt	0,01	laag
Kleiig veen	0,005	zeer laag
Klei		
Sterk gescheurd (Ijsselmeerpolders)	10-100	zeer hoog
Enige poriën of scheuren	0,5-2	hoog
Zandige klei, gerijpt	0,02 - 0,2	laag tot matig
Zeer dicht (komklei, slechte laag)	0,005-0,05	laag/zeer laag
Zeer dicht (keileem, zandige klei)	0,05	laag/zeer laag
Zeer dicht (knipklei, potklei)	<0,005	zeer laag
Slap, ongerijpt (siltarme klei)	10-4 - 10-5	zeer laag
Ongerijpt, samengeperst	10-6	zeer laag
Overig		
Teelaarde	5	hoog
Schelpen	30	zeer hoog

boven gerichte waterstroom op gang komen om dit evenwicht te herstellen. Deze verticale waterbeweging ontstaat door de vochtaanzuigende werking van de holle ruimten (capillairen) tussen de bodemdeeltjes door adsorptiekrachten. Dit proces wordt capillaire werking genoemd en is cruciaal voor het ontstaan van waterverzadiging boven de grondwaterspiegel.

De capillaire zone bestaat uit twee delen. Direct boven het grondwater niveau, waar alleen water en geen lucht tussen de bodemdeeltjes aanwezig is bevindt zich de volcapillaire zone. De opencapillaire zone is het deel van de bodem boven de grondwaterspiegel waar het bodemwater als 'draadjes' in de poriën aanwezig is. In de grotere poriën bevindt zich dan lucht.

Grotere poriën ($> 50 \mu\text{m}$) kunnen geen capillair water vasthouden en de kleinste poriën ($< 0,2 \mu\text{m}$) geen capillair water loslaten (tabel 1). De hele capillaire zone reikt bij grof zand op veldcapaciteit daarom maar enkele centimeters boven het grondwater. Bij klei kan capillair bodemwater meerdere meters boven het grondwater terechtkomen.



Schematische weergaven van de begrippen verzadigde en onverzadigde zone, hangwater, grondwater, capillair water, volcapillaire zone en opencapillaire zone.

Afwatering en verdamping

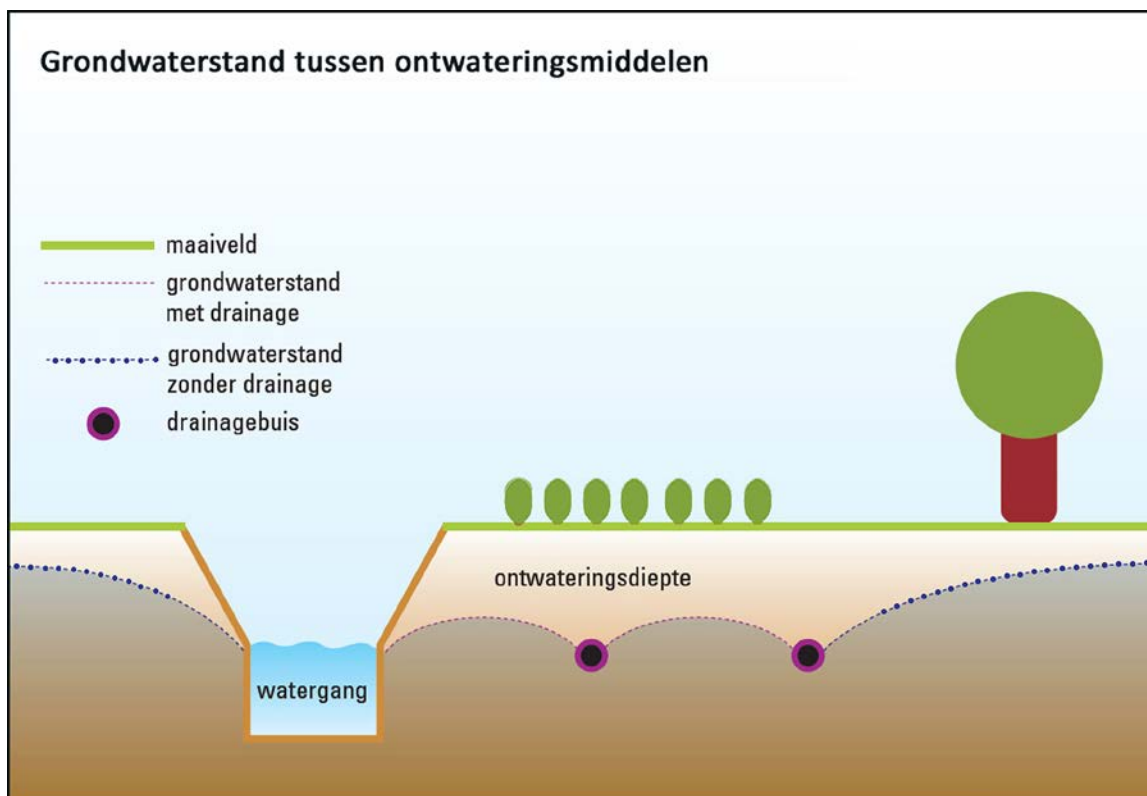
Water in de bodem wordt opgenomen door planten en dieren, verdampt, zakt weg naar het grondwater of wordt afgevoerd door ontwateringsmiddelen (sloten, drainage, regenkolken). Deze processen zorgen voor een vermindering van het bodemvochtgehalte en door de capillaire werking voor een lagere grondwaterstand. Verder geldt dat hoe ondieper de grondwaterstand en hoe sterker de capillaire zuigkracht van de bodemdeeltjes en de plantenwortels, hoe meer water er kan verdampen. Wanneer vegetatie aanwezig is die veel water verdampt (zoals naaldbomen) zal de grondwaterstand in het groeiseizoen dieper zakken dan wanneer er geen sterk verdampende vegetatie aanwezig is, zoals gras en heide. De verdamping door bomen is ongeveer het dubbele van heide (tabel 3). Wel geven bomen schaduw en voorkomen zo verdamping van de onderliggende grond. Uit kale grond verdampt slechts weinig water. Zodra de bovenste bodemlaagjes zijn uitgedroogd stopt de verdere capillaire aanvoer van vocht en stopt de verdamping.

Tabel 3 Gemiddelde verdampingwaarden.

Vegetatietype	Verdampingswaarde
	mm per jaar
Grove den	675-600
Lariks	620-545
Loofbos	600-500
Gewassen	540
Pijpestrootje	445
Gazongras	435
Schraalgras	400
Dopheide	310-500
Stuifzand	156-200

Holle en bolle grondwaterspiegels

Water in de bodem beweegt vooral verticaal onder invloed van de zwaartekracht en door de capillaire werking van de poriën. Door de tijd heen ontstaan er fluctuaties in de diepteligging van de waterverzadigde zone. Wanneer de afvoer van grondwater langzaam verloopt, zoals in kleibodems of in veenbodems leidt de toevoer van water in de onverzadigde zone op den duur tot een stijging van de waterverzadigde zone. Dat is op lokaal niveau vooral het geval op plaatsen waar sloten of drainagebuizen een surplus aan water niet weten af te



Watergangen en drainage spelen een belangrijke rol bij de afvoer of toelevering van bodemwater. De waterdoorlatendheid van de bodem is daarbij een belangrijke factor. Bodems met veel klei of veen zijn slecht waterdoorlatend en het effect van peilverandering op de grondwaterstand verloopt hier traag.

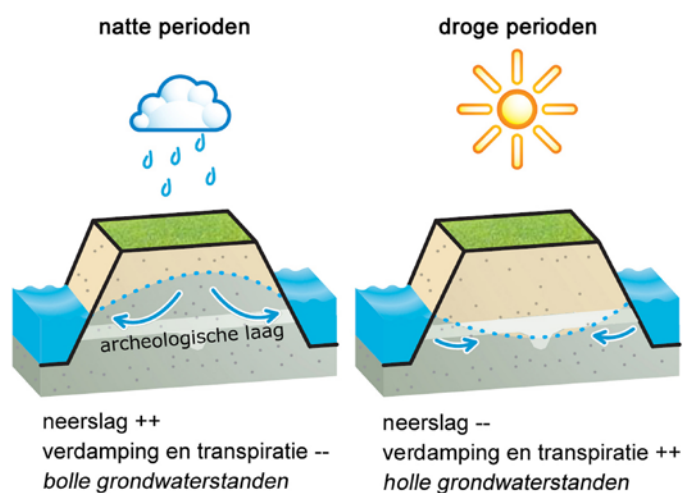
voeren. In de winter of na een zware of langdurige regenbui (natte perioden) ligt de verzadigde zone dan vaak (tijdelijk) hoger dan de waterstand in de sloot. Het grondwaterpeil tussen twee watergangen of tussen drainagebuizen heeft dan een bolle vorm. Omgekeerd speelt dit proces ook. Sterke verdamping van water uit de verzadigde zone door capillaire werking leidt tijdens een droge periode tot het dieper wegzakken van de grondwaterspiegel. In de zomer, wanneer veel van de neerslag verdampt, stroomt er te weinig water vanuit de sloten, of via drainagebuizen, naar het grondwater en ontstaan diepere holle grondwaterspiegels. Hierdoor kunnen delen van de archeologische vindplaats in de onverzadigde zone en binnen het bereik van bodemleven terechtkomen (zie: het conserverend vermogen van een waterverzadigde bodem).

zende rivierengebied of in de lage kleipolders direct achter de hoge duinreep. Door drukverschil is hier sprake van een zijwaartse en soms opwaartse grondwaterstroming (kwel).

Wanneer de drukhoogte groter is dan de atmosferische druk wordt niet meer gesproken van een grondwaterstand, maar van een stijghoogte. Deze kan gezien worden als de hoogte tot waar de waterspiegel reikt in een grondwaterpeilbuis die tot in de afgesloten watervoerende laag is geplaatst.

Stijghoogte

Wanneer een waterverzadigde laag, zoals een zandpakket, wordt afgedekt door een moeilijk waterdoorlatende laag, zoals een kleilaag, wordt gesproken van gedeeltelijk afgesloten grondwater. In dit gedeeltelijk afgesloten grondwater kan de opwaartse waterdruk hoger zijn dan de atmosferische druk. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in terreinhoogten, verschillen in oppervlaktewaterpeil of door het gewicht van de afdekkende laag. Overdruk in het grondwater bestaat bijvoorbeeld op de overgang van de stuwwallen naar het door een kleilaag afgedekte rivierzand in het aangren-



De vorm van de grondwaterspiegel in natte en droge perioden.

Hydrologisch beheren van archeologische vindplaatsen

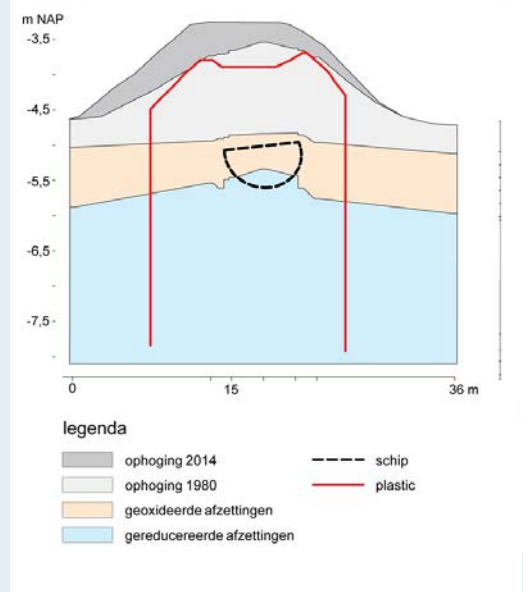
Tegengaan van waterverlies door verdamping

De capillaire werking is afhankelijk van de grootte en verdeling van de holle ruimten, de poriën. Hoe meer poriën tussen 0,2 en 50 µm des te makkelijker kan het water capillair opstijgen. Een groot aandeel grovere poriën (> 50 µm) in de bovengrond zorgt er voor dat er minder capillair water naar boven kan bewegen wat het verlies aan bodemvocht door verdamping en transpiratie afremt. Het losmaken van de bovengrond heeft om dezelfde reden een waterconserverende werking. Afremmen van de verdamping door capillaire werking kan ook bereikt worden door een grondlaag op te brengen met een grovere porienstructuur. Een extra grondlaag zorgt tevens voor een minder diepe wortelwerking en beschermt kwetsbare archeologische niveaus tegen bodembewerkingen.

Hetzelfde vertragende effect op de verdamping kan worden bereikt door gericht vegetatiebeheer. Kortgehouden ondiep wortelende grassoorten onttrekken het minste vocht aan de bodem wat een belangrijk positief effect heeft op de diepteligging van de verzadigde zone. Ook het afdekken met een slecht waterdoorlatende laag (klei) remt verdamping.

Een zeer lokale toepassing van deze vorm van hydrologisch beheer is het 'inpakken' van archeologische resten. De vroegere Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders heeft een methode ontwikkeld om verdroging van hout tegen te gaan, namelijk het inkuilen en inpakken van scheepswrakken met landbouwplastic. Het idee is dat verdamping en horizontale grondwaterstroming ter hoogte van de wrakken voorkomen kan worden door het afdekken van de wrakken met een grondlaag en het 'inkuilen'

met plastic folie tot onder de grondwaterspiegel. Aan de bovenkant is het plastic deels open gelaten of geperforeerd zodat er wel regenwater in kan en een kunstmatig hoog waterpeil gecreëerd wordt. Door deze maatregel kunnen scheepsresten beter in de bodem bewaard blijven.

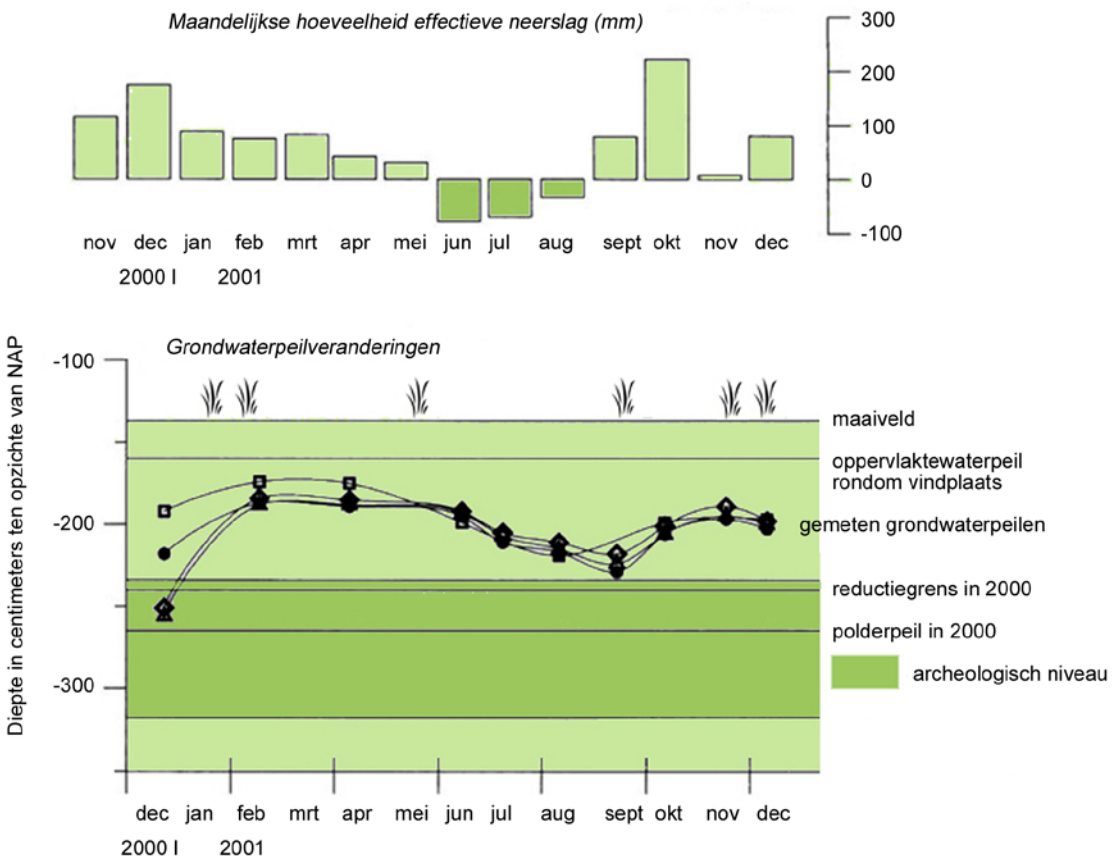


Boven: afgedekt scheepswrak in Flevoland. Onder: Het inkuilen van het archeologisch rijksmonument aan de Paradijsvogelweg in Almere zorgt voor een waterverzadigde bodem waarin in het scheepswrak ligt.

Schijngrondwaterspiegel

Sommige bodems hebben op enige afstand onder de oppervlakte slecht waterdoorlatende laagjes. Dit kunnen klei- of veenlaagjes zijn maar ook slecht waterdoorlatende verkitte bodemhorizonten (oerbanken) of bodemverdichtingen. Deze laagjes verhinderen het doorzakken

van geïnfilteerde neerslag en zorgen ervoor dat boven deze laagjes water blijft staan. Er is dan sprake van een lokale schijngrondwaterspiegel. In droge perioden staat deze waterlaag niet in contact met de regionale grondwaterspiegel. Sommige vennen op de Nederlandse zandgronden zijn een goed voorbeeld van schijngrondwatersystemen met lokale waterstagnatie op slecht doorlatende bodemlagen.



Grondwaterpeilveranderingen gemeten tussen november 2000 en januari 2002 op de neolithische vindplaats Spijkenisse-Vriesland (Zuid-Holland, rijksmonument 45.987).



Ven op de Oost-Nederlandse zandgronden.

Zuurstof in de bodem

Het zuurstofgehalte in de atmosfeer is 21%. In een goed geventileerde bodem ligt het zuurstofgehalte echter lager, tussen 12-20%, en neemt met de diepte af. Dit zuurstofgehalte is van belang omdat de meeste degradatieprocessen, zoals oxidatie of mineralisatie, alleen in aanwezigheid van zuurstof kunnen plaatsvinden.

De belangrijkste gebruikers van zuurstof in de bodem zijn wortels en aerobe micro-organismen. Wortels hebben zuurstof nodig om water en voedingsstoffen op te kunnen nemen. Aerobe micro-organismen zijn betrokken bij de afbraak van organische stof en bij biochemische reacties, zoals de corrosie van archeologische materialen.

Hoeveel zuurstof er in de bodem beschikbaar is voor afbraakprocessen is afhankelijk van de samenstelling van de bodem en van de waterverzadiging. Hoe natter de

grond en hoe meer fijne poriën des te langzamer de aanvoer van lucht in de bodem gaat. In lemige zand-, zavel-, loess- en kleigronden is het luchtgehalte daarom lager dan in zandgronden. Zwaardere gronden scheuren echter onder droge omstandigheden. De scheuren fungeren dan net als graafgangen en wortelstelsels als luchtkanalen.

Het zuurstofgehalte van water is laag (ca. 0,001%, 10 mg/l) en wordt in de bodem snel door aerobe micro-organismen geconsumeerd. In minder waterdoorlatende bodems (veenbodems, kleibodems) met enig organisch materiaal (het voedsel voor bodemleven) is het inziggende water daarom op geringe diepte al zuurstofloos. Ook in waterverzadigde organische materialen (hout, bot) ontstaan door zuurstofconsumptie door micro-organismen snel anaerobe condities.

Praktijkvoorbeeld conservering in de bodem

Neolithische knuppelweg in het Bourtangerveen



Uit veldstudies in het veenweidegebied Waterland (Noord-Holland) en bij het archeologische rijksmonument te Nieuw-Dordrecht (Drenthe, veenweg) is gebleken dat ook in zeer droge zomers sommige veenbodems lang genoeg vochtig (en zuurstofarm) kunnen blijven om biologische afbraakprocessen tegen te houden. De veenweg in het Bourtangerveen bij Nieuw-Dordrecht werd rond 2550 v.Chr. aangelegd door boeren van de Enkelgrafcultuur. Het wegdek bestaat uit 3 meter lange stammetjes van els, berk, linde, eik en esdoorn. Sinds 1981 is deze veenweg wettelijk beschermd (rijksmonument 45.391). Door grondwaterstandverlaging leken delen van het monument bedreigd te worden door uitdroging. De schade door schimmelwerking bleek in 2008 en 2018 echter beperkt te zijn. De veenweg ligt boven het grondwater maar de bodem is wel min of meer permanent waterverzadigd door de sponswerking van de veenbodem. De aanzuiging van water door de houtresten zorgt alsnog voor anaerobe conserveringsomstandigheden. Het zuurstofgehalte in waterverzadigd hout is namelijk gelijk aan nul. Dit komt omdat het kleine beetje zuurstof snel wordt geconsumeerd door anaeroob bodemleven. Zolang hout met water verzadigd is, zal de afbraak ervan zeer gering blijven. Het afbraakproces door anaerobe microben gaat zodanig langzaam dat het verwaarloosbaar is.

Het conserverend vermogen van een waterverzadigde bodem

Water in de bodem, en dan met name waterverzadiging, is van cruciaal belang omdat het zuurstof uitsluit, waardoor bepaalde degradatieprocessen, zoals afbraak van organische stof, veel langzamer plaatsvinden. De belangrijkste verstoring van de conserveringsomstandigheden in een bodem is daarom een verandering in de waterverzadiging. Kwetsbaar vondstmateriaal dat eerst in een waterverzadigde bodemlaag bewaard is gebleven gaat sterk achteruit zodra het boven de waterverzadigde zone uit komt. De aanwezigheid van zuurstof in de onverzadigde zone zorgt er namelijk voor dat planten, mollen, wormen, insecten, schimmels en bacteriën kunnen gedijen met wortelwerking, mineralisatie (in geval van organisch materiaal door zuurstof minnende microben zoals schimmels) en bioturbatie als gevolg. Vooral onverkoold organisch materiaal (hout, bot, leer, plantenresten) is hiervoor zeer gevoelig.

Degradatie van hout is volgens de meest recente inzichten voornamelijk afhankelijk van de waterverzadiging. Zolang de bodem of het hout volledig met water verzadigd is, blijft hout over het algemeen goed bewaard. Been, gewei, ivoor en tand bestaan uit zowel organische bestanddelen, zoals collageen, en uit anorganische kalkverbindingen (hydroxyapatiet, zoals dentine) die voor de sterkte zorgen. Collageen en apatiet zijn in bot

zeer sterk met elkaar verweven. Als de bodem aeroob is én kalkrijk kan de apatiet niet worden afgebroken, en blijft ook het collageen beschermd. Is de bodem kalkarm of zelfs zuur, dan kan de apatiet oplossen en wordt – als de bodem aeroob is – het collageen ook afgebroken.

Voor metalen geldt dat onder zure omstandigheden (dus bij het ontbreken van zuurbufferende stoffen in de bodem zoals kalk) het oppervlak kan worden aangetast, al dan niet in aanwezigheid van zuurstof. Wanneer er zuurstof aanwezig is kunnen de opgeloste metaalionen neerslaan als oxide of hydroxide. In het geval van ijzeren voorwerpen komt er bij de vorming van roest veel nieuw zuur vrij en is de gevormde corrosielaag veel poreuzer. Hierdoor stopt bij ijzer in een zuur milieu, en in de aanwezigheid van zuurstof, de corrosievorming niet. In het geval van koperlegeringen, bijvoorbeeld brons, stopt deze reactie meestal wel. Bij koperlegeringen wordt het zuur door de gevormde corrosielaag geneutraliseerd: er ontstaat een passieve laag (patina). Onder anaerobe omstandigheden kan ook bij voldoende aanwezigheid van sulfaat (uit het sediment) sulfaatreductie aan het metaaloppervlak plaatsvinden. Hierbij worden zowel koperlegeringen als ijzeren voorwerpen omgezet in sulfidehoudende corrosieproducten.



In de vroege ijzertijd werden de holle bronzen kokerbijlen nagemaakt in ijzer. Op De Revelhorst te Zutphen werd onlangs zo'n holle ijzeren kokerbijl gevonden in een klomp roest.

Praktijkvoorbeeld conservering in de bodem

De Meern 4

De Meern 4 is een 27 meter lang Romeins vrachtschip uit de eerste eeuw dat, met uitzondering van de hoogst gelegen delen van het achterschip, opmerkelijk compleet in de bodem bewaard is gebleven. Het is het oudste teruggevonden Romeinse vrachtschip van Noordwest-Europa.

Het bodemprofiel rondom de scheepsresten toont een duidelijk onderscheid in een blauwgrijze verzadigde zone met ijzerreducerende omstandigheden (b) en een geelbruine geoxideerde (onverzadigde) zone met roestige vlekken op de grens (a). Dit geeft aan dat

de conserveringsomstandigheden al tientallen jaren stabiel zijn. Het hout van het schip dat in de onverzadigde zone heeft gelegen is volledig weggerot en de ijzeren nagels zijn hier aangetast. Het hout dat in de gereduceerde zuurstofloze blauwgrijze zone ligt is juist zeer goed bewaard gebleven.

Na onderzoek is besloten is het wrak van de Meern 4 ter plekke te behouden. De resten van het schip en de onmiddellijk aangrenzende oeverbeschoeiing zijn afgedekt met landbouwplastic waardoor de conserveringsomstandigheden over deze gehele zone gelijk blijven. Kwel zorgt voor een continue aanvoer van zuurstofloos grondwater, zonder dat dit water kan verdampen.



Verdroging

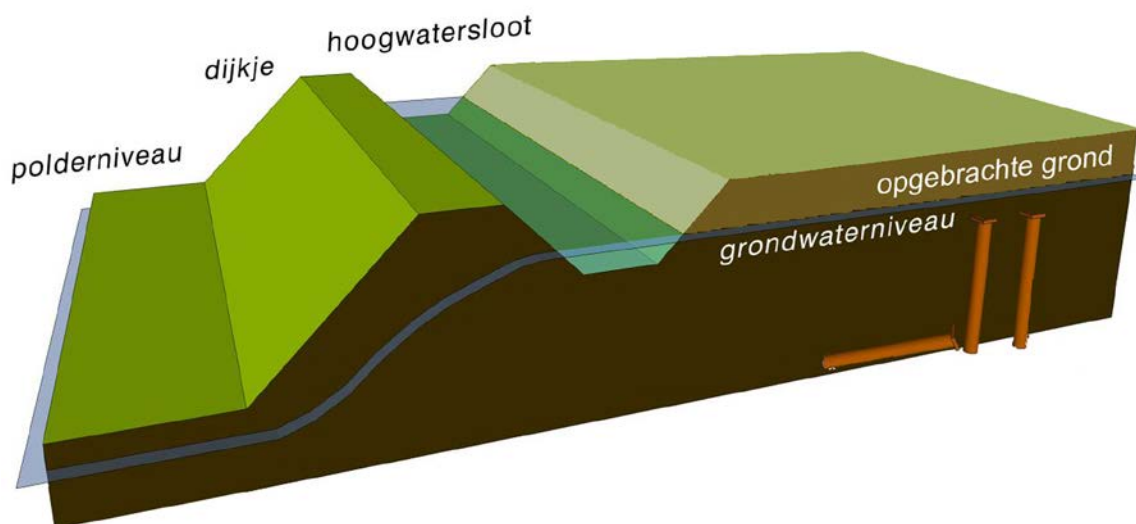
Sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw is de grondwaterstand in grote delen van Nederland met gemiddeld zo tot 40 cm verlaagd, met verdroging van bodems als gevolg. Dit komt vooral door het aanpassen van het watersysteem aan de eisen van het moderne grondgebruik, zoals verbeterde draagkracht van de bodem voor landbouwmachines en vee. Ontwatering voor de landbouw veroorzaakt landelijk circa 60% van de verdroging. Grondwateronttrekkingen voor drink- en industriewater en voor beregening van agrarische percelen veroorzaken samen circa 30% van de verdroging. Van stedelijke uitbreiding gaat eveneens een grondwaterstandsverlagend effect uit. Door het grote oppervlak aan daken en oppervlakteverharding in combinatie met een snelle afvoer van hemelwater naar regenkolken, vindt er in de stad een geringere aanvulling van het grondwater plaats vergeleken met het buitengebied. Verder wordt het waterpeil soms verlaagd om te voorkomen dat kelders en kruipruimten vochtig worden.

Grondwaterstandsverlaging vormt vooral een bedreiging voor ondiep gelegen archeologische monumenten met een onverkoelde organische component maar ook voor andere kwetsbare vondstgroepen zoals ijzerhoudende objecten. De effecten van verdroging worden betrekkelijk

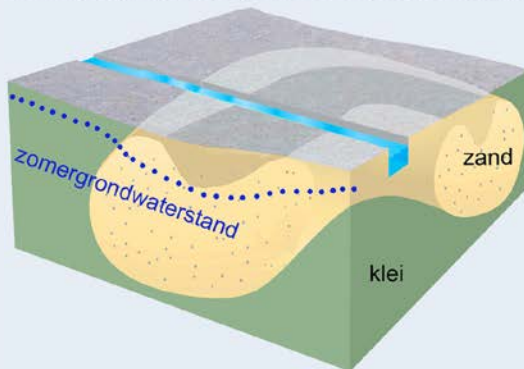
snel zichtbaar wanneer organisch materiaal als voedsel binnen het bereik komt van in zuurstof gedijende bodemorganismen. Vaak zijn beheer- of herstelmaatregelen op en rondom het perceel zelf nodig om deze ongewenste effecten van verdroging tegen te gaan. Sloten en greppels kunnen worden gedempt om de afvoer van grondwater te beperken. Lokaal kan het peil van de sloot worden verhoogd rondom de vindplaats door het plaatsen van stuwtjes, peilscheidingsdammen of het inrichten van hoogwatersloten. Een andere maatregel kan zijn om de verdamping af te remmen door het opbrengen van een grondlaag of door aangepast vegetatiebeheer.

Afdekken en het effect op waterverzadiging

In een open bodem wordt het bodemvocht aan de bovenzijde gereguleerd door infiltratie van neerslag en verdamping en aan de onderzijde door kwel en capillaire opstijging. Daarnaast speelt ontwatering een rol in de vochthuishouding. Een goed doorluchte bodem bevat in de regel zuurstof. Dieper in de bodem wordt het zuurstofgehalte door microbiële afbraak van organische stof steeds kleiner en verdwijnt. Zo ontstaat in het bodemprofiel de zonering met ondiep geel-oranje-rode roestvlekken bovenin en blauw-grijze reductiekleuren daaronder.



Werking van een hoogwatersloot.



Praktijkvoorbeeld verdrogingsproblematiek

't Hoog/ Drie Bunders-Aartswoud

Het aantal archeologische rijksmonumenten dat door een dik sedimentdek wordt afgedekt is beperkt. Veel van de archeologische resten in het gebied met holocene afzettingen komen alsnog dicht onder de oppervlakte voor. Hier liggen de archeologische niveaus wisselend onder of boven het grondwaterniveau. Juist dit soort archeologische vindplaatsen is gevoelig voor verdroging.

Een voorbeeld waar deze problematiek speelt is de laatneolithische nederzetting 't Hoog/ Drie Bunders in Polder De Hooge Weere te Aartswoud (rijksmonument 531.042). Archeologische bewoningssporen komen hier voor op relatief zandige kreekruigen. Het terrein is in agrarisch gebruik. Het slootpeil is hier op afgestemd en kende decennialang een

particuliere onderbemaling. Door ruilverkaveling is dat lagere waterpeil tegenwoordig geformaliseerd. De onderkant van de archeologische cultuurlaag ligt gemiddeld 20 cm boven dit waterpeil en het gehele archeologisch niveau is verdroogd. Onverkoelde zaden zijn in de cultuurlaag niet meer aanwezig en zeer waarschijnlijk is de houtcomponent verdwenen. Wellicht dat op diepere niveaus de conservering van kwetsbare organische materiaalcategorieën (indien aanwezig) beter is. In het relatief goed waterdoorlatende zandlichaam zal tijdens de zomermaanden een holle grondwaterspiegel aanwezig zijn waardoor ook de kwetsbare archeologische resten in de diepere geulvulling kunnen worden bedreigd. Voor het instandhouden van dit terrein is het van belang vast te stellen of en op welke diepte nog onverkoeld organisch materiaal voorkomt en tot welke diepte de bodem waterverzadigd is.



Het voormalige veeneiland Schokland. Het oosten is links, het noorden beneden.

Hydrologisch beheren van archeologische vindplaatsen

UNESCO werelderfgoed Schokland

Het voormalige Zuiderzee-eiland Schokland was in 1995 het eerste Nederlandse werelderfgoed. Schokland staat symbool voor de eeuwenoude strijd van de Nederlanders tegen het water. Op Schokland en in de directe omgeving komen meer dan 152 archeologische vindplaatsen voor. Samen beslaan zij een bewoningsgeschiedenis van meer dan 8000 jaar. Verdroging en de snelle achteruitgang van de organische component van het archeologisch erfgoed is de grootste bedreiging voor de instandhouding. Om verdroging te voorkomen is in 2002 een hydrologische zone aan de oostkant en ten dele

aan de noord- en zuidkant van het voormalige eiland aangelegd. Zo kan de daling van het voormalige veeneiland tegen worden gegaan en kunnen de organische archeologische resten van vindplaats P14 en van de middeleeuwse dijk- en terpzolen beter worden beschermd. Ook is ruim 200 ha landbouwgrond door de overheid aangekocht en uit productie genomen. Monitoringgegevens sinds 2000 tonen aan dat in ieder geval de conserveringsomstandigheden binnen het noordelijk deel van het eiland zijn verbeterd. In 2010 werd duidelijk dat verdrogingsproblemen aan het ontstaan waren aan de zuidzijde van het voormalige eiland. Hier liggen ondergrondse rivierduinen en veel archeologische resten. Sinds 2012 streven alle partijen daarom naar de realisatie van een tweede hydrologische bufferzone in het zuidelijke duingebied.

In het geval van afdekkingen met waterdoorlatend materialen (half verhardingen, grond) kan neerslag nog steeds inzigen en blijft bodemwater verdampen. In een van de buitenlucht afgesloten bodem is de hydrologische situatie anders. Er is onder een verharding, gebouw of onder een slecht luchtdoorlatende grondlaag nauwelijks of geen sprake meer van uitwisseling met de buitenlucht. Verder stroomt meer neerslag via het oppervlak af, in bebouwd gebied vaak via regenkolken

naar riolering of opvangbekkens. Het van de buitenwereld afgesloten bodemvocht wordt niet meer aangevuld met zuurstofhoudend regenwater en kan door microbiële afbraak van organisch stof zuurstofloos worden en daardoor reductieverschijnselen veroorzaken. Verder zorgt het wegvallen van verdamping onder een afdekking voor het opkruipen van de verzadigde zone wat eveneens voor reductieverschijnselen hoger in het profiel zorgt.



Blauwgrijs verkleurde bodem onder kelderresten van een gesloopte boerderij te Tiel-Medel. De donkere midden neolithische laklagen ter linker en rechterzijde van de kelder zijn eveneens verblauwd maar nog wel leesbaar. Onder de kelder is deze stratigrafie door reductieverschijnselen 'vervaagd'.

Een mogelijk nadelige effect van dit proces is dat de grijsblauwe reductiekleuren het contrast tussen archeologische grondsporen en de omliggende bodem vervagen. Hierdoor kan een deel van deze informatiebron minder zichtbaar worden. Dit fenomeen van 'verblauwing' is onder veldarcheologen goed bekend in kleibodems waar sprake is van afdekking door gebouwen, oppervlakteverharding, kassen met een verharde vloer, ophogingspakketten of taluds. Twee factoren zijn voor het vervagen van grondsporen door verblauwing van belang:

1 grondsporen en/of vondstlagen liggen voor de afdekking in een aerob bodemmilieu, maar komen door afdekking in een reducerend milieu terecht;

2 de grondsporen en/of vondstlagen bevatten weinig onverkoolde organische stof, zijn arm aan vondsten en hebben geen afwijkende samenstelling ten opzichte van de natuurlijke bodem. Anders zijn de vondstlagen en grondsporen ook in een gereduceerde of 'verblauwde' bodem nog steeds goed herkenbaar.

Overigens is verblauwing een natuurlijk proces dat altijd optreedt wanneer een bodem door een slecht luchtdoorlatende laag wordt afgedekt. Het zal daarom in gebieden die regelmatig overstromen, zoals in de uiterwaarden, altijd voorkomen. Het is verder bekend dat deze wijze van bodemvervaging ook weer weg kan trekken (reversibel is). Het is alleen nog niet duidelijk bij welke bodems dit optreedt en hoe lang het duurt voordat sporen en vondstlagen weer zichtbaar(der) worden.

Freatisch grondwater

De diepte van het freatisch vlak kan worden vastgesteld door een grondwaterpeilbuis te plaatsen of door een gat te boren tot onder het grondwaterniveau. Daarna moet een bepaalde tijd gewacht worden, omdat het grondwater eerst nog moet toestromen. In kleibodems is de waterdoorlatendheid laag en kan het enige tijd duren voordat een stabiel peil ontstaat. De grondwaterstand kan snel variëren in de tijd en moet voor een betrouwbaar vaststelling van de gemiddelde grondwaterstand gedurende minimaal drie jaar worden gemeten. TNO beheert een nationale databank met informatie over grondwater peildata en de ondergrondgegevens waaronder meetreeksen die een tijdspane beslaan van meer dan 50 jaar (Dinoloket).

Peilbuizen geven overigens alleen de diepte van de grondwaterspiegel aan, niet de bovenkant van het niveau waar sprake is van waterverzadiging. Vooral dit laatste is voor de conserveringsomstandigheden van archeologische resten bepalend.

Stijghoogte

De stijghoogte of de waterdruk in een (deels) afgesloten bodemlaag kan worden gemeten met een waterdrukmeter (piëzometer). Meestal worden filters gezet op de verschillende dieptes en wordt daar direct de stijghoogte in gemeten. Ook kan er gebruik gemaakt worden van een diver, een apparaatje dat de temperatuur en druk registreert en deze automatisch doorstuurt naar de beherende instantie. De keuze voor het plaatsen van peilbuizen of piëzometers wordt bepaald door de meetdoelstelling.

Waterverzadiging

Met eenvoudige veldwaarnemingen kan de diepte van de waterverzadigde zone vastgesteld worden. Dit kan op basis van kleur en geur. Zie onder 'oxidatie-/reductiegrens'. Als door instandhoudingsmaatregelen het waterpeil aangepast wordt, kan het effect daarvan gemonitord worden, in de bodem (in situ) met behulp van draagbare sensoren zoals tensiometers, door middel van een elektrische weerstandsmetingen of met behulp van een neutronensonde (of een gammastraler). Al deze methoden hebben hun eigen voor- en nadelen.

Oxidatie-/reductiegrens

Verschillen tussen een zuurstofrijk en een reducerend milieu zijn in een profiel gemakkelijk vast te stellen op basis van bodemkleur en soms geur (sulfide). Blauwgrijze kleuren in klei en zand, en bruine kleuren in turf zijn typisch voor reducerende omstandigheden, terwijl geelachtige, oranje en roodachtige tinten in klei en zand, en zwarte kleuren in veen kenmerkend zijn voor zuurstofhoudende omstandigheden. Is de grens in het profiel scherp of diffuus? Dit is een maat voor de fluctuatie van de grondwaterstand. Wanneer het grondwater sulfaat bevat kan dit door sulfaatreducerende bacteriën worden omgezet in waterstofsulfide en andere gereduceerde organische zwavelverbindingen. Deze hebben een kenmerkende 'rotte' geur. Het sulfide kan in aanwezigheid van opgelost ijzer reageren of worden omgezet in ijzersulfide en of pyriet. De aanwezigheid van deze ijzer-zwavel verbindingen kunnen worden aangetoond door 10% zoutzuur toe te voegen aan het meestal zwarte sediment. Hierdoor wordt waterstofdisulfide gevormd met de daarvoor kenmerkende geur.

Ter verdieping

Geodatasets

DINOLoket Standen en *DINOLoket Grondwateronderzoek* biedt de gebruiker de mogelijkheid om informatie over de kwantiteit en kwaliteit van het grondwater uit DINO Grondwater te halen. De databank bevat alle gegevens over grondwater, bijvoorbeeld informatie over de plaats en diepte van meetpunten, administratieve gegevens en resultaten van grondwatermetingen. In totaal bevat DINO meer dan honderdmiljoen grondwaterstanden.

Bodemkaart en grondwatertrappenkaart 1:50.000. De jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand is landsdekkend met zogeheten grondwatertrappen (Gt) in kaart gebracht op de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000. In de loop van de tijd is de Gt-indeling verfijnd en is *de Gt-kaart van Nederland* geactualiseerd.

Bodemkundig Informatie System (BIS) Nederland biedt toegang tot bodemgegevens en scenario's voor duurzaam bodem- en grondwatergebruik. Het systeem bevat up-to-date informatie over de Nederlandse bodem, is op systematische wijze verzameld en bewerkt en is te vinden op het platform voor het ontsluiten van geodatasets van Nederlandse overheden (Publieke Dienstverlening Op de Kaart/PDOK).

Publicaties

Huisman, D.J. 2009: *Degradation of archaeological remains*, Den Haag Staatsdrukkerij. Hoofdstukken 1 tot en met 10.

Kort, J.W. de, D.J. Huisman & B.P. Speleers 2016: *Scheepswrak aan de Paradijvogelweg ingekuuld. Een archeologisch monument goed geconserveerd*, Amersfoort, (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 231).

Os, B.J.H. van, J.W. de Kort & D.J. Huisman 2013: A qualitative approach for assessment of the burial environment by interpreting soil characteristics. A necessity for archaeological monitoring. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 14, 333–340.

Ritzema, H.P., G.B.M. Heuvelink, M. Heinen, P.W. Bogaart, F.J.E. van der Bolt, M.J.D. Hack-ten Broeke, T. Hoogland, M. Knotters, H.T.L. Massop & H.J.R. Vroon 2012: *Metten en interpreteren van grondwaterstanden. Analyse van methodieken en nauwkeurigheid*, Wageningen (Alterra-rapport 2345).

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed 2019: *Protocol Archeologische Monitor (landbodems), versie 4.7*, Amersfoort, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Willemse, N.W., 2020: *Beschermd maar kwetsbaar. Fysieke bedreigingen van archeologische rijksmonumenten en maatregelen om ze te behouden*, Amersfoort (Nederlandse archeologische rapporten (NAR) 067), paragraaf 5.4 en 6.6.

Beeldverantwoording

p. 4 Creative Commons CC BY -SA 4.0 International license

p. 7 naar: Wang 2016

p. 9 boven: Brochure drainage en grondwater, gemeente Haarlemmermeer

p. 9 onder: Brochure Grondwater in Delfland, een reis door de bodem

p. 10 boven: foto Flevoland erfgoed

p. 11 boven: Van Heeringen & Theunissen 2006

p. 12 Geheugen van Drenthe (Casparie et al. 2004)

p. 13 foto Team Archeologie gemeente Zutphen

p. 15 naar: Kenniscentrum Aanpak

Funderingsproblematiek

p. 17 Jan Willem Schoonhoven (CC BY-SA 4.0)



Water is van cruciaal belang voor de conservering van archeologisch materiaal in de bodem. Voor het beschermen van archeologische terreinen met kwetsbare vondstgroepen en sporen is het nodig kennis te hebben van de werking van het grondwatersysteem. Deze brochure biedt praktische basiskennis voor archeologen die betrokken zijn bij de instandhouding van archeologische (rijks)monumenten of veldonderzoek doen naar de fysieke kwaliteit van het bodemarchief en het conserverend vermogen van de bodem.

Met kennis en advies geeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed de toekomst een verleden.